

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК • УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

# КУНГУРСКАЯ ЛЕДЯНАЯ ПЕЩЕРА: ОПЫТ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Под редакцией  
доктора геолого-минералогических наук В. Н. Дублянского

ЕКАТЕРИНБУРГ • 2005

**Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений** / Под ред. докт. геолого-минер. наук В.Н. Дублянского. Екатеринбург: УрО РАН. 2005. ISBN 5—7691—1567—X.

Кунгурская Ледяная пещера в Приуралье — единственная в России, где на протяжении 50 лет проводились стационарные наблюдения. В процессе работы производили сбор, обработку и обобщение материалов многолетних исследований геологии и морфологии пещеры, ее микроклиматических (температура, влажность, газовый состав, скорость и направление движения воздуха) и гидрологических (уровень воды подземных озер, скважин и р. Сылвы, химический состав всех водопроявлений) параметров, изучали ее отложения (остаточные, гравитационные, гидромеханические, снежно-ледяные, органические, антропогенные) и биологию. Обобщены данные экспериментов, проводившихся в пещере (геофизические исследования, исследования дефицита насыщения природных вод, скорости растворения гипса и ангидрита, наблюдения за капелью и искусственными деформациями пород), а также по охране и использованию Кунгурской пещеры.

Составлен исчерпывающий библиографический список работ по пещере.

Полученные результаты могут быть использованы при дальнейших исследованиях пещеры, организации ее мониторинга и оценке многолетних изменений климатических и гидрогеологических параметров региона. Она будет полезна студентам, обучающимся по специальностям геология, география, биология, а также специалистам, занимающимся проблемами мониторинга и охраны окружающей среды.

Авторский коллектив:

В. Н. Дублянский, О. И. Кадебская, И. А. Лавров, Н. В. Лаврова, М. С. Пятушиц, Ю. В. Кадебский, И. А. Никифорова, К. О. Худеньких (Горный институт УрО РАН); Г. Н. Дублянская, В. Н. Катаев, Н. Е. Молоштанова, Н. Н. Паньков, В. М. Шувалов (ПГУ); Н. Г. Максимович, У. В. Назарова (ЕНИ); Б. Р. Мавлюдов (ИГ РАН)

Отв. редактор

доктор геолого-минералогических наук **А. И. Кудряшов**

Рецензент

доктор географических наук **Н. Н. Назаров**

*Работа по сбору материалов выполнена при финансовой поддержке Комитета природных ресурсов по Пермской области (Госконтракт № 22/2000).*



*Посвящается светлой памяти создателей и первых научных руководителей Кунгурского стационара В.А. Варсанофьевой, Д.В. Рыжикова и В.С. Лукина*

Кунгурская Ледяная пещера известна более 300 лет. О ней написано около 100 научно-популярных и свыше 500 научных работ. Почти 100 лет ее регулярно посещают экскурсанты. В настоящее время она является научно-исследовательской лабораторией-стационаром Горного института УрО РАН и базой для практики студентов разных факультетов Пермского государственного университета. В 2001 г. согласно федеральному закону “Об особо охраняемых территориях” и закону Пермской области “Об историко-культурно-природном наследии” памятники природы “Ледяная гора” и “Кунгурская Ледяная пещера” вошли в состав историко-природного комплекса “Ледяная гора и Кунгурская Ледяная пещера”.

В пещере более 50 лет проводились различные геологические, спелеологические и биологические наблюдения, накоплен огромный материал, который требует обобщения. В 2000—2002 гг. Горный институт УрО РАН провел кропотливую работу по сбору всей накопленной информации. Ее результатом стал электронный банк данных, материалы в котором представлены в виде таблиц и графиков. Однако этот черновой материал нуждался в осмыслении и обработке. В 2003—2004 гг. в результате усилий коллективов Горного института УрО РАН, Пермского государственного университета и Естественно-научного института появилась настоящая монография, состоящая из 2 частей и 20 глав. Ее иллюстрируют 76 таблиц, 189 рисунков и графиков, список литературы включает 461 наименование.

Кунгурскую пещеру часто называют уникальной и в последней главе настоящей монографии рассмотрены причины ее уникальности. Но в такой же мере уникальна и получившаяся книга. Это первая в России монография, посвященная детальному описанию многолетних наблюдений в достаточно крупной пещере, в ней обобщены и взаимно увязаны материалы разноплановых исследований. Таких работ вообще немного. Например, в 1988 г. была опубликована монография З. К. Тинтилозова о Ново-Афонской пещере в Абхазии [394], а в 2002 г. увидела свет работа В. Н. Дублянского с соавтор. [140] о Красной пещере в Крыму. Остальные пещеры стран ближнего зарубежья описаны только в журнальных статьях.

Авторы выражают надежду, что собранные и систематизированные материалы по Кунгурской пещере найдут своих читателей. Ими могут быть студенты и дипломированные специалисты — геологи и географы, биологи и краеведы, исследователи, занимающиеся охраной окружающей среды и оценкой риска освоения закарстованных территорий. Наконец, эта книга — вклад в познание природных богатств Пермского края, одной из жемчужин которых, без сомнения, является Кунгурская Ледяная пещера.



Часть 1

**ГЕОГРАФИЯ И ГЕОЛОГИЯ РАЙОНА  
КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ**



# Глава 1

## ОРОГИДРОГРАФИЯ

Кунгурская Ледяная пещера находится на юго-востоке Пермской области, на северо-восточной окраине г. Кунгура, на правом берегу р. Сылвы (рис. 1.1). Кунгурский район располагается на востоке Русской равнины, близ ее границы с Уральскими горами, и входит в состав денудационной равнины Среднего Предуралья. В составе этой равнины выделяется Сылвинско-Иренская наклонно-карстовая низина, где на западном крыле Уфимского вала расположена пещера [233]. Возвышенные, слабовсхолм-



Рис. 1.1. Расположение Кунгурской Ледяной пещеры

ленные водораздельные пространства чередуются здесь с глубоко врезаемыми речными долинами и логами. При этом поверхность водораздельных участков понижается с юго-востока на северо-запад. Минимальные отметки рельефа приурочены к днищам речных долин.

Водораздельное пространство между реками Сылвой и Шаквой занимает Ледяная гора, представляющая собой платообразную закарстованную возвышенность, которая поднимается над днищами речных долин на 80—100 м. Вход в пещеру расположен у подножия Ледяной горы, в основании крутого, местами отвесного склона, на уровне поверхности первой надпойменной террасы р. Сылвы. Отсюда пещера, многократно разветвляясь, простирается в глубину массива. Каждое ответвление представляет собой вереницу гротов<sup>1</sup>, связанных между собой сравнительно узкими коридорами. Некоторые гроты достигают 50—100 м в поперечнике и 20 м высоты. Общая длина разведанной части пещеры составляет 5,7 км.

В долинах рек прослеживается комплекс речных террас. Наиболее древние из них возвышаются над меженным уровнем рек на 70—120 м и охватывают внутренние части водораздельных пространств. Четвертая надпойменная терраса высотой 55—60 м в ширину достигает 2 км. Все древние поверхности имеют плиоценовый возраст. На третьей цокольной террасе высотой 30—40 м расположена часть г. Кунгура и пригородные поселки. Ширина ее в районе города равна 1,5 км. Уступы крутые, со скальными обнажениями гипсов, ангидритов, известняков и доломитов. Вторая аккумулятивная терраса высотой 15—20 м обычно слабо выражена в рельефе. Первая терраса высотой 4—12 м вместе с поймой образует широкие (до 2—2,5 км) днища речных долин, где разместилась нижняя часть Кунгура. На ее поверхности сохранились заболоченные понижения и старичные озера. Первая надпойменная терраса западнее входа в пещеру выклинивается, и р. Сылва подходит к коренному уступу. Во время высоких паводков терраса, а также низкие участки пещеры затопляются [237].

Плиоценовые террасы, занимающие междуречья, прорезаны глубокими логами-суходолами, на дне которых встречаются эрозионно-провальные впадины с наибольшим поперечником 5—5,5 м и глубиной до 2—4 м. Вдоль бортов долин и на продолжении логов наблюдаются цепи карстовых впадин, указывающие направление стока подземных водотоков.

Специфической чертой территории является широкое развитие карстовых форм. Наблюдения в обнажениях, пещерах и данные бурения скважин свидетельствуют о весьма интенсивной закарстованности гипсов и ангидритов иренского горизонта кунгурского яруса. Значительно слабее закарстованы артинские рифовые известняки, а для филипповских доломитов обычно характерно коррозионное расширение трещин, а также наличие каверн размером 0,5—1,0 см и более.

Из поверхностных карстовых форм чаще всего встречаются воронки. На Ледяной горе они блюдцеобразные и конусообразные, мелкие с задерживаемыми склонами и глубокие с обрывистыми краями. Самые крупные воронки достигают в поперечнике 50 м при глубине 10—15 м. Воронки по большей части сухие и лишь немногие из них заполнены водой и представ-

<sup>1</sup> В мировой литературе для обозначения обширного подземного пространства обычно используется термин "зал" [393]; в Приуралье и Сибири укоренился термин "грот", который и будет использоваться при дальнейшем изложении материала.

Таблица 1.1

## Гидрографические характеристики рек исследуемой территории [188]

Река	Длина, км	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>
Сылва	587	19 700
Ирень	214	6110
Шаква	167	1580

ляют собой карстовые озера [112]. Вторая по частоте встречаемости карстовая форма — провалы. На плиоценовых террасах их насчитывается около сотни: из них 87 % имеют в поперечнике размеры до 5 м, 13 % — от 5 до 10 м. Наряду с одиночными провалами описаны группы сближенных впадин разной величины. Из других карстовых форм встречаются карстовые рвы, приуроченные к трещинам бортового отпора. Встречаются неглубокие котловины поперечником до 0,5—1 км, исчезающие ручьи, поноры, которые часто находятся на дне карстовых воронок, и крупные впадины сложной формы. Особенностью района являются пещеры, выработанные в гипсах и ангидритах.

Карстовые формы рельефа распределены крайне неравномерно: местами они отсутствуют на площади около 1 км<sup>2</sup>, а по соседству их плотность достигает 2000—3000 шт/км<sup>2</sup>. Нередко карстовые впадины образуют крупные скопления — “поля”. Самое крупное “поле” расположено на северо-западной окраине Ледяной горы, в урочище Байдарашки, где количество карстовых форм достигает 500—1000 шт/км<sup>2</sup>.

Река Сылва начинается на западном склоне Среднего Урала и впадает в Сылвенско-Чусовской залив Камского водохранилища. В пределах исследуемой территории она принимает два притока — реки Ирень и Шаква, которые существенно влияют на ее гидрологический режим. Этот речной узел сформировался в плиоцене и антропогене под влиянием тектонических движений и карста. В табл. 1.1 приведены гидрографические характеристики рек Сылвы, Ирены и Шаквы. Они относятся к типу рек с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной устойчивой зимней меженью. В их питании преимущественное значение имеют снеговые воды. По условиям водного режима относятся ко 2-му гидрологическому району, в котором до 60 % осадков стекает в реки ( $\alpha = 0,40—0,60$ ). Распределение речного стока в течение года относительно равномерное — доля устойчивого (базисного) стока достигает 50 % его годового объема ( $W = 0,45—0,50$ ).

Согласно гидрологическому районированию рек Пермской области, выполненному А. С. Шкляевым, данная территория относится к Нижне-сылвенскому округу. Густота речной сети варьирует в широких пределах — от 0,2 до 1,0 км/км<sup>2</sup>. Весеннее половодье обычно начинается в апреле. Вскрытие р. Сылвы происходит с 7 апреля (раннее) по 7 мая (позднее) [188]. Средний многолетний уровень воды в р. Сылве составляет 113,22 м, коэффициент его вариации — 0,0037. Среднемесячные уровни колеблются от 114,30 (май) до 112,94 м (февраль), а их вариация — от 0,0019 (август) до 0,0109 м (май). Максимальные среднемесячные уровни наблюдаются в апреле (117,06 м, 1983 г.), минимальные — в феврале (112,02 м, 1990 г.). Представление о многолетнем ходе среднемесячных уровней воды в р. Сылве дает рис. 1.2.

Высота паводка на р. Сылве и питание карстовых вод зависят также от промерзания почвы. В годы с теплыми зимами и медленным сходом снега весной талые воды в значительной мере впитываются, что приводит к

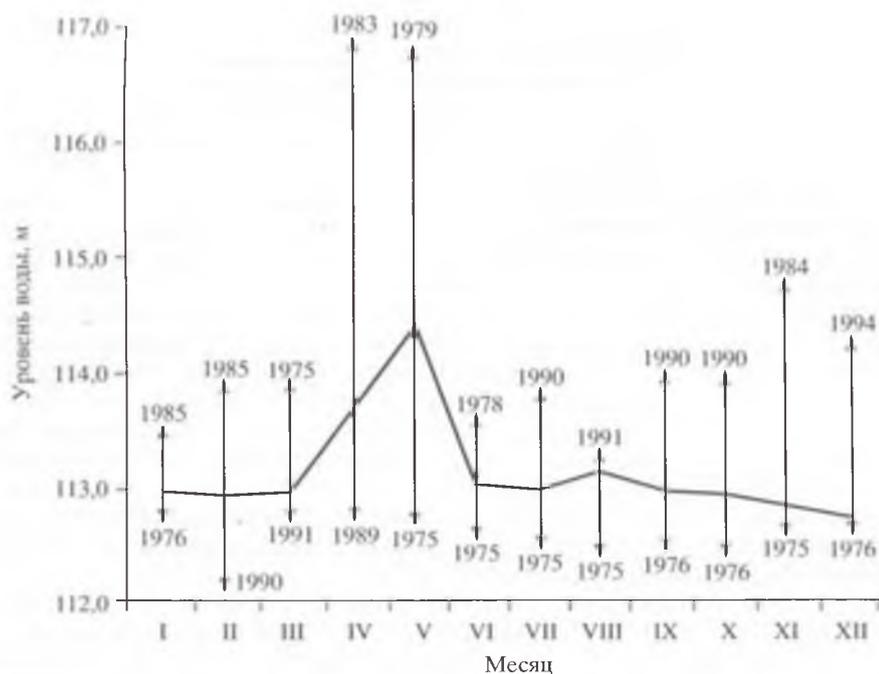


Рис. 1.2. Многолетний ход среднемесячных уровней воды в р. Сылве (водомерный пост с. Подкаменное, 1948—1995 гг.)

двухпиковым паводкам (1989 г.), когда уровень реки поднимался незначительно (меньше нормы на 2,5—3,0 м). Глубина промерзания определяет высоту паводка косвенно, в сочетании с другими факторами.

Гидрограф стока для нижнего течения р. Сылвы имеет чаще всего многопиковую форму, в отдельные годы может быть один пик в связи с возвратом холодов или дождевыми паводками. Летне-осенняя межень продолжительна и, как правило, прерывается дождевыми паводками, которых в отдельные годы может и не быть. Зимняя межень отличается устойчивостью и большой продолжительностью. В среднем период зимней межени составляет 140—160 дней. С начала ледообразования водность рек быстро снижается.

Территория г. Кунгура относится к району преобладания сульфатно-гидрокарбонатных кальциевых (магниево-кальциевых) гидрохимических типов вод бассейна р. Сылвы [425]. Карстовые воды сульфатных отложений подпитывают реки данного района, что объясняет их высокую минерализацию. По данным многолетних наблюдений стационара (1951—2000 гг.), среднее содержание основных компонентов в воде р. Сылвы составляет, мг/дм<sup>3</sup>:  $\text{HCO}_3^-$  — 205,0;  $\text{SO}_4^{2-}$  — 148,5;  $\text{Cl}^-$  — 22,1;  $\text{Ca}^{2+}$  — 95,1;  $\text{Mg}^{2+}$  — 17,9;  $\text{Na}^+$  — 36,0; сумма солей — 508,1.

## Глава 2

### КЛИМАТ

Климатическая характеристика района дается по монографиям “Агро-климатический справочник по Пермской области” [1] и “Климат Пермской области” [188] и дополнена данными метеостанции Кунгур за 1926—2002 гг., которая находится на  $57^{\circ}25'$  с. ш. и  $56^{\circ}56'$  в. д., на высоте 135 м над ур. м. Согласно ее данным, климат района умеренно континентальный: суровая многоснежная зима и короткое умеренно теплое лето, формируется преимущественно под влиянием атлантических воздушных масс, которые приносят много влаги. Частые циклоны смягчают ход температуры, зимой приносят оттепели, а летом прохладную погоду. Нередко в холодное время года поступают арктические массы воздуха с низкими температурами. В районе Кунгура преобладают ветры юго-западного и западного направлений [71].

Продолжительность безморозного периода в районе Кунгурской пещеры составляет 115 дней, с температурой выше  $0^{\circ}\text{C}$  — 195, выше  $5^{\circ}\text{C}$  — 160, выше  $10^{\circ}\text{C}$  — 120, выше  $15^{\circ}\text{C}$  — 60. Средняя температура холодного периода  $-6,3^{\circ}\text{C}$ , теплого  $+13,6^{\circ}\text{C}$ . Максимум температуры  $+37,5^{\circ}\text{C}$ , минимум  $-40^{\circ}\text{C}$  (средний) и  $-45^{\circ}\text{C}$  (абсолютный). Средняя глубина промерзания грунтов, см: декабрь — 33, январь — 47, февраль — 61, март — 75, апрель — 3. Мощность промерзшего грунта, которая фиксируется по скважинам, пробуренным в конце зимнего периода, равна 0,81 м ( $CV = 0,33$ ). На интенсивно закарстованных участках, где снеговой покров распределен неравномерно, глубина промерзания колеблется от 0 до 0,5 м. Многолетней мерзлоты в районе нет.

Осадки. Район относится к зоне достаточного увлажнения (рис. 2.1). За год выпадает 500 мм осадков (125 мм — в холодный, 375 мм — в теплый периоды); максимум — 609 мм, минимум — 304 мм. В течение года осадки распределяются неравномерно: 68 % приходится на летний период — с мая по октябрь. С ноября по март осадки выпадают в основном в виде снега. Устойчивый снежный покров сохраняется 170 дней, средняя максимальная декадная высота снега равна 60 см, запас воды в нем составляет 130 мм. Суточное количество осадков также неравномерное — максимум достигает 72 мм. На поверхности Ледяной горы часть выпадающих осадков поглощается карстовыми формами и отводится в глубь массива. Преобладающие южные и западные ветры усиливают зимнюю циркуляцию воздуха в пещере, направленную от подножия экспонированного на юг склона по лабиринту подземных ходов в направлении водораздела.

Испарение с поверхности воды (р. Сылва) составляет 358 мм, с поверхности земли и снега — 315 мм (рассчитано с использованием формул и графиков работы [146]), коэффициент испарения — 0,53.

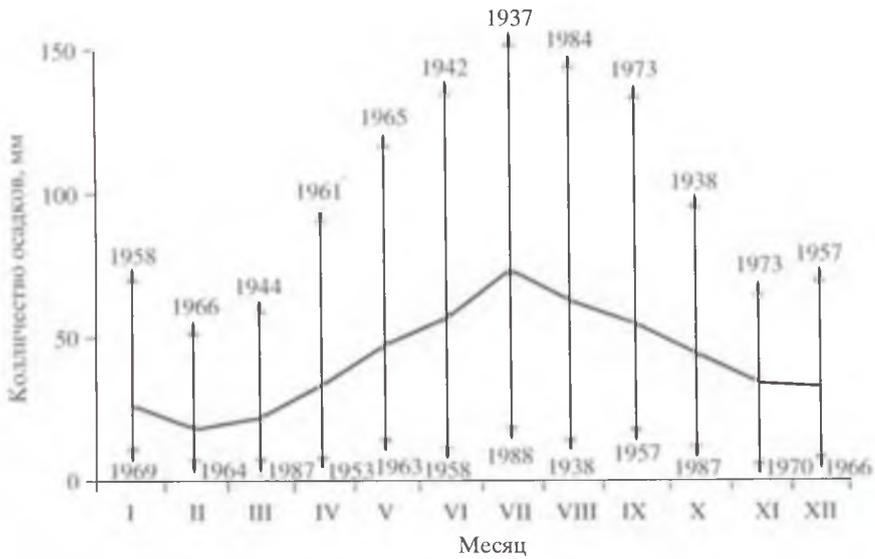


Рис. 2.1. Многолетний ход среднемесячных осадков по м/с Кунгур (1936—1993 гг.). На рис. 2.1—2.2 цифры у стрелок — годы с максимальными и минимальными значениями показателей

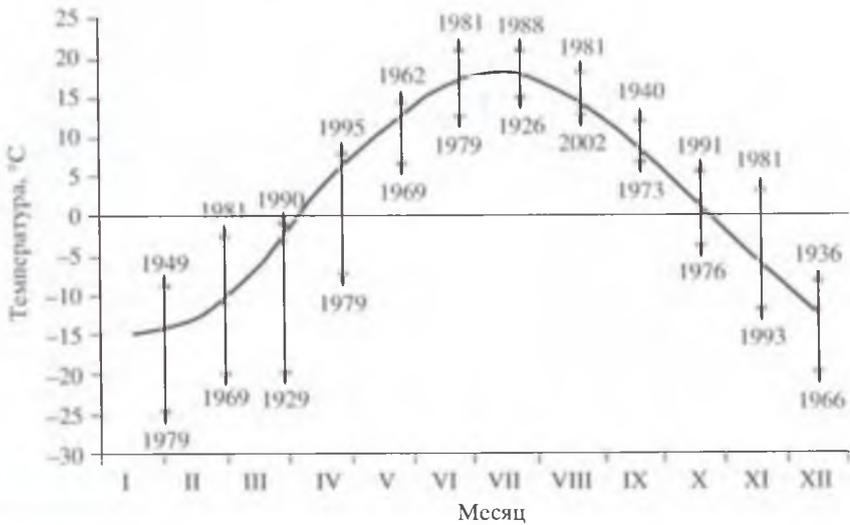


Рис. 2.2. Многолетний ход среднемесячных температур воздуха по м/с Кунгур (1926—1986 гг.)

Таблица 2.1

**Годы с максимумами метеоэлементов и уровней воды р. Сылвы**

Элемент	Год								
	Температура	1935	1941	1949	—	1963	1972	1976	1982
Осадки	1938	1942	1949	1957	1962	1973	1978	1984	1992
Уровни	1939	—	1947	1958	1964	1973	1979	1985	1990

Вскрытие Сылвы (пост Подкаменное): среднее — 17.IV, раннее — 7.IV, позднее — 27.IV; очищение от льда: среднее — 25.IV, раннее — 15.IV, позднее — 9.V; замерзание: среднее — 10.XI, раннее — 27.X, позднее — 3.XII.

В проявлении максимумов и минимумов методом скользящих средних трехлеток выявлена нечеткая ритмичность с периодом 11—13 лет. Более ясно она видна по максимумам (табл. 2.1).

Остальные климатические характеристики района Кунгурской Ледяной пещеры приведены в табл. 2.2 и 2.3.

Средняя многолетняя температура, рассчитанная по среднесуточным температурам метеостанции Кунгур за период с 1926 по 2002 гг. (1,8 °С), оказалась выше приведенной в опубликованных материалах за 1936—1959 гг. (1,3 °С, см. табл. 2.3). Ее распределение по периодам также различается: на 0,8 °С повысилась средняя температура холодного (–6,9 °С — расчетные данные, –7,7 °С — опубликованные) и на 0,1 °С — теплого (май—сентябрь) (14,0 °С — расчетные данные, 13,9 °С — опубликованные) периодов. Максимальная амплитуда колебаний среднемесячных температур составляет 21,2 °С (март), минимальная — 8,2 °С (сентябрь). Амплитуда колебаний среднегодовых температур 47,9 °С (от 22,2 °С в июле до –25,7 в январе). Представление о многолетнем ходе среднемесячных температур дает рис. 2.2.

Среднее многолетнее количество осадков за 1936—1993 гг. (499 мм) также отличается от опубликованных данных за 1936—1955 гг. (473 мм). Годовая сумма осадков возросла на 26 мм (6 %). Количество осадков в холодный период возросло на 10 % (20 мм), а в теплый — на 2 % (6 мм).

Климатические характеристики района Кунгурской пещеры по [1] (в скобках по [188])

Параметр	Месяц												За год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Температура воздуха, °С	-15,5	-14,4	-8,0	2,3	10,4	16,0	18,1	15,6	9,4	2,0	-3,1	-13,4	1,6
Средняя температура, °С	(-15,7)	(-14,2)	(-7,8)	(2,1)	(10,3)	(16,1)	(18,1)	(15,5)	(9,5)	(1,5)	(-6,5)	(-13,5)	(1,2)
Абсолютный минимум, °С	-49	-47	-42	-22	-8	-2	2	0	-5	-22	-38	-49	-49
Осадки, мм	24	20	20	24	41	59	65	59	55	39	33	26	465
Испарение, мм (расчет):	(23)	(19)	(20)	(26)	(42)	(65)	(66)	(59)	(53)	(40)	(34)	(26)	(473)
с воды	6	6	8	30	63	75	82	60	33	30	15	3	358
с грунта и снега				22	44	62	62	49	33	15	5	3	315
Грозы				0,2	2	6	7	3	0,5	0,2			19
Туманы	2	1	0,8	1	0,8	0,5	1	4	3	2	0,5	2	19
Метель	8	8	7	1	0,1					0,9	4	9	38
Абсолютная влажность													
мм. рт. ст.	1,9	1,9	3,1	5,6	8,5	12,5	14,9	13,5	9,7	6,1	3,9	2,3	7,0
мм. рт. ст.	1,4	1,4	2,3	4,2	6,4	9,4	11,1	10,1	7,3	4,6	2,9	1,7	5,3
Дефицит насыщения													
мм. рт. ст.	0,4	0,5	1,0	3,1	6,0	6,1	8,1	6,5	3,5	1,4	0,7	0,4	3,1
мм. рт. ст.	0,3	0,4	0,8	2,4	4,5	4,6	6,1	4,9	2,6	1,1	0,5	0,3	2,3
Расход воды р. Сылва*, м³/с													
средний	45,6	44,5	43,8	38,2	51,1	159	100	73,3	70,2	87,7	78,78	48,8	137
максимум	62,2	62,6	59,0	77,6	113,0	364	225	180	168	198	180	90,0	215
минимум	27,7	30,1	33,7	74,2	21,2	70,5	45,6	40,2	36,5	39,8	38,2	30,2	86,2
Средняя декадная температура, °С	-15,6	-15,4	-11,1	-1,0	8,2	14,8	18,0	17,2	11,6	4,5	-3,7	-12,0	
	-15,8	-14,5	-7,9	2,4	10,3	16,1	18,2	15,8	9,4	2,0	-6,5	-13,5	
	-15,8	-13,2	-5,0	5,4	12,6	17,1	18,1	13,9	7,3	-0,6	-9,2	-14,8	
Средний декадный дефицит влажности, мм	0,3	0,5	0,7	2,3	4,9	8,4	8,5	7,0	4,8	1,6	0,9	0,5	
	0,4	0,5	0,9	3,1	5,9	8,9	8,1	6,5	3,3	1,4	0,7	0,4	
	0,5	0,6	0,9	3,9	7,1	8,8	7,6	5,9	2,3	1,2	0,6	0,3	

\* Пост в с. Подкаменное, площадь водосбора 19 700 км².

Таблица 2.3

Многолетние расчетные климатические характеристики района Кунгурской Ледяной пещеры

Параметр	Месяц												Зима				
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII					
Температура воздуха (1926—2002 гг.), °С																	
Среднее	-15,0	-13,2	-6,8	3,2	10,6	16,3	18,2	15,3	9,5	2,2	-5,6	-12,8	1,8				
Максимум	-6,6	-0,7	0,5	9,5	15,7	22,2	22,2	19,4	13,2	6,8	5,2	-6,4	22,2				
Минимум	-25,7	-21,0	-20,7	-8,7	5,4	11,2	13,4	11,1	5,0	-5,0	-13,5	-21,1	-25,7				
Амплитуда	19,1	20,3	21,2	18,2	10,3	11,0	8,8	8,3	8,2	11,8	18,7	14,7	47,9				
Атмосферные осадки (1936—1993 гг.), мм																	
Среднее	27	18	21	31	46	56	73	61	55	45	34	32	499				
Максимум	72	55	60	97	119	139	155	147	138	98	69	72	155				
Минимум	7	2	1	3	10	5	13	8	12	5	0	3	0				
Амплитуда	65	51	59	94	109	134	142	139	126	93	69	69	155				

Водораздельное плато Ледяной горы сложено гипсами и ангидритами, которые чередуются с маломощными слоями известняков и доломитов. На обрывистых берегах Сылвы эти породы выходят на дневную поверхность, а на водоразделе покрыты песчано-глинистыми отложениями древних террас [233]. На высокой равнине, а также в вогнутых и покатых частях коренных склонов рек Сылвы и Шаквы формируются темно-серые лесные среднеподзоленные, среднесуглинистые почвы. Наличие крутых склонов способствует развитию процессов эрозии, смыву рыхлых поверхностных отложений, обнажению коренных пород, образованию на них смытых маломощных каменистых почв.

Подтип дерново-подзолистых почв, представленный видами среднеподзоленных почв суглинистого и глинистого гранулометрического состава, залегает на наиболее плоских формах рельефа, преимущественно под лесом. Выровненные участки и покатые склоны водораздела занимают дерново-среднеподзолистые почвы. На склонах коренного берега на глинистом элювии известняков и гипсов залегают дерново-слабоподзолистые почвы. В понижениях высокой равнины среди дерново-подзолистых почв формируются дерново-подзолистые глееватые. Глееватость является результатом длительного сезонного переувлажнения почвенной массы и развития восстановительных процессов в анаэробных условиях.

Ледяная гора относительно бедна поверхностными водами. Значительная часть атмосферных осадков скапливается в карстовых воронках, по трещинам просачивается вниз и не может быть использована растениями. Недоступны для растений и карстовые воды, уровень которых находится здесь на глубине до 80 м от поверхности. Водный режим территории, ее рельеф вместе с другими физико-географическими условиями местности, а также хозяйственная деятельность человека наложили отпечаток на характер растительного покрова этого района.

Ледяная гора входит в пределы островной Кунгурской лесостепи, выделенной и описанной еще в XIX в. Этот островок лесостепи расположен в подзоне южной тайги. Флора и растительность его отличаются своеобразием: расположенные в западном Предуралье березовые колки, сосновые леса, растительность открытых пространств имеют сибирский оттенок, что свидетельствует о распространении здесь в прошлые эпохи плейстоценовой лесостепи с березовыми, сосновыми и лиственничными лесами, элементы которой, хотя и в сильно измененном виде, сохранились до настоящего времени. Растительный покров территории над Кунгурской пещерой представлен тремя типами растительности: лесным (березовые рощи и посадки сосны), луговым (пастбища) и растительностью гипсовых и известняковых обнажений и продуктов их разрушения.

Березовые рощи со злаково-разнотравным покровом занимают 30 % территории. Древостой одноярусный, сложен березой бородавчатой средней высотой до 17 м, средним диаметром 45 см и возрастом 120—140 лет. Степень сомкнутости крон около 20 %. Возобновление, а также кустарниковый ярус отсутствуют. Травостой в результате интенсивного стравливания животными сильно истощен, низкотравный (высота 5—8 см), степень покрытия почвы 50 %. В видовом составе преобладают тысячелистник обыкновенный, манжетка, бедренец, камнеломка, клевер ползучий, мятлик луговой, будра плющевидная, земляника, тимофеевка луговая, черноголовка обыкновенная, вероники колосистая и лекарственная, ястребинка волосистая, хризантема сибирская и др. Моховой покров довольно равномерный, степень покрытия им почвы до 60 %; преобладают зеленые мхи.

Остальная площадь (исключая обнажения коренного берега Сылвы) занята разнотравно-злаковым пастбищем, травостой которого низкорослый, истощенный, находящийся под сильным воздействием бессистемного выпаса. Степень покрытия почвы травостоем 75—80 %. В его состав входят мятлик луговой, овсяницы луговая и красная, тысячелистник обыкновенный, горошек мышиный, одуванчик, клевер ползучий, звездчатка злаковидная, лапчатка серебристая, щавель малый, полевица обыкновенная, манжетка и другие виды.

Со стороны берегов реки в травостой луга, а также березовой рощи заходят степные виды (астрагал датский, полынь холодная и др.). На повышениях микрорельефа часто встречаются чабрец обыкновенный, очиток едкий, солнцезвезд обыкновенный, астрагал датский, тимофеевка степная и др.

На коренных склонах Сылвы развита растительность каменистых обнажений, лучше сохранившая естественный облик. В их флористическом составе господствуют лугово-степные и горно-степные виды: овсец пустынный, шалфей степной, котовник голый, качим высокий, василек сибирский, оносма простейшая, полынь холодная и шелковистая, астрагал датский, ковыль Иоанна, ластовень обыкновенный, дрок красильный, овсяница ложноовечья, мордовник обыкновенный и др. Эти виды имеют разное происхождение. Многие из них являются реликтами во флоре западного Предуралья и дают представление об истории развития растительности, о сменах растительности, которые происходили здесь в прошлые эпохи.

На пологих участках коренного берега, в верхней части склона, встречаются фрагменты каменистой степи с овсяницей ложноовечьей, мордовником обыкновенным, шалфеем степным, чабрецом, полынью холодной, очитком обыкновенным, тимофеевкой степной, колокольчиком сибирским.

Естественный растительный покров территории над Кунгурской пещерой в значительной степени изменен под влиянием хозяйственной деятельности человека. В результате рубок значительно сократилась площадь березовой рощи. Интенсивный выпас животных стал причиной истощения и низкой продуктивности пастбищ (урожай зеленой массы здесь не превышает 2—3 ц/га). С выпасом животных связано и отсутствие возобновления в березовой роще. Вырубка деревьев и выпас скота на участках водораздела, расположенных вблизи крутых склонов правобережья Сылвы, способствуют усилению эрозионных процессов.

## Глава 4

# ГЕОЛОГИЯ

### 4.1. СТРАТИГРАФИЯ И ЛИТОЛОГИЯ

В строении осадочного чехла района Кунгурской пещеры принимают участие породы пермской, неогеновой и четвертичной систем. Стратиграфия района описана во многих работах [67, 233 и др.], в том числе в путеводителях, подготовленных к 17 Международному геологическому конгрессу и Международному конгрессу “Пермская система земного шара” [326]. В 2000 г. была опубликована обзорная статья, посвященная геологии заказника “Предуралье” [325]. В ней приведены новейшие данные по стратиграфии, палеогеографии и палеонтологии района, в том числе геологический разрез Ледяной горы у Кунгурской пещеры. Эти данные дополнены материалами детального изучения разреза, полученными непосредственно в пещере.

#### Палеозойская эратема (PZ)

**Пермская система (P).** В составе пермской системы наибольшее распространение имеют породы нижнего отдела ( $P_1$ ), представленного артинским и кунгурским ярусами<sup>2</sup>.

**Артинский ярус ( $P_{1AR}$ ).** Наиболее древними породами, выступающими на поверхности близ Кунгурской пещеры, являются окремнелые известняки саргинского ( $P_{1AR}^{srg}$ ) — (камайская свита, мощность более 90 м) и чистые известняки саранинского ( $P_{1AR}^{sarn}$ ) — (сылвинская и шуртанская свиты, мощность до 25 м) горизонтов. Они образуют скалистые обнажения по склонам долины Сылвы вверх от с. Филипповского и вскрыты карьерами. Рифовые тела сложены органогенными известняками, на межрифовых участках залегают темно-серые глинистые слоистые детритусовые известняки.

На Ледяной горе отложения артинского яруса залегают ниже эрозионных врезов и вскрыты скважинами 998 и 3625 (см. рис. 4.7, 4.8).

**Кунгурский ярус ( $P_{1K}$ ).** В районе Кунгурской пещеры расположен стратотип кунгурского яруса [325], представленный филипповским и иренским горизонтами.

Филипповский горизонт ( $^{ph}P_{1K}^{ph}$ ) распространен почти по всей территории района, но на поверхность он выступает только в его восточной половине (рис. 4.1). По склонам долин рек Сылвы и Шаквы, наряду с есте-

<sup>2</sup> В исходной геологической документации применялись самые разные формы написания стратиграфических индексов. В. П. Ожгибесов [324] предложил пользоваться полным стратиграфическим индексом, схема записи которого имеет вид:  $^{свита}_{горизонт} СИСТЕМА_{горизонт} ОЦЕЛЯ ЯРУС_{горизонт}$

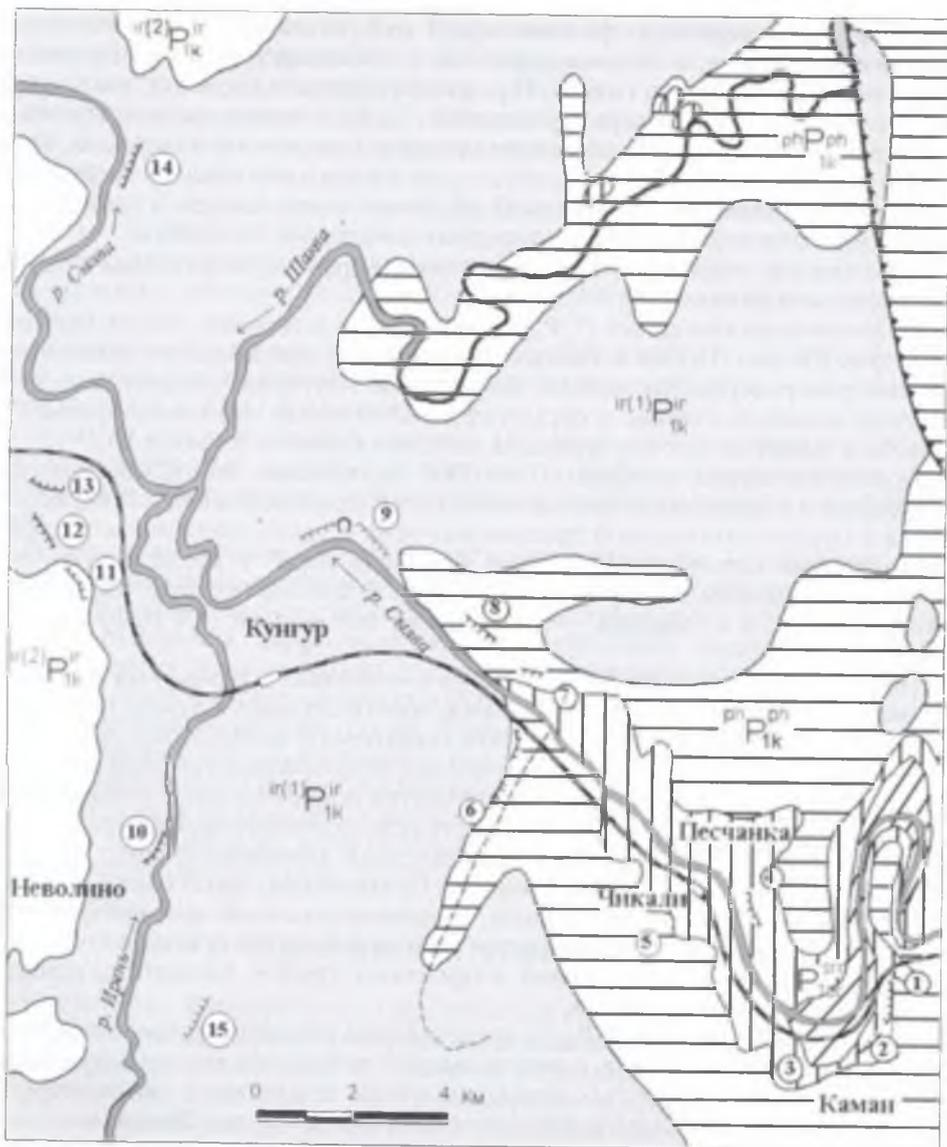


Рис. 4.1. Схематичная геологическая карта района Кунгурской Ледяной пещеры [325].  
 а — верхняя подсистема иренской свиты иренского горизонта кунгурского яруса; б — нижняя подсистема иренской свиты иренского горизонта кунгурского яруса (в составе пяти нижних пачек свиты); в — филипповская свита филипповского горизонта кунгурского яруса; г — саранинский горизонт артинского яруса; д — сарганинский горизонт артинского яруса; е — сброс; ж — Кунгурская пещера; з — реки; и — железная дорога; к — геологические разрезы 1 — Куронка, 2 — Камаяские Зубцы, 3 — Каман, 4 — Ермак, 5 — Чикали, 6 — Сухая речка, 7 — Гамов лог, 8 — Филипповка, 9 — Ледяная гора, 10 — Неволино, 11 — Нагорный, 12 — Романов лог, 13 — Бабина гора, 14 — Подкаменное, 15 — Новая Деревня

ственными обнажениями, филипповские отложения вскрыты многочисленными карьерами, а на западе района — скважинами непосредственно под толщей ангидритов и гипсов. В разрезе горизонта господствуют слоистые желтовато-серые и серые доломиты, доломитизированные известняки. Породы содержат значительную примесь глинистого материала. Подчиненную роль играют гипсы, залегающие в виде линз обычно небольшой мощности и являющиеся причиной возникновения каверн и небольших карстовых полостей. Мощность пород колеблется от 50 до 80 м.

Иренский горизонт ( ${}^{\text{ir}}P_{1\text{K}}^{\text{ir}}$ ) представлен тремя сульфатными и двумя карбонатными пачками.

*Ледянопещерская пачка* ( ${}^{\text{ld}}P_{1\text{K}}^{\text{ld}}$ ) обнажается в нижних частях склонов долин рек Сылвы, Ирени и Шаквы. В ее составе преобладают ангидриты, меньше распространены гипсы. Ангидриты голубовато-серые и серые, зернисто-кристаллические и скрытокристаллические, желвакообразные и слоисто-волнистые за счет примазок доломита серого, глинистого.

Кристаллические ангидриты слагают внутренние части массива; белый, серый и коричневатый гипс преобладает в присклоновых частях, встречается в местах интенсивной трещиноватости, а также вблизи контактов с карбонатными породами. В разрезе “Ледяная гора” у входа в пещеру в 6,3 м выше подошвы ангидритов залегает слой доломита светло-серого, пелитоморфного, в основании — оолитового мощностью 1,4 м. Мощность пачки 31,6 м.

*Неволинская пачка* ( ${}^{\text{nv}}P_{1\text{K}}^{\text{nv}}$ ) сложена в основном доломитами и известняками доломитизированными, серыми, желто-серыми и темно-серыми, в подошве иногда с прослоем доломита оолитового мощностью до 1 см. В средней части пачки, в 4,6 м от ее подошвы, прослеживается слой гипса белого мощностью 6,5 м. Здесь же встречается прослой глины темно-серой, плотной, мощностью до 0,1 м. В известняках доломитизированных и вторичных доломитах содержится разнообразный комплекс фауны: фузулиниды, остракоды, криноидеи, мшанки, брахиоподы, двустворки, мелкие фораминиферы разной сохранности. В приподошвенной части встречаются ядра брахиопод. Пачка обнажается у входа в Кунгурскую пещеру, в наиболее высоких обвальных гротах и органичных трубах. Мощность пачки в разрезе “Ледяная гора” 14,0 м.

*Шалашининская пачка* ( ${}^{\text{sh}}P_{1\text{K}}^{\text{sh}}$ ) представлена гипсами белыми, зернисто-и скрытокристаллическими, с неравномерно-волнистой текстурой от горизонтально-волнистослоистых примазок глины и доломита светло-серого, серого, глинистого, пелитоморфного, массивнослоистого. Вследствие карстовых процессов она сильно разрушена и сохранилась в виде отдельных островов. В подошве пачки в гротах Вышка и Вышка II залегают пятнистые гипсы, рыхлые, сильно трещиноватые, которые выше сменяются серыми рыхлыми гипсами с жилками доломита. Выше залегает пласт доломита мощностью 2 м. Кровля сложена серым трещиноватым гипсом. Мощность пачки у входа в пещеру 16,4 м.

*Елkinsкая пачка* ( ${}^{\text{el}}P_{1\text{K}}^{\text{el}}$ ) представлена доломитами, известняками доломитизированными, известняками, оолитовыми, пелитоморфными, детритовыми серыми, органогенно-обломочными с фауной брахиопод, мшанок, остракод, двустворок, члениками криноидей, мелкими фораминиферами. На поверхности Ледяной горы описана в борту глубокой карстовой

воронки. Мощность пачки 3,8 м. В описании пещеры имеется указание на то, что обломки кавернозного известняка елкинской пачки встречены в верхней части конуса высыпания в гроте Вышка.

*Демидковская пачка* ("<sub>ан</sub>P<sub>1к</sub>"<sup>н</sup>). Обнажения немногочисленны. В воронках на Ледяной горе над доломитами елкинской пачки залегает гипс серовато-белый мощностью до 4 м.

*Тюйская* ("<sub>к</sub>P<sub>1к</sub>"<sup>н</sup>) и *лунежская* ("<sub>л</sub>P<sub>1к</sub>"<sup>н</sup>) пачки на Ледяной горе полностью размыты. В других обнажениях района представлены известняками, доломитами, аргиллитами и ангидритами серыми, светло-серыми, голубовато-серыми с прослоями доломита. Их суммарная мощность достигает 70—80 м.

Абсолютный возраст горных пород кровли кунгурского яруса (ангидритов кровли лунежской пачки), определенный калий-аргоновым методом, оценивается в  $257,0 \pm 1,6$  млн лет [325].

Верхний отдел пермской системы (P<sub>2</sub>) и мезозойская эратема (MZ) в районе Кунгурской пещеры отсутствуют. Кайнозойская эратема (KZ) представлена здесь неогеновой (предположительно) и четвертичной системами.

**Неогеновая система** (N?—Q) представлена в разрезе Ледяной горы карстовой брекчией, состоящей из дресвы, щебня и глыб местных карбонатных и сульфатных пород с примесью песчано-глинистого и гравийного материала. Мощность карстово-обвальных отложений весьма изменчива и резко колеблется на коротких расстояниях. Максимальной величины (до 40—50 м) она достигает на водораздельных пространствах [233].

**Четвертичная система** (Q) на Ледяной горе и в долинах рек Сылвы, Шаквы, Ирени сложена разными генетическими типами континентальных осадков. Шире всего развиты аллювиально-делювиальные суглинистые и песчано-глинистые (вверху) и песчано-гравийно-галечниковые (внизу) отложения. Мощность их колеблется от 4—5 до 40 м. Среди них на разной глубине встречаются линзы торфа [233].

## 4.2. ТЕКТОНИКА И ТРЕЩИНОВАТОСТЬ

Территория Кунгура и его окрестностей приурочена к западному крылу Уфимского вала [48], который выделяется приподнятым залеганием нижнепермских отложений. В пределах рассматриваемой территории наблюдается моноклинальное залегание горных пород с постепенным погружением на запад-северо-запад. Господствующая здесь трещиноватость пород имеет разную природу. На схеме структур, выделенных в результате дешифрирования космоснимков [180], четко видно, что Кунгур находится "в угле" субширотных (65°), северо-восточных (35°) и северо-западных (300°) линейментных зон Восточно-Европейской платформы (рис. 4.2). Линейменты северо-западного простирания имеют шаг 75—100 км, что, по данным С. И. Стрельникова, соответствует параллельной глубинной делимости земной коры, предопределившей развитие древних трогов и глубинных разломов. Субширотные линейменты пересекают платформу с шагом 500—750 км, контролируя структуры фундамента, характеризующиеся сдвиговыми смещениями, а с шагом 15 км играют существенную роль в современном геодинамическом режиме территорий, являясь зонами затуха-

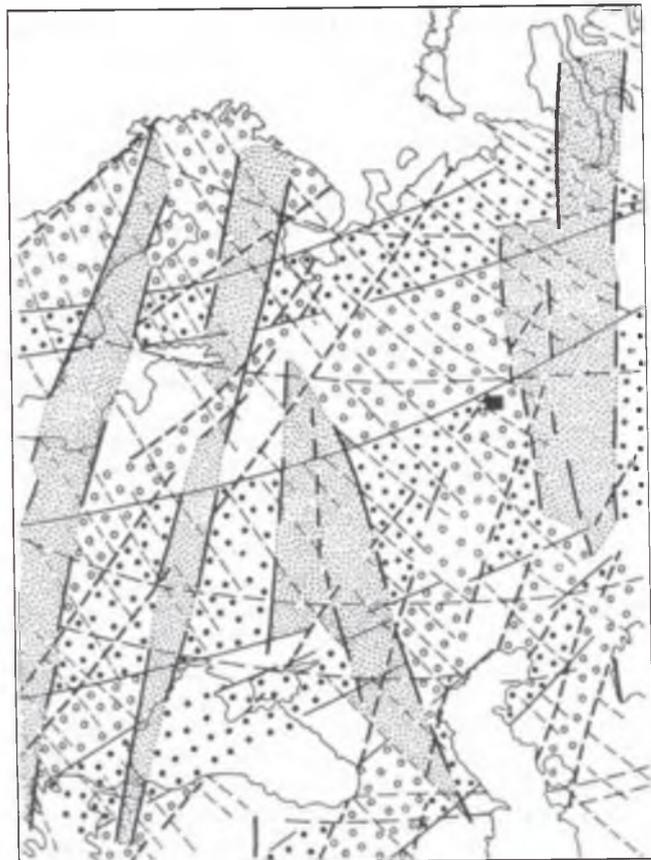


Рис. 4.2. Линеamentные зоны Восточно-Европейской платформы [180].

1 — субширотная, 2 — северо-восточная, 3 — субмеридиональная, 4 — северо-западная. Район Кунгура обозначен черным квадратом

ния сейсмических колебаний [176].

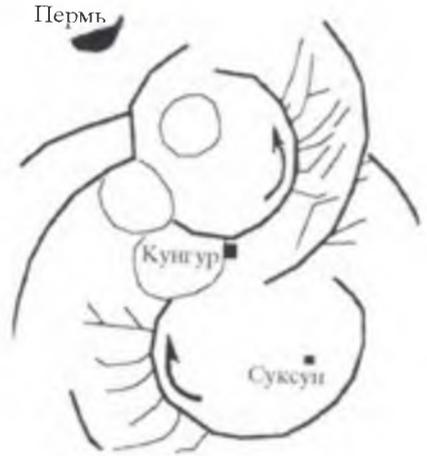
Новейшие исследования [414] свидетельствуют о том, что Кунгур находится в узле пересечений трех вихревых тектонических структур и оперяющих их под острыми углами разломов (рис. 4.3).

В. М. Новоселицкий с соавт. [319] приводят подробную схему строения фундамента и тектоническую схему северной части Волго-Уральской провинции (рис. 4.4), согласно которой район Кунгура находится в пределах карельского блока фундамента, ограниченного субширотными и субмеридиональными нарушениями, активизи-

зировавшимися в палеозое и мезокайнозое (рис. 4.4, А). На тектонической схеме этому блоку соответствует Кунгурско-Уфимский выступ, ограниченный с востока крупным нарушением, отделяющим его от Сылвинской впадины.

Н. В. Введенская и Л. Н. Спириин [49], развивая идеи С. С. Шульца о планетарной трещиноватости ротационного генезиса, выделяют на схемах евразийской части бывшего СССР 14 направлений трещин, представляющих собой взаимно перпендикулярные системы (динамопары):  $35^\circ$  и  $305^\circ$ ,  $20^\circ$  и  $290^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $360^\circ$ ,  $80^\circ$  и  $350^\circ$ ,  $70^\circ$  и  $340^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $330^\circ$ ,  $50^\circ$  и  $320^\circ$ . Район пещеры находится на стыке блоков, ограниченных планетарно-тектоническими трещинами, образующими динамопары  $50^\circ$ — $320^\circ$  и  $90^\circ$ — $360^\circ$ . Зоны II и I порядков образованы сдвоенными и счетверенными зонами III порядка, причем “дополнительные” зоны примыкают к основной с интервалами 6, 12 и  $48^\circ$ . Район Кунгурской пещеры попадает на стыки Пашийской и Кунгурской ( $320^\circ$  и  $50^\circ$ ), Бавлинской и Тиманской ( $330^\circ$  и  $60^\circ$ ), Пермской и Углеуральской ( $340^\circ$  и  $70^\circ$ ), Уфимской и Юрюзано-Сылвенской ( $350^\circ$  и  $80^\circ$ ) зон трещиноватости. Зоны III порядка имеют постоянную ширину 200—220 км.

Рис. 4.3. Морфология вихревых тектонических структур в платформенной части Пермской области [414]



Таким образом, “глобальный” подход к оценке структурно-тектонических условий района Кунгурской пещеры не дает однозначного ответа на положение Ледяной горы в пределах тех или иных тектонических блоков и вероятных направлений трещиноватости в слагающих ее породах. Подход С.С. Шульца вообще приводит в тупик, так как средняя разница в направлениях трещин  $6^\circ$  лежит в пределах ошибки наблюдений. Более перспективны “региональный” и “локальный” подходы, использованные В. С. Лукиным, А. И. Печеркиным и В. Н. Катаевым.

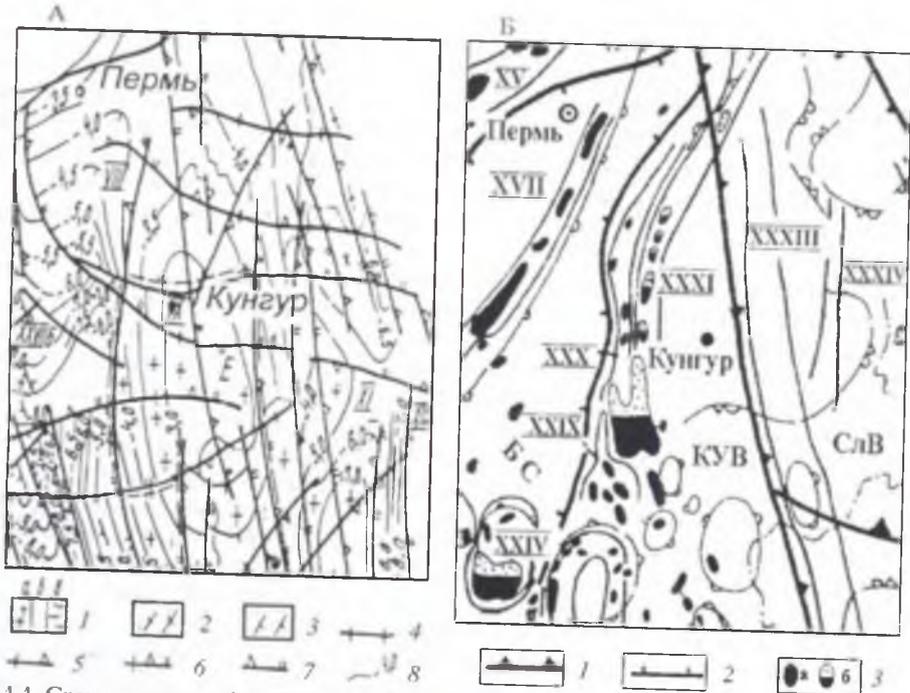


Рис. 4.4. Схема строения фундамента (А) и тектоническая схема (Б) северной части Волго-Уральской провинции [319].

А: 1 — зоны раздробления фундамента, в — бедимурского, б — карельского, в — раннебайкальского; 2 — зоны интенсивного дробления фундамента и места возможных надлигов; 3 — зоны дробления на ступенчатых зонах грабенов; 4 — системы разломов; 5 — сформировавшиеся до консолидации гранито-гнейсового фундамента; 6 — активизировавшиеся в позднем протерозое; 7 — сформировавшиеся в подвеме протерозое; 8 — активизировавшиеся в палеозое и мезозое; 9 — стратонизогипсы поверхности фундамента. Структурные элементы: VIII — Бабьинская седловина, IX — Кунгурско-Уфимский выступ, XII — Юрландско-Айский блок, XIII — Западно-Уральская зона разломов. Б: 1 — границы крупных структур, 2 — границы погребенных структур, 3 — месторождения нефти и газа. Структурные элементы: БС — Бабьинская седловина, КУВ — Кунгурско-Уфимский выступ, СЛВ — Сылвенская впадина; римские цифры — впадины и выступы.

Однако все исследователи едины в том отношении, что район Кунгурской пещеры располагается на северной оконечности Уфимского вала и представляет собой антиклинальную структуру, имеющую асимметричное строение: восточное крыло крутое и узкое, наклон  $1-3^\circ$ , западное — пологое и широкое, падение пород на западном крыле колеблется от  $0$  до  $1^\circ$ . Наблюдаемые формы их залегания связаны с эндо- и экзотектоникой и облеканием рифовых массивов.

На тектонические формы и формы облекания рифовых массивов в поле распространения гипсоангидритовых отложений накладываются карстовые дислокации, появление которых связано с растворением. В результате в гипсоангидритах и перекрывающих пластах возникают разнообразные складчатые и разрывные нарушения, образуются прогибы пластов над подземными полостями. В карбонатных пачках иренского горизонта над участками гипсов и ангидритов, которые в меньшей степени подверглись разрушению, возникают мелкие складки. Нарушения в залегании горных пород, обусловленные гидратацией ангидритов, проявляются в виде мелкой складчатости, иногда с разрывом сплошности слоев [233]. С формированием Уфимского вала связаны субвертикальные трещины с простираниями  $55^\circ$  и  $335^\circ$ . Они имеют незначительную ширину и заполнены гипсом и кальцитом. Широко развиты процессы отседания склонов. Образующиеся при этом трещины ориентированы вдоль склонов речных долин и логов, расширяясь при участии подземных вод зоны аэрации. На крутых склонах речных долин и суходолов по трещинам формируются одиночные и ступенчатые карстовые рвы. Наблюдается трещиноватость, связанная с карстовой тектоникой [80]. По данным Л. Н. Спирина [381], в районе Кунгурской пещеры пересекаются (рис. 4.5) зоны морфотрещиноватости II порядка ( $45^\circ$  и  $360^\circ$ ).

По данным В. Н. Катаева [177], карбонатно-сульфатный массив, в пределах которого расположена Кунгурская пещера, приурочен к центральной части клиновидного тектонического блока северного окончания Башкирского свода (рис. 4.6). С запада-северо-запада блок ограничен сбросо-взбросовым глубинным нарушением с падением сместителя на запад  $65-90^\circ$ . Разлом отделяет окончание Башкирского свода от Сылвенского прогиба Камско-Кинельской системы. Восточной границей блока является сбросо-взбросовое глубинное нарушение с падением сместителя на восток  $70-80^\circ$ , разделяющее Волго-Уральскую антеклизу (Русская плита) и Уфимско-Соликамскую мегавпадину (Предуральский краевой прогиб). В региональном плане разлом представляет собой границу структур третьего порядка: Пермско-Башкирского свода и Юрюзано-Сылвенской впадины. На юге блок ограничен левосторонним сдвигом широтного простирания. Разломы, ограничивающие блок, прослеживаются в фундаменте (амплитуды от  $0,5$  до  $5,0-10^3$  м) и осадочном чехле ( $0,5-2,0 \cdot 10^3$  м), что свидетельствует об их тектонической активности в течение весьма длительного периода — от протерозоя до кайнозоя.

Мезозойско-кайнозойский региональный структурно-тектонический каркас дизъюнктивов унаследован от герцинского этапа тектогенеза. Поэтому на локальном уровне ориентировка внутриблоковых нарушений сплошности отражает спектр азимутов простирания пограничных разрывных нарушений. Это косвенно подтверждается тем, что восточная окраина



Рис. 4.5. Схема морфотренированности Верхней и Средней Камы [381]  
 Зоны морфотренированности: 1 — I порядка, 2 — II и более низких порядков

Русской плиты с поздней перми до середины неогена не испытывала резких высокоамплитудных колебаний, а находилась в тектоническом режиме слабых поднятий, перемежающихся со слабыми опусканиями в среднеюрское и поздне меловое время [164], а также ориентировкой линеаментов района (см. рис. 4.6, А).

Сохраняя ориентировку пограничных разломов, дизъюнктивы карбонатно-сульфатного комплекса нижнепермских отложений распределены по площади блока неравномерно. Достаточно четко выделяются участки и зоны минимальной, средней и повышенной линейной плотности линеаментов — суммарной протяженности линеаментов на единицу площади поверхности тектонического блока в метрах (см. рис. 4.6, В). Зоны средних значений плотности линеаментов показаны изолинией  $2 \times 10^{-4}$  м ( $20 \text{ км}/100 \text{ км}^2$ ). Они пространственно совпадают с границей Уфимского свода, ограничиваясь разрывными нарушениями СВ простирания и зоной повышенной проницаемости ССЗ ориентировки, выделенной по структурным признакам. Три участка повышенной плотности линеаментов ( $3\text{--}4 \times 10^{-4}$  м, или

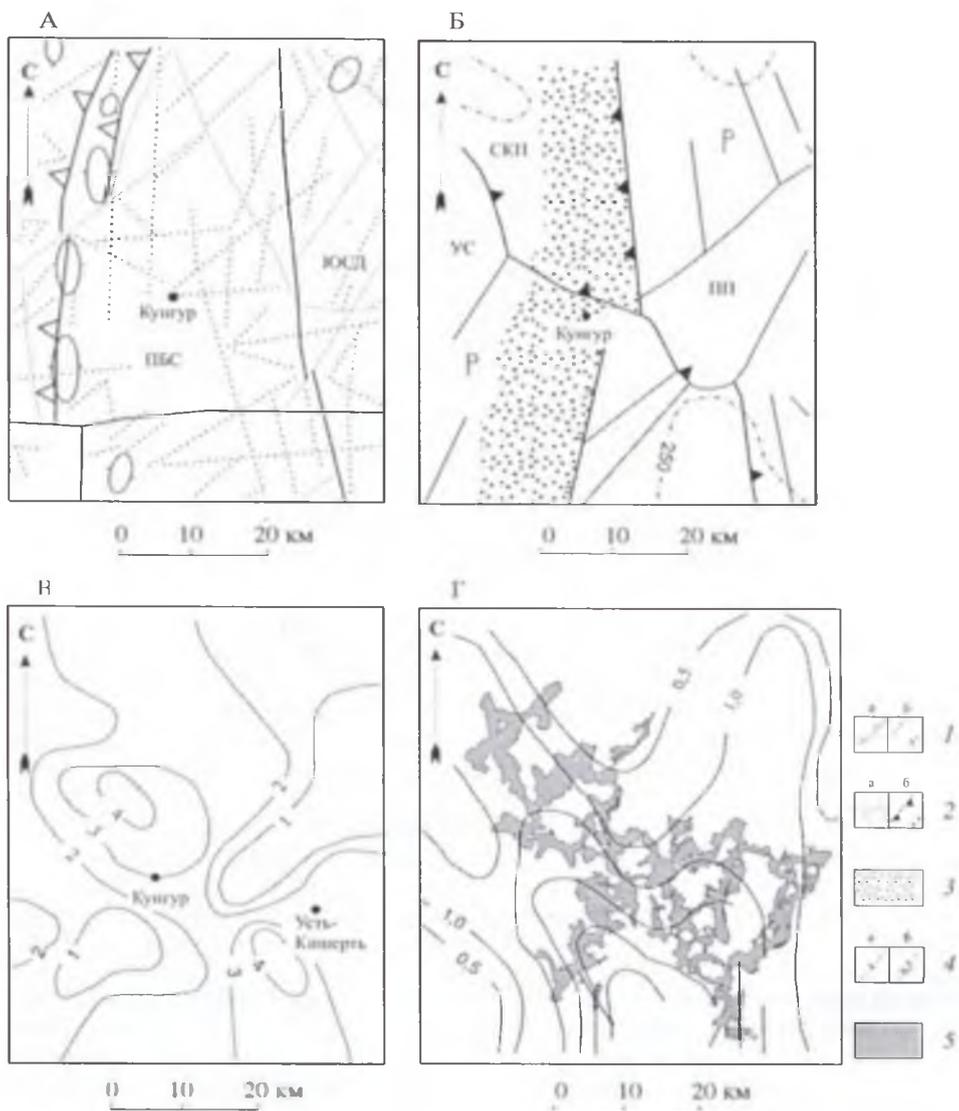


Рис. 4.6. Структурно-тектоническая ситуация Кунгурско-Кисертского района [164, 177, 341].

А — фрагмент тектонической карты со схемой линеаментов; Б — фрагмент карты новейшей тектоники; В — схема линейной плотности линеаментов; Г — схема линейной плотности тектонических трещин в гипс-ангидридах поля Кунгурской пещеры.

1 — разрывные нарушения: а — взбросы, б — сбросы и разломы невыясненной морфологии; 2а — линеаменты земной поверхности, 2б — границы мегаблоков (главных и второстепенных тектогенных форм); 3 — зона повышенной проницаемости, выделенная по структурным признакам; 4 — изолинии линейной плотности: а — линеаментов ( $1-4 \times 10^{-4}$  м, или 10-40 м/100 км<sup>2</sup>), б — тектонических трещин (0,5—3,0×10 м, или 500—3000 м/10000 км<sup>2</sup>); 5 — поле Кунгурской пещеры.

ПБС — Пермско-Башкирский свод, ЮСД — Юрюзано-Сылвенская депрессия, УС — Уфимский свод, СКП — Средне-Камский прогиб, ПП — Предуральское моноκлиально-ступенчатое поднятие; Р — районы инверсионных умеренных и слабых поднятий, проявляющихся с олигоцена (амплитуда 250—300 м)

30—40 км/100 км<sup>2</sup>) маркируют места пересечения границ главных тектонических форм рельефа (Уфимского свода, Среднекамского прогиба и Предуральского моноклинально-ступенчатого поднятия) с разнопорядковыми тектоническими разломами различной морфологии. Карбонатно-сульфатная толща на всех трех участках закарстована, но интенсивность карстопроявлений, их морфологические особенности индивидуальны, что определено наложением на пространственную структуру дизъюнктивов литологической и гидрогеологической специфики массивов. К одному из таких участков приурочены карстопроявления в районе г. Кунгура, к двум другим — Сылвенской впадины [80].

Уникальность возникновения и развития Кунгурской пещеры определяется сочетанием литологических, гидрогеологических и геоморфологических условий района в неоген-четвертичное время. Анализ его структурно-тектонического строения на региональном, локальном и блоковом морфолого-морфометрических уровнях свидетельствует о фундаментальной роли дизъюнктивов в истории формирования пещеры. Результаты исследований пещерного массива позволяют определить его как объект классического развития сульфатно-карбонатного карста слоистой толщи в условиях краевой части платформы [266].

Изучением геолого-структурных особенностей блока Ледяной горы занимались Н. И. Каракаш, А. А. Штукенберг, Н. П. Герасимов, Е. Н. Тихвинская, Б. Ф. Перевозчиков и Е. П. Дорофеев. В 30—70-е гг. было выполнено описание геологических разрезов на поверхности массива и в пещере, выявлено совпадение ориентировок “преобладающих трещин” в обнажениях пород и гротах пещеры; обнаружены экзотектонические нарушения преимущественно карстового происхождения; установлено влияние структурных, литологических и геоморфологических элементов блока на процессы гидратации и дегидратации сульфатных пород.

В 50-е гг. Б. Ф. Перевозчиков установил, что в гротах Данте, Склеп, Крестовый. Руины азимуты падения ледянопещерской пачки составляют 315—340° при углах до 22°, что говорит о наличии местных нарушений. Экзогенные процессы в пещере создали складки гидратации (гроты Колизей, Руины и Дружбы Народов). В гроте Метеорный в стенах развития карстовая брекчия. В девяти гротах пещеры было замерено 107 трещин, из которых большинство (48,6 %) имеет средний азимут 45—55° и почти перпендикулярный ему азимут 335—345° (19,5 %). Они квалифицированы как трещины сжатия (скалывание при боковом давлении, поверхности ровные, иногда со штрихами) и растяжения (поверхность неровная). Их направление совпадает с простираемостью структуры Ледяной горы и контролирует простираемостью ходов пещеры. Большинство трещин имеет малую ширину (0,3—2,0 см), обычно они заполнены гипсом или глиной.

Б. Ф. Перевозчиков считал, что в пределах пещеры по подошве неволинской пачки имеется брахисинклинальная структура с амплитудой до 10 м, вытянутая в ССВ направлении. Ее юго-восточное крыло более крутое, чем северо-западное, но углы падения крыльев не превышают 1°45'. С ядром брахисинклинали совпадают гроты Великан, Вышка, Длинный, Дружбы Народов, Лукина, Романтиков. Ближняя и Дальняя части пещеры находятся на ее юго-восточном и северо-западном крыльях.

В. Н. Катаев [176—178] выделяет в районе Кунгурской пещеры различные пликативные и дизъюнктивные дислокации.

Пликативные дислокации представлены литогенетическими, гравитационными, гидратационными и гравитационно-гидратационными трещинами.

*Литогенетические трещины* представлены единичными наращениями или зонами микротрещин. Их образование связано с режимом осадконакопления, подчиненного региональной периодичности поступления в бассейн обломочного и растворенного материала. Четко прослеживаются в ледянопещерской (между слоями 1—4) и в неволинской (слой 7) пачках. Раскрытость составляет 1—5 см, обычно заполнены глинисто-доломитовыми отложениями. Широкие трещины имеют рыхлый, переувлажненный кальцитово-глинисто-доломитовый заполнитель, иногда выделяемый в отдельный прослой. В подошве и кровле ледянопещерской, а также в неволинской пачке трещины напластования заполнены волокнистым гипсом. Зоны микротрещин преимущественно ориентированы параллельно напластованиям или разбивают прослой вкрест простирания, формируя комковатые отдельности. В зависимости от положения слоя в разрезе и его состава поперечник отдельностей варьирует от 1 до 15 см: ангидритовые — 1—1,5 см, гипсовые — 2—2,5 см (слои 1 и 2), а гипсовый слой 5 — до 10 см и даже 15 см. Ширина зон микротрещин составляет 1—2 см, а раскрытость — 1—1,5 мм. Микротрещины заполнены глинисто-доломитовыми отложениями.

*Гравитационные трещины* связаны с дислокациями отслаивания и изгиба в сводах и плоских потолках обвальных гротов; гравитационному изгибу подвержены толстослоистые гипс-ангидриты (слой 1, развилка у грота Данте).

*Гидратационные трещины* распространены в ледянопещерской пачке, преимущественно в центральной части пещеры, и обычно приурочены к целикам (южная стена грота Длинный).

*Гравитационно-гидратационные трещины* характерны для периферийных залов южного (присклонового) района.

Дизъюнктивные дислокации представлены тектоническими, гидратационными и гравитационными трещинами.

*Тектонические трещины* отличает системность, позволяющая проводить количественный анализ их распределения в блоке [417] и пространственную привязку элементов пещерного поля к зонам аномальных сгущений трещин [342]. Широко представлены в слоях ледянопещерской пачки.

Исследования раскрытости, степени заполненности, зональности распределения, элементов ориентировки трещин позволили выделить в массиве две сопряженные ортогональные системы: I — 30—60° и 300—330°; II — 0—30° и 270—300°. Трещины могут быть зияющими и заполненными вторичным гипсом или глинисто-доломитовым материалом. Ширина трещин 0,5—1,0 мм, иногда они фрагментарно расширены растворением до 1—3 см. Встречаются кулисообразные, а также оперяющие трещины типа “конский хвост” (грот Вышка). Тектонические трещины, как правило, субвертикальны, но известны и трещины с углами падения 65—80° на северо-восток, северо-запад и юго-запад.

Схема линейной плотности тектонических трещин ледянопещерской пачки дает представление о распределении основных ходов и гротов цент-

рального, южного и восточного районов пещеры относительно поля тектонических дизъюнктивов (см. рис. 4.6). Участки, слабо раздробленные тектоническими трещинами, ограничены изолиниями  $L_T = 75$  м (общая длина тектонических трещин на  $500 \text{ м}^2$  поверхности массива) и  $K_T = 5$  (количество пересечений трещин на  $500 \text{ м}^2$  поверхности массива) и слабо закарстованы. На них встречаются лишь отдельные небольшие карстовые воронки. Участки со средней раздробленностью ограничены изолиниями  $L_T = 75—125$  м и  $K_T = 5—15$ . В районе Кунгурской пещеры таких участков два шириной  $150—300$  м: один из них имеет СВ, другой — СЗ простирание, и именно по ним заложены линейные пещерные ходы. Встречающиеся на средне-раздробленных участках слаботрещиноватые зоны образуют незакарстованные целики, разделенные пещерными ходами.

На месте пересечения двух средне-раздробленных участков располагаются участки, сильно раздробленные тектоническими трещинами. Показатель  $L_T$  увеличивается от  $150$  до  $250$  м, а  $K_T$  — от  $15$  до  $20$ . К ним приурочены наиболее развитые пещерные галереи, а на поверхности — большое количество провалов.

Анализ элементов поля свидетельствует о том, что пещера приурочена к узлу трещинной тектоники — участку пересечения зон трещиноватости СВ—ЮЗ, СЗ—ЮВ и меридиональной ориентировок; гроты и галереи пещеры проработаны в пределах зон и участков повышенной линейной плотности тектонических трещин ( $300—600$  м на  $2500 \text{ м}^2$ ), целиковые участки соответствуют низким значениям линейной плотности тектонических трещин (менее  $200 \text{ м}/2500 \text{ м}^2$ ); южный, восточный и часть центрального района (по линии гротов Вышка — Атлантида — Эфирный) контролируются зоной СВ, центральный район (к западу от гротов Вышка — Эфирный) — зонами ориентировки СЗ—ЮВ и СЮ.

Тектоническая трещиноватость нижних слоев ледянопещерской пачки иная по сравнению с ее средними и верхними слоями. В более жестких ангидритовых слоях зоны тектонических трещин выражены четче, трещины часто не имеют заполнителя, а ширина зон варьирует в пределах  $10—25$  м. Трещинные зоны в средних и верхних гипсовых слоях разреза более широкие ( $100$  м и более). Пространственно трещинные зоны нижних слоев ориентированы вкрест простирания трещинных зон средних и верхних слоев пачки. Выявленная в Кунгурской пещере этажность зон тектонических трещин характерна для толщ, сложенных слоями различной механической прочности. Отсутствие пространственного совпадения ориентировок трещинных зон в слоях разреза позволило В. Н. Катаеву [177] говорить об этапности эволюции трещинной структуры массива.

В геолого-тектонической эволюции территории Предуралья в плейстоцене и плейстоцене выделяются две инверсионные фазы регионального уровня, которым по времени заложения соответствуют системы тектонических трещин блока Ледяная гора. Для них характерно изменение направлений тектонического стресса, о чем свидетельствует смещение ориентировок систем трещин по часовой стрелке на  $25—30^\circ$ . Изменение ориентировок стресса отразилось и в формировании двух ортогональных (широтного-меридиональных и диагональных) систем разломов, а также левых сдвигов по широтным и правых по диагональным разломам, наложенным на широтные и меридиональные.

Принимая во внимание особенности позднемезозойско-кайнозойской геолого-тектонической истории Приуралья, В. Н. Катаев [178] выделяет следующие основные этапы эволюции структурных элементов блока:

1-й этап соответствует инверсионной фазе, восстановившей позднепалеозойско-мезозойскую трещиноватость (система I), а по времени — олигоцен-плиоценовым эпейрогеническим поднятиям большой амплитуды. Фаза имела кульминацию на рубеже миоцена и плиоцена (альпийский цикл тектогенеза). О малоамплитудных горизонтальных подвижках в блоке свидетельствует наличие круто ( $70—75^\circ$ ) падающих на северо-восток и северо-запад трещин.

2-й этап связан с постинверсионной (преакчагыльской) и акчагыльской фазами растяжения. Режим локального сжатия в центральных частях тектонического блока и разгрузки напряжений по его периферии способствовал обрушению сводов древних карстовых полостей, их заполнению крупнообломочным материалом, формированию обвально-карстовых отложений.

3-й этап соответствует инверсионной фазе четвертичного периода. Стрессовые воздействия со стороны региональных разломов, ограничивающих тектонический блок, в сочетании с дифференцированным развитием элементов тектогенных форм рельефа обусловили динамичное чередование стадий внутриблоковых “нагрузок” и “разгрузок” напряжений, что вывело его из состояния статического равновесия. Стадийная смена тектонических режимов с последовательным увеличением продолжительности стадий “нагрузки” обеспечила накопление напряжений вдоль существовавших литологических, дизъюнктивных и иных структурных границ. На этом этапе была сформирована новая система тектонических трещин (система II), а трещины плиоценовой карстовой эпохи были существенно обновлены. Интенсивность тектонических движений этапа была значительно ниже по сравнению с плиоценовой инверсией, что нашло отражение в уменьшении амплитуды колебательных движений и представительности (численность, раскрытость) трещин системы II.

Сульфатные породы Приуралья в мезозое-кайнозое неоднократно испытывали переход гипс-ангидрит-гипс, погружения, поднятия, перекристаллизацию и пр., что повысило их степень блочности, а трещины приобрели равномерно-проницаемый характер. По мнению В. Н. Андрейчука [21], именно поэтому здесь нет лабиринтов, подобных украинским.

Трещины *гидратационного сжатия и релаксации* представлены в ледянонечерской пачке. Образование этого вида трещин в пластах и линзах ангидритового и гипсоангидритового состава связано с гидратационным сжатием со стороны вмещающих гипсов, расположенных выше и ниже по разрезу, а также замещающих гипсы по латерали. Конфигурация и характер взаимного расположения трещин позволяют предполагать превалирование стресса субвертикальной ориентировки.

Гидратационные трещины имеют веретенообразную или серповидную форму, их протяженность в плоскости стен — 30—50 см. За счет выщелачивания пород раскрытость колеблется от 3 до 5 см. Глубина проникновения раскрытых трещин в массив составляет до 10 см, глубже они смыкаются и имеют волосистое раскрытие или заполняются молочно-белым гипсом. В пластовых гипсоангидритах эти трещины часто сопряжены друг с

другом под углами, близкими к  $45^\circ$ , и образуют диагональные относительно кровли и подошвы пласта системы (гроты Атлантида, Великан, Вышка, Геологов, Романтиков). В линзообразных телах небольших размеров такие трещины ориентированы субперпендикулярно кровле и подошве, без взаимного пересечения.

*Гравитационные трещины* субпараллельны поверхности стен и перпендикулярны поверхностям напластования. Длина их достигает 50 см, раскрытость — 20 см. Как правило, они зияющие. По трещинам отделяются плоские или выпуклые в сторону грота скорлуповидные блоки толщиной до 40 см (гроты Вышка, Геологов и др.). Этот вид трещин обусловлен сжатием пласта и эффектом разгрузки напряжений в краевой части межтрещинных блоков после образования полостей. Распространены они в пределах одного слоя и не пересекают поверхностей напластования. В случае достаточно мощного (2—3 см) пласта тяготеют к его средней или прикровельной части. Тонкие пласты трещины пересекают пласт от кровли до подошвы. В пещере имеются гравитационные нарушения естественной (перераспределение напряжений в блоках пород в результате горных ударов и обвалов) или техногенной (взрывы в пещере и карьерах) природы. Смещения межтрещинных блоков по внутрислойным трещинам с глинистым заполнителем наблюдаются в ряде мест, однако для установления причин их возникновения необходимы длительные наблюдения [375, 376].

#### 4.3. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОПИСАНИЯ РАЙОНА КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ

Первые описания геологических разрезов в гротах Кунгурской пещеры выполнены в конце XIX — начале XX в. [172, 184, 395, 402, 403] и представляют в основном исторический интерес. В 1956 г. специальные описания разрезов выполнил Б. Ф. Перевозчиков, в 1965—1970 гг. — Е. В. Дорофеев [113, 115, 118], а в 90-е гг. — В. Н. Катаев [176]. Геологические разрезы через Ледяную гору в 1971 г. построили сотрудники Кунгурского стационара Ю. А. Ежов и Н. Т. Митрофанов, для чего было использовано около 20 скважин. В 2001 г. весь фактический материал, накопленный в 80—90-е гг. (более 4 тыс. скважин), был сведен в группы, каждая из которых обработана отдельно. Это позволило устранить случайные ошибки [207].

На итоговой карте сохранены 23 опорные скважины, несущие наиболее полную информацию о геологическом разрезе каждого из участков. Кроме того, построена серия субширотных и субмеридианальных геологических профилей на территории г. Кунгура. Расположение опорных скважин и направление трех геологических профилей в районе Кунгурской Ледяной пещеры представлены на рис. 4.7. На всех профилях прослеживается переруглубленная долина р. Сылвы с максимальными врезами до абсолютной отметки 80 м. В долине р. Шаквы гипсо-ангидритовая толща размыта полностью, и долина на 30 м врезана в подстилающую толщу филипповских известняков и доломитов. Этот врез заполнен карстовой брекчией (рис. 4.8). Аналогичные размывы выявляются в долинах рек Ирени и Сылвы. Они достигают отметок 60—70 м; на профилях видны широкие (до 2,5 км) палеодолины, выполненные неоген-четвертичными карстовыми брекчиями

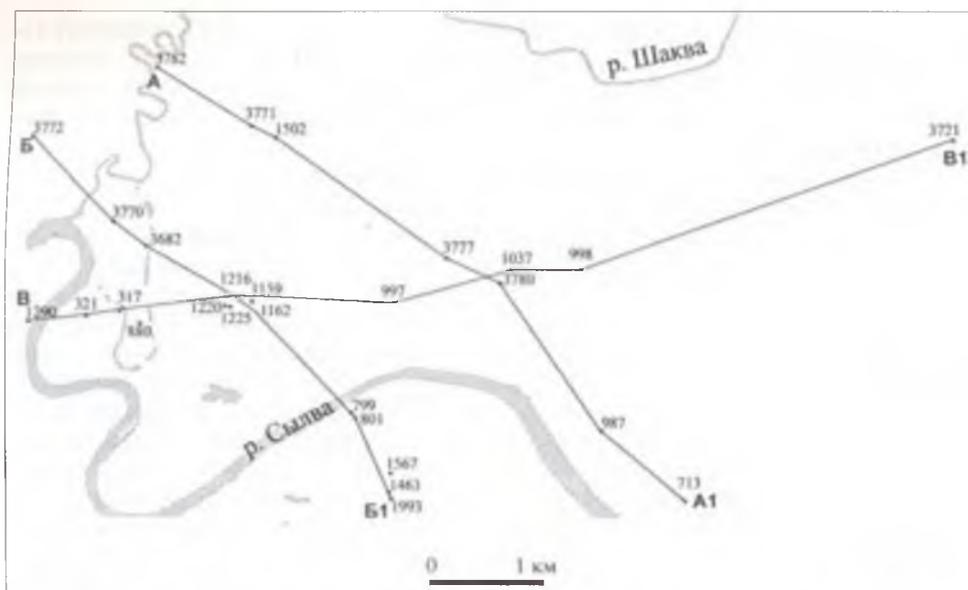


Рис. 4.7. Расположение опорных скважин и направления геологических профилей

и четвертичными аллювиальными отложениями. Последние представляют собой продукт меандрирующих потоков, вложенных в более древние речные долины, заполненные рыхлым материалом. Речные долины полностью прорезают гипсо-ангидритовую толщу и врезаются в подстилающие филипповские известняки и доломиты, из которых происходит питание их грунтовых вод.

На профилях фиксируются те же переуглубления, кроме того, четко видно, что неоген-четвертичные карстовые брекчии занимают две геоморфологические позиции: одни из них располагаются на водоразделах (отметки 130—180 м), другие — в долинах рек (отметки 80—100 м). Первые ложатся на разрушенную поверхность гипсо-ангидритовых отложений, имеющую сложные контуры, вторые — на филипповские известняки и доломиты. К сожалению, документация скважин не позволяет выполнить более детальное расчленение разреза неоген-четвертичных и, особенно, четвертичных отложений. По характеру разрезов можно лишь предположить, что в кинельско-акчагыльское время ( $N_2^2$ ) здесь наблюдался глубокий врез ПалеоСылвы, с которым связаны формирование карстовых брекчий в долинах рек, активные карстовые процессы на водоразделах, образование крупных полостей и обвальные процессы в них. Во время  $N_2^3$  эти врезы были полностью заполнены аллювиальными отложениями, обвальные отложения в полостях литифицировались, превратились в карстовую брекчию. Новый цикл врезания происходил с формированием уступов V—IV цокольных и III—I вложенных аккумулятивных террас. На водоразделах продолжалось формирование карстовых брекчий, а в глубине массива образовалась Кунгурская пещера. Более детально история ее развития будет рассмотрена в специальном разделе.

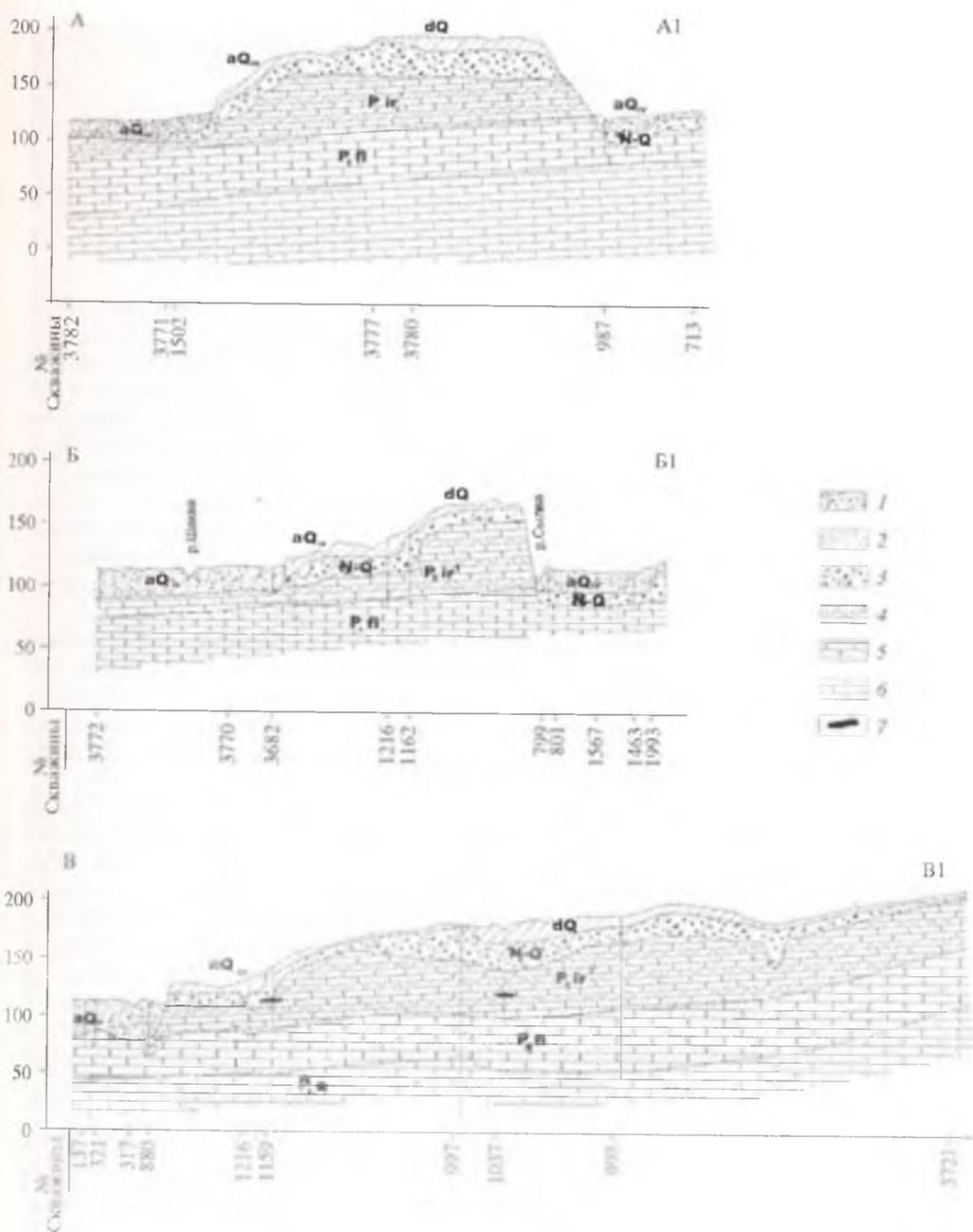


Рис. 4.8. Геологические профили по линиям А—А1, Б—Б1, В—В1.

1 — гравийно-галечниковые отложения с заполнителем; 2 — суглинок; 3 — карстово-обваловые отложения с заполнителем; 4 — переслаивание гипсангидрита с доломитом; 5 — доломит; 6 — известняк; 7 — полость, вскрытая скважиной

## Глава 5

# ГИДРОГЕОЛОГИЯ

Район Кунгурской пещеры входит в провинцию подземных вод восточной окраины Восточно-Европейской платформы и относится к гидрогеологической области карстовых вод Уфимского плато [71, 425]. На прилегающем к пещере участке подземные воды приурочены к четвертичным аллювиальным песчано-галечным и суглинистым отложениям, иренским карбонатно-сульфатным и артинско-филлиповским карбонатным образованиям пермского возраста (рис. 5.1). Отсутствие региональных водоупоров, а также взаимно перпендикулярная система трещин, пересекающих массив, способствуют их гидравлической связи. Различный литологический состав водовмещающих пород обуславливает разную гидродинамику и химический состав как грунтовых, так и карстовых вод, что позволяет выделить несколько гидрогеологических подразделений.

**Водоносный верхнечетвертично-современный аллювиальный горизонт** приурочен к песчано-гравийно-галечниковым отложениям поймы и частично первой надпойменной террасе рек Сылвы и Шаквы. Наиболее крупный материал слагает нижнюю часть разреза. Зона аэрации сложена в основном суглинками, местами переходящими в песчаные глины. Питание горизонта атмосферное. Режим преречный.

Глубина залегания подошвы водоносного горизонта в зависимости от гипсометрического положения дневной поверхности, глубины аллювиального вреза и карстовых процессов колеблется от 10—15 м до 20—36 м. Наибольшие глубины прослеживаются на правобережье р. Сылвы, к западу от Ледяной горы (скв. 742 и 300). Абсолютные отметки подошвы находятся в пределах 80—110 м. Мощность горизонта от 5—10 до 18—25 м. Меженный уровень подземных вод устанавливается на глубинах 0,5—3,0 — 7—10 м (близ пещеры 5,5 м), паводковый — от 0 до 6 м (у пещеры 3—3,5 м).

По данным геолого-съемочных работ [425], дебиты скважин достигают 1,6—8,3 л/с при понижениях уровня на 0,5—6,0 м. Коэффициенты фильт-

Рис. 5.1. Гидрогеологическая схема района Кунгурской пещеры.

Гидрогеологические подразделения: 1 — водоносный верхнечетвертично-современный аллювиальный горизонт; 2 — слабодоносный верхнечетвертичный аллювиальный горизонт; 3 — контур распространения водопроницаемого периодически водоносного, местами слабодоносного верхнечетвертичного аллювиального горизонта; 4 — контур распространения неводоносного проницаемого верхнечетвертичного аллювиального горизонта; 5 — водоносная неравномерно обводненная иренская карбонатно-сульфатная серия; 6 — артинско-филлиповская водоносная серия.

Границы подразделений: 7 — определенные, 8 — предполагаемые.

Показатели водообмена: 9 — направление движения подземных вод; 10 — гидроизогипсы; 11 — участок интенсивной инфильтрации и инфлюации атмосферных осадков; 12 — участок повышения уровня и изменения химического состава подземных вод под влиянием инфильтрации с поверхности техногенных вод.

Водопункты: 13 — скважина и ее номер по каталогу.

Химический тип воды: 14 — гидрокарбонатный (ГК); 15 — сульфатный кальциевый (СК); 16 — сульфатно-гидрокарбонатный кальциевый (СГК); 17 — сульфатно-хлоридный натриево-кальциевый (СХНК); 18 — гидрокарбонатно-сульфатный магниско-кальциевый (ГСМК); 19 — смешанный.

Разное: 20 — реки, озера и заболоченные участки; 21 — гидрогеологические разрезы; 22 — дороги



- 1 2 3 4 P.IV 5 P.II 6 7 8 9 10 11
- 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22

рации водовмещающих пород составляют 6—13 м/сут. Благодаря покровным суглинкам напор воды в скважинах часто слабый, их общая минерализация над филипповскими карбонатными отложениями колеблется от 0,2 до 1,3 г/дм<sup>3</sup>, а над ангидритами и гипсами повышается до 1,5—2,8 г/дм<sup>3</sup>. Химический состав пестрый. В районе с. Филипповка и выше по течению р. Сылвы преобладают карбонатные и сульфатно-карбонатные кальциевые воды. В пределах г. Кунгура пестрота химического состава отражает не только связь с водами подстилающих иренских отложений, обогащенных сульфатами, но и техногенное загрязнение.

**Слабоводоносный верхнечетвертичный аллювиальный горизонт** формируется в северо-восточной части города и вдоль Плехановского тракта в покровных, преимущественно глинистых отложениях I надпойменной террасы. Глубина его залегания 0,1—3,0 м, мощность не более 2—5 м.

**Водопроницаемый периодически водоносный, местами слабоводоносный верхнечетвертичный аллювиальный горизонт** распространен в северо-восточной части города, сложенной песками, гравийно-галечными отложениями, супесями, суглинками мощностью 12—15 м. Водоносным бывает в период паводкового подъема уровня на глубине 8—12 м (абс. отм. 115—118 м).

**Неводоносный проницаемый верхнечетвертичный аллювиальный горизонт** представлен суглинками, песками и галечниками II надпойменной террасы. Глубина подошвы горизонта 5—20 м (абс. отм. 130 м).

**Водоносная неравномерно обводненная иренская карбонатно-сульфатная серия** сложена пластами гипса и ангидрита мощностью до 20 м, чередующихся с пропластками доломитов и известняков мощностью до 10 м. На поверхность выходит на северном окончании Пермско-Уфимского свода, слагая водораздельные пространства. Обводненность пород спорадическая. Часты изолированные подземные водотоки. Водообильность пестрая, состав воды преимущественно сульфатный кальциевый с минерализацией до 3,0 г/дм<sup>3</sup>. По условиям формирования карстовых вод массив Ледяной горы относится к придолинному гидродинамическому типу. Подземные воды имеют три источника питания: конденсационно-инфильтрационное, инфлюационное (водами р. Сылвы) и подземное (за счет подтока из карбонатных пород филипповского горизонта). По характеру движения воды в массиве выделяются зоны вертикальной, переходной и горизонтальной циркуляции карстовых вод [260].

*Зона вертикальной циркуляции.* Ее мощность достигает 85 м. Воды представлены атмосферными осадками, фильтрующимися через рыхлые неоген-четвертичные и коренные отложения, и конденсационной влагой, образующейся на стенках трещин и пустот. Скорость движения воды зависит от фильтрационных свойств покровных отложений и заполнителя карстовых каналов. Различные скорости движения карстовых вод обуславливают их неодинаковую минерализацию, что хорошо фиксируется по наблюдениям за каплей в Кунгурской пещере. Очаговому инфилтратационному питанию благоприятствуют многочисленные карстовые воронки на Ледяной горе, в которых зимой накапливается метелевый снег. В зимнее время эта зона бедна водой. Преобладают процессы испарения воды с поверхности подземных озер и ее конденсации на нижней поверхности промерзшей толщи пород (местный круговорот влаги). Состав воды сульфат-

ный кальциевый, общая минерализация в течение года колеблется от 1,8 до 2,5 г/дм<sup>3</sup>, незначительно понижаясь в весеннее время. Основное насыщение воды сульфатом кальция происходит до зоны горизонтальной циркуляции. Таким образом, большую часть коррозионной работы просачивающиеся и конденсационные воды производят до вступления в водоносный горизонт.

*Зона горизонтальной циркуляции воды* формируется в трещинах и карстовых полостях монолитных ангидритов ледянопещерской пачки на контакте с филипповскими доломитами. Местами подземные воды вскрыты полостями и питают подземно-проточные озера; некоторые озера непроточны, по высотному положению и режиму имеют полуподвешенный характер. Для них также характерен сульфатный кальциевый состав с минерализацией 1,8—2,3 г/дм<sup>3</sup>.

*Зона переходной циркуляции воды.* Ее мощность колеблется от 1 до 5 м, а максимальная наблюдается в весеннее время за счет интенсивного просачивания талых вод и поступления вод р. Сылвы в массив Ледяной горы. Воды этой зоны оказывают не только химическое, но и физическое воздействие на водовмещающие породы.

В межень уровень карстовых вод снижается от пещеры к реке, и уклон в среднем составляет 0,6 м/км (0,0006), в паводки, а иногда и в летнюю межень уровень воды в р. Сылве становится выше уровня подземных озер, а уклон достигает 3 м/км (0,0030). Во время установившейся межени, когда депрессионная поверхность подземных вод выположена, даже незначительный подъем уровня воды в реке (до 0,5 м) вызывает интрузию речных вод в массив Ледяной горы [98, 127]. Поглощение речных и разгрузка карстовых вод осуществляются широким фронтом через донные отложения реки. Первая надпойменная терраса, примыкающая к крутому склону Ледяной горы и сложенная суглинками, обладающая меньшим коэффициентом фильтрации, чем трещиноватые и закарстованные породы, служит относительным барражом. Существенные изменения в условиях питания водоносного горизонта Ледяной горы произошли после сооружения дамбы вдоль правого берега р. Сылвы.

**Артиноско-филипповская водоносная серия.** Этот водоносный горизонт слагают филипповская свита кунгурского яруса и артинский ярус, развитые в пределах платформы и представленные доломитами и доломитизированными известняками. Мощность горизонта превышает 250 м. В бассейнах рек Сылвы и Шаквы в районе г. Кунгура он выходит на поверхность, а к западу от линии сел Филипповка — Орда погружается под иренские гипсоангидритовые отложения. Глубина залегания подземных вод соответствует положению базисов эрозии и карста (10—150 м). Водообильность горизонта зависит от степени трещиноватости и закарстованности. Северная часть Уфимского вала обводнена довольно равномерно, и подземные потоки, дающие начало крупным источникам, здесь редки. В районе Кунгура горизонт вскрыт скважинами с удельными дебитами, в зависимости от расстояния до рек, от 0,2 до 20 л/с [425].

Питание этого водоносного горизонта в районе пещеры носит смешанный характер. Большую часть года он питается за счет транзитных вод, приходящих со стороны водораздела, и вод зоны вертикальной циркуляции. Как те, так и другие к моменту вступления в пещеру почти полностью насыщены сульфатом кальция. Общая минерализация этих вод в межень

ный период достигает 2—2,5 г/дм<sup>3</sup>, содержание иона SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> колеблется от 1300 до 1500 мг/дм<sup>3</sup>. При подъеме уровня воды в р. Сылве карстовые воды получают дополнительное питание. При этом они разбавляются речной водой и приобретают большую емкость растворения. Очень пологое падение подземных вод в сторону реки благоприятствует вторжению речных вод в пещеру во время паводков и обуславливает боковое разрушение коренных пород.

В иренских гипсах и ангидритах одним из источников питания карстовых вод считаются подземные воды, поступающие из филипповских известняков и доломитов. Относительно слабо минерализованные, они при вступлении в гипсы и ангидриты интенсивно растворяют их в зоне горизонтальной циркуляции. По водопроницаемости пород и максимально возможному понижению уровней г. Кунгур располагается на стыке двух районов — западного практически бесперспективного и восточного с водопроницаемостью 100—200 м<sup>2</sup>/сут при понижениях 30—40 м [422]. Модули эксплуатационных ресурсов пресных и минерализованных вод района г. Кунгура составляют 1—2 л/(с км<sup>2</sup>), а пресных вод — 0,5—1,0 л/(с км<sup>2</sup>) [423].

## Глава 6

# ГЕОМОРФОЛОГИЯ

Район г. Кунгура располагается в пределах *ландшафтной страны* Русская равнина, *области* Высокое Заволжье [307]. В геоморфологическом отношении район Кунгурской пещеры относится к северной суженной оконечности Уфимского плато [48], представляющего собой платообразную возвышенность, в морфоструктурном — находится на стыке двух структур I порядка: Уфимского морфосвода и Предуральяского сложного морфоподнятия [382]. Здесь развит III ярус рельефа (плоская аккумулятивно-денудационная равнина с высотами 180—220 м), а в долинах рек — I ярус (низменность с высотами 80—100 м). Суммарная расчлененность рельефа района составляет 0,06—0,08 [4].

В районе Кунгура Уфимское плато глубоко расчленено долинами рек Ирени, Сылвы и Шаквы, в междуречье последних на северо-восточной окраине г. Кунгура располагается платообразный массив Ледяной горы, сложенный карбонатно-сульфатными породами. Площадь массива около 10 км<sup>2</sup>.

Изученная часть Кунгурской пещеры располагается на юго-востоке Ледяной горы, между Полетаевским меандром Шаквы и долиной Сылвы. В настоящее время меженный урез Шаквы на 5 м выше уреза воды в Сылве. В наиболее узкой части Ледяной горы расстояние между этими реками равно 2,6 км. Длина широтно ориентированной части меандра Шаквы составляет 2,5 км. Такую же длину имеет закарстованный участок берега Сылвы, однако он как бы “сдвинут” к западу, располагаясь на продолжении отрезков долины Шаквы, имеющих простирание 30—40°. Сухие лога на склонах Ледяной горы и долины Сылвы и Шаквы в ее окрестностях заложены по преобладающим направлениям 30—60° (50 % по длине) и 310—340° (30 %). Наиболее крупные лога на северном склоне Ледяной горы (Коржунихин и др.) имеют простирание 20—200°, а на южном (Князий, Медвежий) — 50—60°.

Карстовый рельеф Ледяной горы отличается разнообразием форм. В близком соседстве здесь располагаются береговые скалы и карстовые озера, карстовые рвы, глубокие ниши, карстовые воронки и провалы (рис. 6.1).

Наиболее распространенная форма рельефа — *карстовые впадины* различных размеров и формы. Здесь их насчитывается свыше 3000 [115]. Большинство составляют карстовые воронки (60 %), чашеобразные впадины (24 %) и блюдца (10 %), реже встречаются рвы и колодцы по трещинам оседания (5 %), котловины (1 %). Наиболее распространены полигенетичные формы, в образовании которых участвовали карстовые, гравитационные и суффозионные процессы.

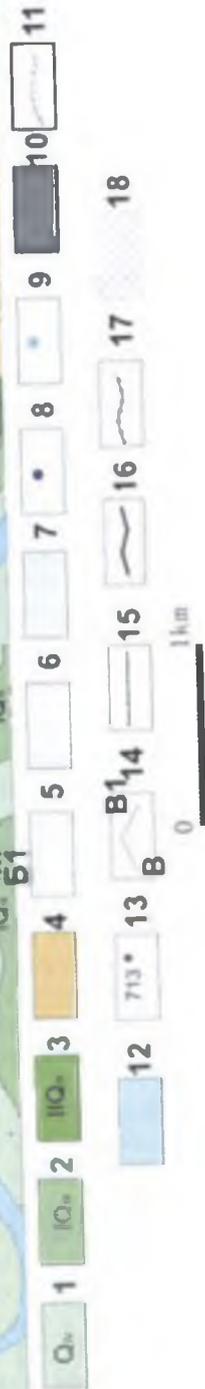
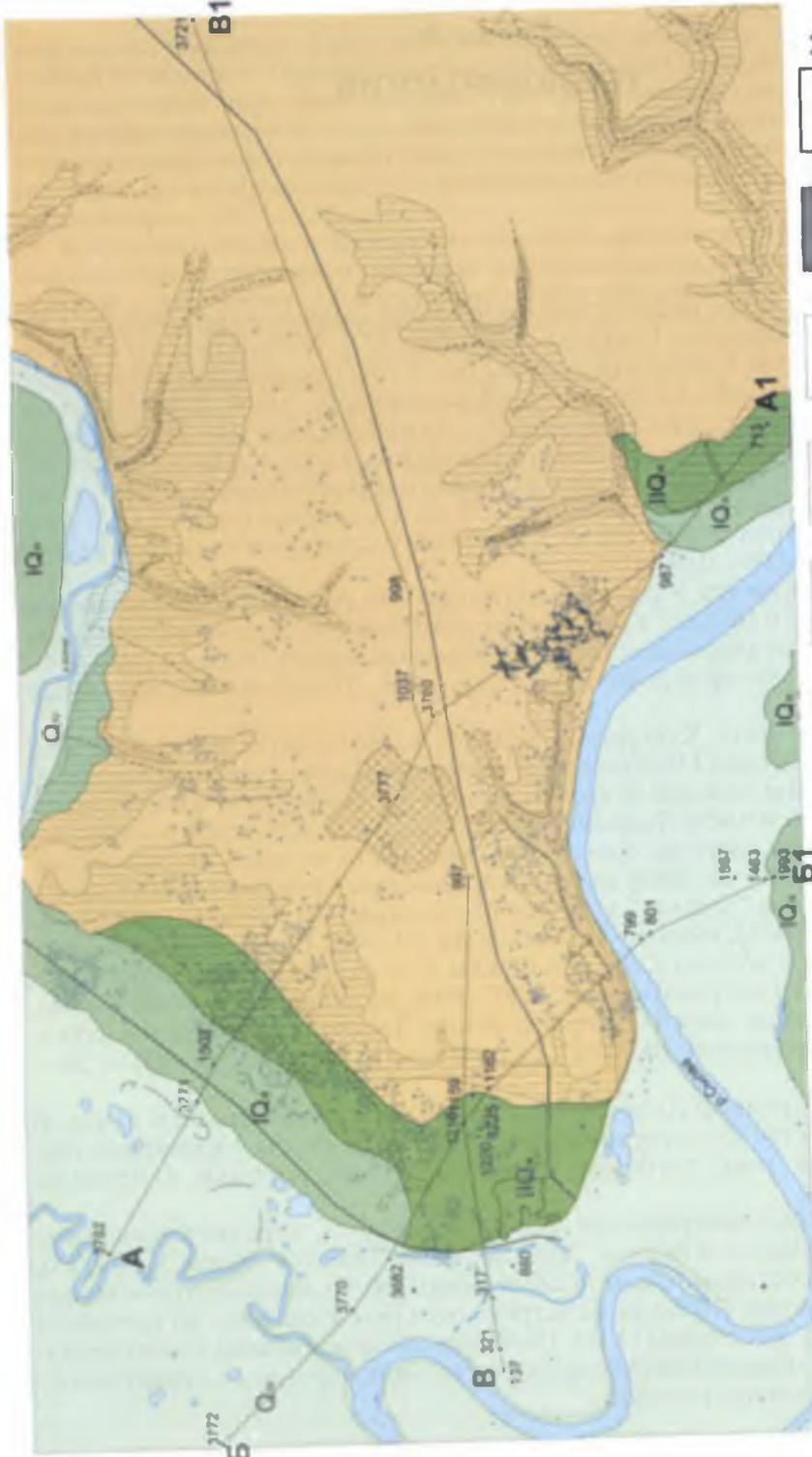


Рис. 6.1. Геоморфологическая карта района Кунгурской Ледяной пещеры.

1—3 — аккумулятивный рельеф: 1 — современная аллювиальная слабонаклонная равнина ( $Q_{IV}$ ) низкой и высокой поймы рек Сылвы и Шаквы (4—12 м над межениным уровнем вод), 2 — верхнечетвертичная аллювиальная пологонаклонная I надпойменная терраса ( $IQ_{III}$ ), сильноденудированная со слабовыраженной бровкой (15—25 м), 3 — верхнечетвертичная аллювиальная пологонаклонная II надпойменная терраса ( $IIQ_{III}$ , 30—40 м); 4 — денудационный рельеф: плиоцен-четвертичная платообразная возвышенность северо-западной оконечности Уфимского плато (до 100 м); 5—7 — склоны с уклоном: 5 — от 5° до 15°, 6 — от 15° до 25°, 7 — более 25°; 8—18 — карстовые проявления: 8 — карстовые воронки, 9 — карстовые провалы (размер значка зависит от величины провала), 10 — контур Кунгурской Ледяной пещеры; 11 — тальвег суходола; 12 — реки и озера; 13 — скважины и их номера; 14 — геологические разрезы; 15 — прирусловые дамбы; 16 — дороги; 17 — насыпи, отвалы, карьеры; 18 — свалка

Плотность распределения поверхностных форм на Ледяной горе различна: в террасово-водораздельной зоне — их менее 200, в склоновой — 200—300, в прибровочной — более 500 шт/км<sup>2</sup>. Наиболее закарстован участок урочища Байдарашки на северо-западной окраине горы — 1000 карстовых воронок на 1 км<sup>2</sup>. К северу от известной части Кунгурской пещеры в связи с большой мощностью покровных отложений плотность поверхностных карстовых форм невелика. Карстовые воронки продолжают активно развиваться и в настоящее время. По данным наблюдений стационара, в 1962—1976 гг. прирост их объемов составляет от 1—2 м<sup>3</sup>/год (воронки на террасах и склонах Ледяной горы) до 30 м<sup>3</sup>/год (дно суходолов). В террасово-водораздельной зоне преобладают мелкие впадины, часто с признаками периодической активизации. Формы встречаются чаще группами. Нередки здесь старые, блюдцеобразные, заболоченные впадины (см. рис. 6.1). В прибровочной зоне отмечена концентрация карстовых впадин, обусловленная широким развитием трещин разгрузки, значительной раздробленностью пород трещинами выветривания, сносом покровных образований и обнажением сульфатных пород; здесь преобладают небольшие, обычно хаотично расположенные формы. В склоновой зоне впадины отличаются сравнительно крупными размерами. Над пещерой преобладают воронки с поперечниками 10—30 м и глубиной 4—10 м, самые крупные достигают 60 м в диаметре и 13 м в глубину. Большинство воронок обособлено, их расположение беспорядочное.

Вторая по частоте встречаемости форма рельефа на Ледяной горе — провалы. В 40—80 гг. XX в. их зафиксировано 234 [115]. Наиболее крупный провал (в поперечнике 10 м, а в глубину, судя по провалившейся березе, не менее 6—8 м) произошел в 1943 г. Внезапное обрушение земли вызвало небольшое землетрясение, по озерку соседней карстовой воронки пошли волны. В последующие годы береза целиком ушла под землю. В результате осыпания рыхлых грунтов впадина расширилась до 26 м, а глубина уменьшилась до 5 м. Остальные провалы имели значительно меньшие размеры (в поперечнике от менее 2 м до 6 м и глубиной от менее 1 до 4 м, табл. 6.1). Большинство провалов (54 %) произошло на дне и в бортах старых карстовых впадин или на удалении от них до 20 м (25 %). На поверхности V террасы провалы концентрируются в линейных зонах с простиранием 40—50° и 130—140°. Между годовым количеством осадков и числом провалов имеется довольно тесная корреляционная связь ( $r = 0,78 \pm 0,14$ ).

Таблица 6.1  
Размеры провалов на Ледяной горе

Поперечник		Глубина	
м	%	м	%
До 2	61	До 1	68
2—4	21	1—2	18
5—6	15	3—4	12
Более 6	3	Более 4	2



Рис. 6.2. Карстовые воронки на Ледяной горе (фото Е. П. Дорофеева)

Вследствие интенсивной закарстованности и большой частоты провалов Ледяная гора непригодна для крупного строительства и малопригодна для пашни (рис. 6.2). В то же время здесь имеются большие возможности для отдыха и туризма. Однако стихийное хозяйственное использование горы сопровождается истреблением реликтовой лесостепной растительности на ее южной стороне, лесной растительности на северной стороне, уничтожением и загрязнением карстовых форм рельефа. Необходимо убрать городскую свалку, проложить смотровые тропы вдоль южного края горы, оборудовать смотровые площадки, установить ограждения и аншлаги. ОАО «Сталагмит» следует организовать автобусные туристские маршруты по Ледяной горе с устройством подъездов и стоянок для автобусов.



**Часть 2**  
**КУНГУРСКАЯ ЛЕДЯНАЯ ПЕЩЕРА**



## Глава 7

### ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

---

#### 7.1. ИССЛЕДОВАНИЯ ДО XVIII в.

Посещения подземного лабиринта начались с глубокой старины. Над входом в пещеру на горе сохранились вал и ров древнего “Ермакова городища” (рис. 7.1), в 0,5 км к западу расположено “Кунгурское городище”. Камской археологической экспедицией при раскопках здесь найдены остатки костров, железные и костяные наконечники стрел, обломки посуды, железный рыболовный крючок — предметы Сылвенской культуры IX—XI вв. н. э. Городища служили временными убежищами в период военной опасности. Постоянные поселения находились



Рис. 7.1. “Ермаково городище” на Ледяной горе над Кунгурской пещерой (фото Е. П. Дорофеева)

на берегу р. Сылвы. Расположение городищ у пещеры неслучайно. Природный ледник, вероятно, использовался для хранения мяса и рыбы, в глубине, где сохраняется положительная температура, можно было найти спасение от мороза, а при нападении врага скрыться в подземном убежище.

Первые сведения о Кунгурской пещере встречаются в народных легендах. На пути в Сибирь войско Ермака вместо Чусовой направилось вверх по Сылве. Когда ошибку обнаружили, возвращаться было поздно, река замерзла, и велел Ермак “зимовать на Сылве, на горе городище городить, землянки делать. А в горе обнаружили пещеру: такие хоромы сыскались, что любой князь позавидует. Поселился Ермак в пещере с казаками, там и прожил до весны” [272]. В старинных летописях зимовку Ермака на Сылве относят к 1578—1579 гг. Ряд названий на реке Сылве (“Ермаково городище”, “камень Ермак”, деревня “Хуторы Ермаковы”) напоминает о былом походе. При разведке засыпанного обвалами юго-восточного хода из грота Бриллиантового найдены два старинных чугунных ядра, которые переданы в Государственный исторический музей [234]. Копоть на глыбах свидетельствует о былых посещениях этой части пещеры. По преданиям [447], первые русские поселенцы иногда были вынуждены скрываться в пещере от набегов коренных жителей.

В 1663 г. на высоком мысу между Сылвой и ее притоком Иренью началось строительство города Кунгура.

## 7.2. ИССЛЕДОВАНИЯ В XVIII в.

“В 1703 году, апреля во 28 день, по указу великого государя и по приказу ближних боярина и воевод князя Михаила Яковлевича Стольника, князя Алексея Михайловича Черкасских, дьяков Ивана Братина, Матвея Маскина: велено тобольскому сыну боярскому Семену Ремезову ехать из Тобольска на Верхотурье с сыном своим Леонтьем, из Верхотурья на Кунгур для учинения вновь чертежа города Кунгура и уезду рек, сел и деревень”, — так начинается описание к “Чертежу земли Кунгурского города”, составленному известным географом и картографом Сибири конца XVI — начала XVIII в. С. У. Ремезовым [14]. В оглавлении “Служебной чертежной книги Семена Ремезова”, хранящейся в Санкт-Петербурге в государственной публичной библиотеке им. Салтыкова-Щедрина, на листе 51 указан “Чертеж Кунгурской пещеры”, но лист с чертежом утерян.

В 1720 г. исследователь Сибири Д. Г. Мессершмидт, находившийся с экспедицией в Тобольске, послал в Петербург рапорт № 4, к которому приложен первый план Кунгурской пещеры с надписями на немецком языке. Такой же план опубликован в книге Ф. И. Страленберга [460], изданной в Стокгольме. Хотя в обоих случаях автор плана Кунгурской пещеры не указан, но по стилю чертежа, сходного с другими работами Ремезова, доказано, что копии сняты с исчезнувшего плана Кунгурской пещеры [14, 162]. После Полтавской битвы капитан шведской армии Филипп Таберт (Страленберг) попал в плен. В 1711—1721 гг. он жил в Тобольске и принимал участие в экспедиции Мессершмидта. Вместе они бывали у С. У. Ремезова, смотрели составленные им карты. Видимо, тогда и были скопированы чер-



Рис. 7.2. План Кунгурской пещеры, составленный С. У. Ремезовым в 1703 г. [460]:  
 А — город Кунгур; В — вход в пещеру; С — обжигание гипса; D — темные проходы, ведущие к залам, в которые проникает свет; Е — природные каменные ступени; F — упавшие камни; G — сложенные гипсовые камни; H — природные скалы; I — икона Николая, установленная русскими; К — пещерный ход; L — круглое маленькое озеро, из которого вытекает река, уходящая под землю; M — поток, который вытекает со скалы и образует водопад; N — большая площадка, где растут трава и цветы; O — крест, оставленный русскими; P — провалы в скалах; Q — столбы для поддержки; R — природный свод и ложечники в скалах; S — высокий берег Сырты; T — река Сырты; U — река Гирень; V — столбы для поддержки свисающих камней

тежи (рис. 7.2). Из плана следует, что к началу XVIII в. пещера была широко известна, У входа ломали и обжигали гипс. В некоторых гротах стояли кресты, на каменном постаменте располагалась большая икона Николая Чудотворна. В восточной части пещеры изображен грот с природными каменными ступенями, вход в который к нашему времени не сохранился. Грот с травой, цветами, водопадами и длинной рекой, очевидно, нарисован по рассказам местных жителей.

Первые заметки о Кунгурской пещере составили начальник Уральских и Сибирских горных заводов В. Н. Татищев, неоднократно посещавший Кунгур в 1720—1723 гг., и его преемник В. И. Геннин, занимавший этот пост в 1722—1734 гг. [162]. В. Н. Татищев услышал легенду сибирских народов о сказочном звере-мамонте, над подземными ходами которого появляются рвы и ямы. Кости ископаемых исполинов находили в подмытых берегах сибирских рек. В рукописи на латинском языке “Сказание о звере-мамонте” [391] В. Н. Татищев объясняет происхождение рвов и ям-воронков провалами над пустотами, созданными растворением и выносом породы подземными водами. В доказательство приводится Кунгурская пещера “с великими палатами длиной около версты”. Однако описание Кунгурской пещеры он считал “весьма неправильным” и объяснял это тем, что Ф. И. Страленберг “сам в ней не был, но слыша

написал". В. Н. Татищев связывал провалы над пещерой с работой подземных вод, а не с действием "внутреннего огня", как писали ученые Европы. "В бытность мою от действия просачивающихся вод учинился в поле великий провал. И когда внутрь [пещеры] посылал осматривать, то выявилось, что один проход засыпало..."

В. И. Геннин, работая на Урале, собрал большой материал о горных заводах, геологии, палеонтологии и "протчих куриозных вещах", в числе которых находилась и Кунгурская пещера. Согласно его описанию, "из оной пещеры завсегда исходит великой ветр, никогда не перестает, и во время летнее скот при оной пещере от оводу всегда собирается, и в самое жаркое время при оной двери пещеры от ветру студеного покоятся... Проход в пещере не один, но весьма множество разных, простирающие пещеры ни от кого еще донныне не испытано и ежели когда кто ради любопытства хошет оную пещеру посмотреть, то ходят в нее с огнем и по пути своему полагают разные признаки назади, дабы по оным признакам возможно назад возвратитца... В пещере завсегда студень воздух и от оногo воздуха весьма рождается иней, который от верху камня висит вниз куриозными видами на пол-аршина... И многие в оной пещере проходы льдом заплыли, а в иных местах изо льду великие пирамиды сочинились. И за отнятием льдом проходов в иные места вдоль уже непроходимо" [65].

В 1733 г. Кунгурскую пещеру обследовали участники "сибирской группы" сухопутного отряда Великой Северной второй Камчатской экспедиции профессора Петербургской академии наук И. Г. Гмелин и Г. Ф. Миллер в сопровождении художника Бергхана. В рукописи, составленной Гмелиным на латинском языке (обнаружена Е. Н. Косвинцевым [194] и хранится в Центральном государственном архиве), дается описание Кунгурской пещеры с приложением плана, снятого с помощью компаса, и рисунка Ледяной горы (рис. 7.3). Он же провел первые в мире измерения температуры воздуха в пещере. Результаты измерений температуры в пещере, застывшие озера, ледяная колонна до свода, кристаллы изморози в виде "цветочных веток" в гроте Склеп свидетельствовали о более сильном, чем теперь, охлаждении пещеры. И. Г. Гмелин впервые указал, что жителями пещера зовется "Ледяной".

В 1770 г. Кунгурскую пещеру обследовала экспедиция академика И. И. Лепехина. В его "Дневных записках" [212, 213] обстоятельно описываются размеры и внешний вид гротов, направление ходов, так что можно проследить их подземный маршрут через старый вход, гроты Бриллиантовый и Полярный до Большого подземного озера. Оледенение в этот период достигало максимального развития. В августе многолетние льды распространялись до Метеорного грота, вход был затянут толстым слоем льда, вырубить который стоило немалых сил. Академик И. И. Лепехин писал: "всяк ... ясно видит, что она водному элементу начало свое долженствует".

В 1772 г. через Кунгур проезжал начальник Оренбургского отряда академической экспедиции академик И. П. Фальк. В "Записках путешествия" [400] упоминается и о Кунгурской пещере: "сия пещера состоит из сводов слюдовидного гипса и расселин, подошва ея кажется быть в уровень с поверхностью речной воды, местами видны пруды, везде каплет вода и ле-

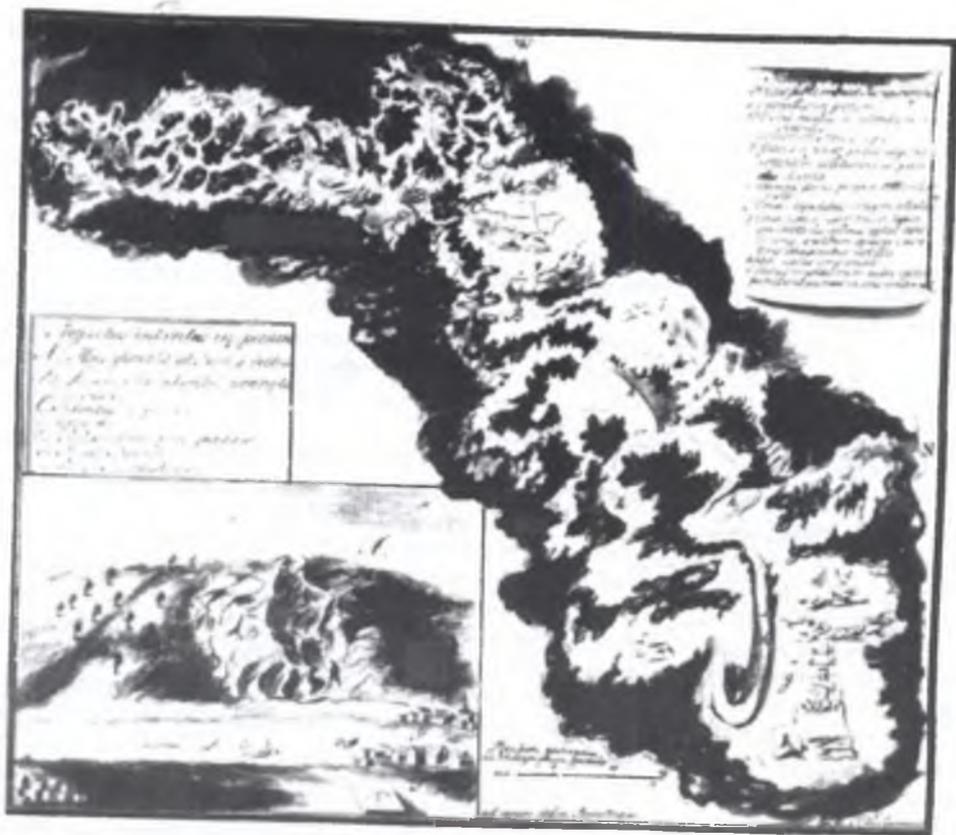


Рис. 7.3. План Кунгурской пещеры и рисунки Ледяной горы из рукописи И. Г. Гмелина [74]

жат камни, упавшие сверху, посему она завалена и ходить по ней опасно”. Фальк осмотрел воронки над пещерой и огромный провал глубиной в 50 м на правом берегу р. Ирени в 3 верстах выше Кунгура.

### 7.3. ИССЛЕДОВАНИЯ В XIX в.

В начале XIX в. вход в пещеру неоднократно перекрывался обвалами. По инициативе Кунгурского народного училища в 1814 г. он был раскопан и смотритель училища Суворов составил подробное описание доступных ходов и около двух десятков гротов [217]. Третий из них назван Манжетной пещерой: “обледел тонкой, прозрачной кружевниною несколько обледенелою, подобно выкрахмаленным манжетам. От довольно количества людей с зажженными свечами обледенелые кружевнины отваливаются тонкими хрустальями”. В пятом гроте описана труба диаметром 2 аршина из чистого, как бы полированного алебастра. В теплое время до заморозков в ней течет каплями вода, в холодное время от замерзания воды “представляются зрению разные капельники и тончайшие хрустали, подобные белуюю накрахмаленному батисту”. В девятом гроте “такой запутанный обход, состоящий из 150 сажень, что без шнура и других верных замеча-

ний ходящие люди всегда путь теряют...” В 14-м гроте “примечания достойно... то, что показываются на стенах сей палаты фигуры, представляющие то скотские головы с рогами и губами, то разные, как бы прилепленные животные, со всеми их образованиями”. Это одно из первых в мировой литературе описание фреатических форм — подвесок. На участке между современными гротами Морское дно и Центральным указываются неизвестные теперь полости, в том числе зал длиной 100 м (грот Лепехина, [83]). По словам Суворова, он обошел более 100 гротов разной формы и величины, образующих три главных ряда. Упоминает он и о шести гротах к северо-востоку от входа в пещеру. В этой недоступной теперь галерее, возможно, находится “зал с природными каменными ступенями”, изображенный в 1703 г. на плане Ремезова. Сейчас о ее существовании можно догадываться по струе теплого увлажненного воздуха, вытекающей в зимний период из северо-восточной оконечности пещеры.

В сентябре 1820 г. пещеру посетил профессор Казанского университета И. Ф.Эрдман, которого сопровождал смотритель окружной школы Суворов. Эрдман [444] отмечает, что во втором (Бриллиантовом) гроте имеется “иной в форме прекрасно образованных игл и листочков”, в третьем (Полярном) гроте “ледяная гора поднималась до свода”, а в четвертом (Крестовом) “стояли стройные ледяные столбы”.

Наиболее яркое описание Кунгурской пещеры (рис. 7.4) принадлежит профессору Казанского университета М. Я. Киттары [184]. Он наблюдал в Бриллиантовом гроте “замечательные цепи и шнуры из сросшихся ледяных кристаллов”, а в гроте Полярном — “точечные вазы-сталагмиты”, наполненные прозрачной водой. Очевидно, в первой половине XIX в. пещера имела более холодный режим. Игольчатые ледяные кристаллы, растущие при температуре ниже  $-7^{\circ}\text{C}$ , сохранялись до осени, не таяли сталагмиты и в Крестовом гроте. На берегу озера он изобразил жертвенник, а в гроте Крестовом — убежище, сложенное из камней (“склеп”). Память о профессоре Киттары жива в народе: одна из улиц Кунгура названа его именем.

В 1859 г. художники Иконников и Головин произвели зарисовки внутри пещеры и одновременно канатом измерили длину пещеры [351]. Протяженность главного хода оказалась “до 500 сажен” (1015 м).

В 1875 г. пещеру посетили возвращавшиеся из Сибири члены полярной экспедиции Норденшельда.

В 1879 г. первые археологические раскопки в Кунгурской пещере провел антрополог И. С. Поляков [351]. Два шурфа в Крестовом гроте не вскрыли культурного слоя: обломки орудий и кости животных не были обнаружены. По его мнению, пещера никогда не была обитаема. Проводил он и температурные измерения, которые, впрочем, не вызывают доверия (завышены). И. С. Поляков впервые обратил внимание на гипсово-кальцитовые пленки озер и скопления кристалликов гипса (гипсовую “муку”) на поверхности испаряющихся льдов, а также на связь уровня подземных озер с р. Сылвой.

В 1882 г. Ледяную гору и Кунгурскую пещеру посетил выдающийся кристаллограф Е. С. Федоров [402, 403]. Он впервые в русской литературе использовал термин “карст”, раскрыл причины возникновения пещерных форм, объяснил причины накопления холода в пещере, дал кристаллографическую характеристику подземных льдов, указал на участие вод р. Сылвы в растворении пород и расширении пещерных ходов. Под впечатлением разрушитель-

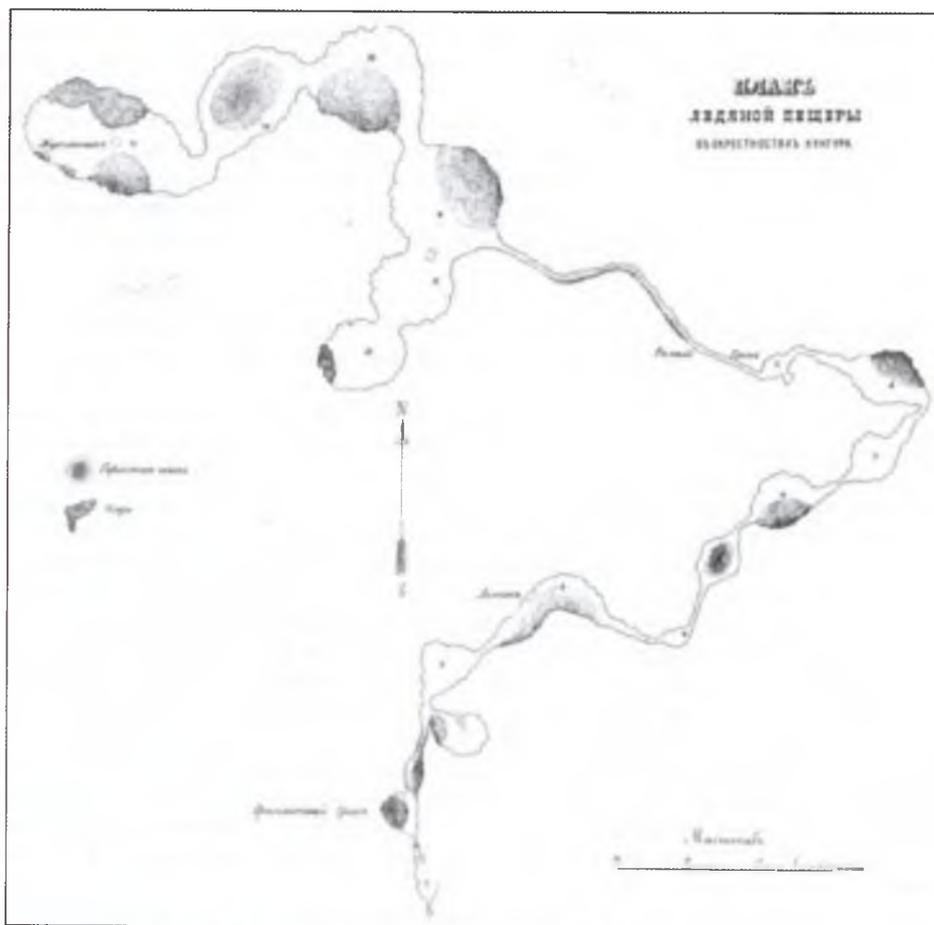


Рис. 7.4. План Кунгурской пещеры М. Я. Киттары [184]

ной деятельности подземных вод он писал: “как непродолжительна протекшая уже история пещеры, столь же краткий срок предстоит ей впереди”.

В 1884—1887 гг. геолог А. А. Штукенберг (1898) производил съемку 127-го листа общей геологической карты Европейской России (в масштабе 10 верст в дюйме). Известняково-гипсово-доломитовую толщу пермокарбона он выделил в особый кунгурский ярус, но без дальнейшего расчленения, так как полагал, что гипс и ангидрит образуют более или менее мощные штоки среди известняков и доломитов.

#### 7.4. ИССЛЕДОВАНИЯ В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XX в.

В 1903 г. Кунгурскую пещеру посетил гидрогеолог А. П. Нечаев, рассказавший о своих впечатлениях в научно-популярных заметках и книге “Подземные дворцы” [315—317].

В 1904—1906 гг. Кунгурскую пещеру обследовал геолог Н. И. Каракаш [172], занимавшийся изысканиями железнодорожной линии Пермь — Екатеринбург. Он впервые охарактеризовал геологический разрез над пещерой, отметив, что большинство воронок на Ледяной горе образовалось вследствие провалов рыхлых пород через органнне трубы, сделал первые фотоснимки гротов и ледяных форм. Сравнив описания пещеры разных авторов, Каракаш отметил изменения в ее оледенении. Причины появления зоны отрицательных температур в пещере он видел в испарении льда и воды.

В 1912 г. Кунгурскую пещеру посетил биолог П. Каптерев [171]. Ему удалось поймать 16 пещерных ногохвосток, а в Большом подземном озере — двух слепых рачков-бокoplавов. Кроме того, им было встречено летающее насекомое, похожее на комара.

В 1911—1915 гг. при исследованиях северной части Уфимского плато неоднократно пещеру посещала В. А. Варсанюфьева [46, 47]. Она обратила внимание на происхождение разных гротов, соотношение обвальных сводов и сводов, омытых водой, на зависимость образования ледяных кристаллов от формы полостей, подтока зимнего холодного воздуха и пр.

После 1917 г. в районе пещеры проводятся широкие геологические исследования. Большое внимание при этом уделяется разведке и охране природных богатств страны, в том числе памятников природы. В постановлении Президиума Государственного комитета по охране природы Госнауки от 30.12.1926 г. указывается, что Кунгурская пещера представляет большой интерес и заслуживает охраны. Президиум ВЦИКа 11.01.1927 г. рассмотрел просьбу об отпуске средств, необходимых для улучшения условий для экскурсий. В решении указано, что “зачисление пещеры в охраняемые памятники природы должно быть проведено постановлением Народного комиссариата просвещения, а средства по разработанной смете получаютс я в бюджетном порядке следующего года по представлению Госкомитета”.

В 1925 г. Кунгурскую пещеру посетил выдающийся отечественный минералог академик А. Е. Ферсман. В работе “К минералогии пещер” [405] он отмечает уникальные подземные ледяные кристаллы, а позднее в очерке “Геохимия пещер” публикует их фотографии.

В 1928—1930 гг. Государственный гидрологический институт (Ленинград) организует экспедицию для изучения водного режима Кунгурской пещеры и ее подземных льдов. Экспедицией руководил профессор В. Я. Альтберг [10—13]. В ней участвовали наблюдатели Л. А. Вительс из Главной геофизической лаборатории (ГГО) и Г. Е. Баранов из Кунгурской метеостанции. Измерения температуры, влажности и скорости движения воздуха показали, что причина накопления холода кроется в особенностях строения подземных полостей, благодаря которым в течение всей зимы существует сильная тяга наружного морозного воздуха в пещеру. Были вскрыты причины формирования необычайно крупных ледяных кристаллов изморози. Для обоснования представлений о воздухообмене в пещере В. Я. Альтберг приводит глазомерный план ее ближней части. Несмотря на специальные указания о точности выполненных замеров, они также вызывают сомнения. По его данным, температура у Большого озера достигает 8 °С, а в органной трубе грота Дружбы Народов — 15°С, что вряд ли воз-

можно. Е. П. Дорофеев [114] считал, что это связано с влиянием тепловыделения наблюдателей. Одновременно производились температурные наблюдения на склоне Ледяной горы, в результате которых были выявлены участки выхода холодного воздуха.

В 1930 г. геологический разрез Ледяной горы у входа в пещеру исследовали геологи Н. П. Герасимов и Е. Н. Тихвинская [68, 69]. По результатам изучения обнажений на р. Сылве и ее притоков был составлен “разрез классического кунгура” (кунгурского яруса). В 1930-е гг. в Пермском госуниверситете выполнены первые химические анализы воды озер и льдов Кунгурской пещеры. Г. А. Максимович и Г. Г. Кобяк [270] установили, что лед и вода имеют минерализацию более 2 г/дм<sup>3</sup>, отнеся их к не охваченным существующими классификациями минерализованным (соленым) разновидностям подземных вод.

В 1931 г. гидролог Н. К. Тихомиров [395] выступил на I Всесоюзном гидрологическом съезде с докладом “Предварительные данные о значении отдельных факторов карстования в части суффозионных процессов”, в котором сообщил о разнообразных формах на стенах пещеры, возникших в результате растворения подземными водами. Он отметил, что подземные ходы заложены по направлению преобладающей трещиноватости. Наиболее важен вывод о том, что карстовая брекчия в сводах пещеры свидетельствует о нескольких циклах образования пустот и обрушениях в массиве Ледяной горы, связанных с развитием гидрографической сети. Н. К. Тихомиров первым указал на необходимость создания в Кунгурско-Сылвенском районе специальной карстовой станции. Группой под его руководством в 1930—1934 гг. составлен глазомерный план заозерной части пещеры.

В 1933 г. на I Всесоюзном съезде по охране и развитию природных богатств СССР Кунгурской пещере уделено значительное внимание. Ее хранитель, старейший экскурсовод А. Т. Хлебников, выступил с докладом [409], в котором предлагал развернуть научно-исследовательскую работу. В резолюции съезд отметил большое значение пещеры как в научно-просветительском, так и в экскурсионно-туристском отношении, в частности для развития иностранного туризма.

В 1934 г. работы по изучению Кунгурской пещеры и ее оледенения начинает Пермский госуниверситет (проф. Г. А. Максимович [256—259]), а Н. И. Бирилова [39] публикует материалы многолетних наблюдений за направлением воздушных потоков в пещере в разные сезоны и сведения об изменениях в оледенении пещеры.

В 1934—1935 гг. большую работу по изучению Кунгурской пещеры выполнила карстовая группа Ленгидростройпроекта И. М. Переслегина, занимавшаяся изысканиями для строительства КамГЭС. Топографический отряд провел съемку надпещерного участка на площади 5 км<sup>2</sup> (в масштабе 1:5000), двойную нивелировку от ст. Кунгур к реперам, заложенным у входа в пещеру и на Ледяной горе, полуинструментальную съемку пещеры. Работы на поверхности вели техники-топографы Лифленц и Попов, прорабы Дарнилович и Чемисов, подземную съемку — техники-топографы Ривкин и Михайловский. В пещере были оборудованы метеорологические и гидрометрические посты, на которых проводились регулярные наблюдения. В геологических, гидрогеологических и метеорологических наблюдениях принимали участие Ю. А. и Н. И. Романовы, В. С. Лукин, М. И. Гаврилов,

М. К. Иванов, А. П. Блинов, И. М. Переслегин. На Ледяной горе была пробурена скважина глубиной 85 м, вскрывшая весь разрез карстующихся пород. Вторую скважину такой же глубины пробурили перед входом в пещеру. Во время подземной съемки были открыты новые гроты пещеры: Великан, Грозный, Смелых. Общая протяженность нанесенных на план ходов составила 4,6 км.

На основе проведенных работ И. М. Переслегин написал “Отчет по работам инженерно-геологической группы Верхне-Камского бьефа в 1935 году”, в котором значительное внимание уделено Кунгурской пещере, истории ее формирования, особенностям геологического строения и различным образованиям. К сожалению, не все его соображения подтверждены расчетами. В описаниях имеются ошибки (площадь Большого подземного озера не 200 м<sup>2</sup>, а около 1300 м<sup>2</sup>, его глубина не 6 м, а 2,5 м и пр.).

В 1936 г. Свердловский горный институт выполнил проект нового входа в Кунгурскую пещеру — 36-метрового тоннеля.

В 1936 г. НИИ земной коры ЛГУ направил в пещеру экспедицию под руководством М. П. Головкова для изучения климатического режима и подземных льдов [76—78]. Ее участники обнаружили многолетние изменения в распространенности льдов пещеры, выделили различные виды ледяных кристаллов, соответствующие определенным физико-химическим условиям, отметили смену форм кристаллов с течением времени. Оказалось, что однолетние ледяные сталактиты представляют собой монокристаллы, а многолетние — состоят из удлиненных кристаллов, ориентированных оптически осями параллельно длине.

В 1937 г. Кунгурская пещера была включена в число объектов Уральской экскурсии 17-го международного геологического конгресса, состоявшегося в Москве. К приезду участников конгресса бригадой проходчиков треста “Союзхромит” был пройден входной тоннель в Бриллиантовый грот; под редакцией академика В. А. Обручева издана иллюстрированная многочисленными фотографиями фирмы “Берлянд-Союзфото” брошюра “Путешествие по Ледяной пещере на Урале” [209—211]; вышла книга очерков Г. А. и Н. А. Максимович “Ледяная пещера” [272] в форме рассказов-зарисовок, знакомящая с исследователями Кунгурской пещеры, дающая описание подземного маршрута, рассматривающая происхождение пещеры и ее температурный режим. Группу участников конгресса, состоящую из 19 советских и 20 иностранных геологов, возглавлял академик Д. В. Наливкин. В числе зарубежных гостей были профессора Деленин (Франция), Фоке (Индия), Кондре и Поджер (США). В память о посещении пещеры было предложено переименовать грот Титанический в грот Дружбы Народов.

В 1939 г. техник-геодезист Е. Булдаков вынес на поверхность Ледяной горы центры гротов.

В 1941—1945 гг. пещера не исследовалась и изредка посещалась экскурсантами. В 1942 г. А. Е. Ферсман и Д. И. Щербаков представили Председателю ГКО И. В. Сталину докладную записку о создании Экспедиции особого назначения (ЭОН), целью которой являлось определение возможностей использования пещер в военное, а затем и в мирное время. В 1943—1945 гг. экспедиция развернула активную работу по инвентаризации и обследованию пещер страны.

В 40-е гг. профессор Г. А. Максимович разработал “Краткую инструкцию по изучению пещерного льда и ледяных пещер” [257], в основу которой легли наблюдения в Кунгурской пещере, и опубликовал работу “Пещерные льды” [259], описав в ней виды льдов Кунгурской и других пещер. В 1946 г. на Пермской карстовой конференции был заслушан его доклад о пещере [258]. Участники конференции совершили экскурсию в Кунгурскую пещеру.

В 1947 г. В. А. Володин и В. А. Пшеничнов [56] исследовали микрофлору воды, воздуха, льда и глинистых отложений Кунгурской пещеры. Они установили бедность микрофлоры по сравнению с поверхностью и ее особый, присущий только пещере видовой состав.

В 1949 г. доцент ПГУ В. А. Апродов на основании статистической обработки ширины пещерных ходов (по плану 1934—1935 гг.) пришел к выводу, что при удалении от р. Сылвы она сперва возрастает, а затем уменьшается, и предложил схему развития подземных полостей района Кунгурской пещеры. Большое внимание в его работах уделено взаимосвязи разных карстовых форм, образующих “карстополлином” [31].

## 7.5. ИССЛЕДОВАНИЯ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX в.

В 1948 г. на базе одной из групп Экспедиции особого назначения, прекратившей после войны свою деятельность, в Кунгурской пещере был организован Уральский филиал карстово-спелеологической станции МГУ. Ее первым научным руководителем становится талантливый геолог В. А. Варсанофьева (рис. 7.5), а заведующим — В. С. Лукин. К этому времени в пещере в результате потепления нарушились условия кристаллизации льда, а должные меры по ее охране и благоустройству не принимались. Этому способствовала частая “смена хозяев” (пещера передавалась из Межобластного управления курортами, санаториями и домами отдыха в Комитет по заповедникам, в районный, а затем и городской исполкомы и туристско-экскурсионное управление ВЦСПС). Поэтому перед станцией стояли большие задачи: восстановление ледяных кристаллов в Бриллиантовом гроте, охрана, благоустройство пещеры и проведение в нее экскурсий. Эпизодические исследования пещеры сменились стационарными наблюдениями [167].

В 1949 г. было оборудовано 30 метеорологических и гидрометрических постов. Изучение воздушных потоков, распределения температур и влажности воздуха позволили установить причины по-



Рис. 7.5. Вера Александровна Варсанофьева, первая в России женщина-доктор геолого-минералогических наук

тепления и нарушения кристаллизации льда. После проходки тоннеля в Бриллиантовый грот изменилось направление воздушных потоков и нарушился прежний режим, благоприятный для роста кристаллов. В результате принятых мер уже в 1950 г. своды Бриллиантового и Полярного гротов вновь покрылись ледяными кристаллами, усилилось образование натечных льдов, расширилась холодная часть пещеры.

В 1952 г. карстово-спелеологическая станция МГУ была передана Уральскому филиалу АН СССР и реорганизована в научно-исследовательский стационар, директором которого стал Д. В. Рыжиков. В результате многолетних наблюдений В. С. Лукин [219, 220, 223 и др.] определил количество холода, аккумулируемого пещерой зимой, и тепла, поглощаемого породами за летний период, величину испарения и конденсации влаги, их влияние на тепловой режим. Изучение пород, обнажающихся в стенах пещеры, и ее отложений позволило наметить основные этапы формирования Кунгурской пещеры. При этом главная роль отводилась водам р. Сылвы, периодически вторгающимся в закарстованный массив [225].

В 50-е гг. Б. Ф. Перевозчиков изучил геологические разрезы и трещиноватость в стенах гротов, выявив нарушения в залегании пород, обусловленные карстом. В. С. Полевой [349, 350] применил электроразведку для обнаружения с поверхности известных пещерных галерей и их неразведанных продолжений.

В 1956 г. директором стационара стал А. В. Турышев. Была осуществлена высотная увязка р. Сылвы и пещерных озер, установлена их взаимосвязь и особенности движения подземных вод в Ледяной горе в разные периоды [398, 399]. В эти же годы Северо-Уральская геофизическая экспедиция МГУ в содружестве с кафедрой геофизики ПГУ проводила геофизические работы в районе пещеры. В. К. Хмелевской [410] применил методы высоко-точной электроразведки для изучения влияния полостей Кунгурской пещеры на распространение радиоволн.

В 1960—1964 гг. Е. П. Дорофеев [107] составил новый инструментальный план пещеры в масштабе 1:500 (рис. 7.6), совместив его с планом карстовых воронок на поверхности Ледяной горы. На плане впервые показаны вновь открытые гроты (Теплый, Космический и др.). Для выяснения мощности и состава пещерных отложений под землей было пробурено несколько скважин глубиной до 7 м, начаты многолетние режимные наблюдения.

В 1964 г. комплексные геофизические работы в пещере [5] проводил отряд кафедры геофизики МГУ. С помощью измерителя напряженности радиополя ПИНП-2 определялись изменения интенсивности принимаемого сигнала и отклонения радиопеленга широкоэвентельных станций в разных точках пещеры, обусловленные влиянием крупных полостей. С помощью регистратора космических излучений было установлено, что по мере продвижения в глубь пещеры и увеличения мощности кровли количество регистрируемых частиц заметно снижается.

В 1965 г. биологи МГУ Е. С. Лисина-Кулик и Л. Д. Барсукова [216] выполнили микробиологические исследования отложений Кунгурской пещеры и высказали предположение об изменении видового состава микроорганизмов в зависимости от возраста отложений.

В 1966 г. экспедиционный отряд Института геофизики УФААН СССР оборудовал в гроте Геологов наклонмерную станцию для изучения дви-



жений блоков земной коры в результате землетрясений и лунно-солнечных приливов [376]. За 10 лет непрерывной фоторегистрации с помощью высокочувствительных маятников выявлен вековой ход наклона земной коры, лунно-солнечные приливы. Высокочувствительным термографом (0,002 °С) в глубинной части пещеры обнаружены суточные, периодические (связанные с экскурсионным посещением) и сезонные колебания температуры, а также прогрессирующее похолодание. Проведена гравиметрическая съемка в пещере и на Ледяной горе [378].

В 1972 г. в сотрудничестве с Институтом карстоведения и спелеологии (далее ВИКС) стационар выступил организатором Всесоюзного совещания по вопросам инженерного карстоведения. В 70-х гг. сотрудники ПГУ и стационара изучали гидрохимию, минералогию, миграцию акцессорных элементов в пещере [97]. В 1973 г. стационар провел совещание по изучению и агрохимическому использованию известковых туфов. В этом же году Кунгурская пещера была обследована в целях выяснения возможности использования ее гротов как лечебных палат для больных бронхиальной астмой, аллергическими и некоторыми легочными заболеваниями. Однако из-за низкой температуры в пещере, большого количества экскурсантов, трудностей доставки и обслуживания больных устройство лечебницы сочли нецелесообразным [274].

В 1975—1977 гг. Ю. А. Ежов и В. А. Шерстобитов [154, 155] с помощью разработанной ими дистанционной аппаратуры, регистрирующей количество воды, фильтрующейся через своды пещеры, обнаружили связь частоты капель с пульсацией трещин, обусловленной приливно-отливными явлениями в земной коре.

В 1981 г. стационар в сотрудничестве с ВИКС выступил организатором научно-технической конференции “Аккумуляция зимнего холода в горных породах и его использование в народном хозяйстве”.

С 1984 г. ведутся опыты по растворению плиток гипса и ангидрита, подвешенных в воде озер и во влажной атмосфере пещеры [84, 85, 88, 95]. А. И. Печеркин с соавт. [341—344] проследили связь крупных гротов пещеры с зонами интенсивной трещиноватости.

В 1988 г. Кунгурский стационар провел научно-практическую конференцию “Наводнения в г. Кунгуре и строительство защитных дамб”, в сотрудничестве с ВИКС выступил организатором регионального совещания “Проблемы изучения техногенного карста”, а в 1989 г. конференции “Вопросы уральской спелеологии”.

В 1989—1990 гг. В. Н. Андрейчук с соавт. [22] исследовали аэрозольный состав воздуха и установили, что пещера, пропуская через себя воздух, очищает его от загрязнения.

В 1990—1991 гг. в сотрудничестве с ВИКС стационар провел конференции “Изучение Уральских пещер” и “Обстановка карстогенеза: глубинный карст, эндокарст, гидротермокарст”, в 1992 г. региональное совещание “Проблема псевдокарста”. С 1992 г. в связи с финансовыми трудностями стационар сократил режимную сеть. Однако на Международном симпозиуме по инженерной геологии карста (Пермь, 1992), участники которого посетили пещеру, был поднят вопрос о необходимости восстановления режимных наблюдений в полном объеме.

В 1992 г. ПГУ в соответствии с программой “Университеты России” начал работы по теме “Кунгурская пещера. Комплексные исследования”

(рук. К. А. Горбунова). В ней приняли участие ученые ПГУ С. М. Блинов, В. Н. Катаев, Н. Г. Максимович, Н. Е. Молоштанова, Г. А. Сычкина, а также сотрудники стационара В. Н. Андрейчук, И. А. Лавров, И. И. Яцына. Были восстановлены режимные наблюдения, осуществлен комплекс геологических, гидрогеологических, минералогических и геохимических исследований (более 250 проб и анализов). В 1995 г. по результатам исследований выпущена брошюра “Кунгурская пещера” [202].

В 1993 г. в сотрудничестве с ВИКС стационар выступил организатором конференции “Проблемы изучения карстовых ландшафтов”, посвященной 80-летию выдающегося карстоведа, географа Н. А. Гвоздецкого, а в 1994 г. конференции “Карстовые провалы”.

С 1995 г. в связи с выездом в Польшу руководителя стационара В. Н. Андрейчука, а затем уходом из жизни В. С. Лукина (1997), Е. П. Дорофеева (1998) и И. И. Яцыны (1999) регулярные наблюдения начали сокращаться (проводились только разовые замеры).

В 1998 г. обработку материалов по пещере начал В. Н. Дублянский. В минимально необходимом объеме были восстановлены режимные наблюдения, проводятся наблюдения за содержанием радона в воздухе пещеры (Естественно-научный институт при ПГУ), начаты работы по систематизации многолетних режимных наблюдений Кунгурского стационара в виде банка данных. В 1999—2002 гг. работы по составлению банка данных были продолжены. Одновременно завершились работы по компьютеризации архивов стационара. В 2000 г. И. А. Лавров и А. А. Чугаева [206] составили электронный план Кунгурской пещеры, исходным материалом для которого стал архив Е. П. Дорофеева (журнал координат точек съемки и вычерченный по нему план пещеры масштаба 1:500). Он был отсканирован и оцифрован в программе MapInfo 5.0 (рис. 7.7).

Электронный план Кунгурской Ледяной пещеры включает ряд слоев: контуры пещерных ходов, зияющие и заполненные органические трубы, озера, отложения (обломки коренных пород, осыпи, накопления глины, кровный лед, ледяные сталактиты, сталагмиты и сталагматы), съемочные точки теодолитных и буссольных ходов, посты режимных наблюдений, направления движения воздушных потоков в летнее и зимнее время, экскурсионную тропу, названия гротов. Кроме того, созданы слои плана поверхности, на котором показаны карстовые воронки над пещерой, бровка и подножие склона Ледяной горы, обнажения коренных пород, берег р. Сылвы. Разграфка на плане произвольная и составлена для удобства представления полного плана пещеры в масштабе 1:1000. На нем впервые показаны новые гроты, тоннель и экскурсионная тропа от грота Дружбы Народов до выхода из пещеры, а также измененные названия гротов. Хотя некоторые элементы электронного плана (оледенение пещеры, контуры озер) нуждаются в уточнении, он является основой для систематизации данных научных наблюдений в Кунгурской пещере.

В 2003 г. совместно с ОАО “Пермтурист” была проведена международная конференция “Кунгурская Ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности” [204]. В этом же году была завершена научно-популярная работа о Кунгурской пещере [144] и начата подготовка настоящей монографии.

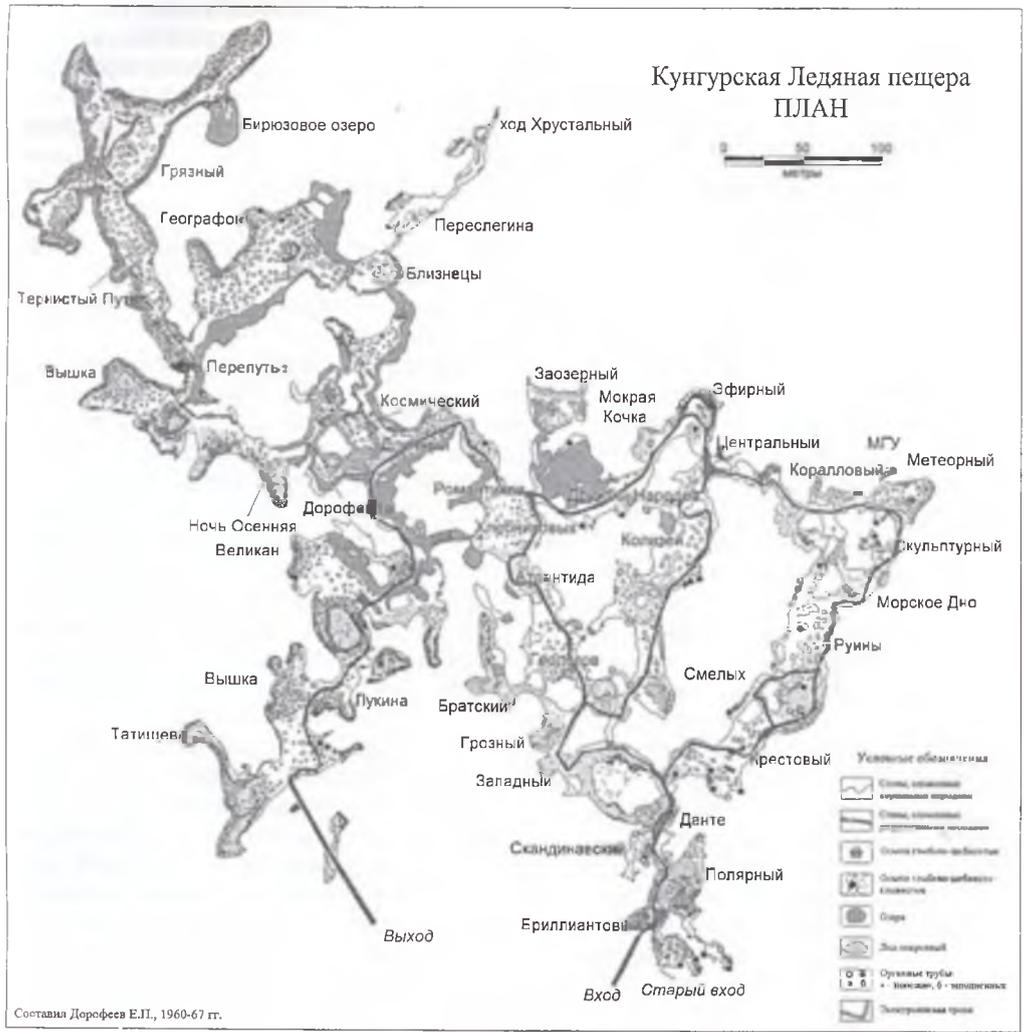


Рис. 7.7. Электронный план Кунгурской Ледяной пещеры со схемой полистной разграфки [206].  
Меридиан магнитный

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Кунгурская пещера — одна из немногих в мире и единственная в России, в которой на протяжении более 50 лет проводятся комплексные научные наблюдения, ставятся разнообразные эксперименты. Почти полвека научным руководителем и директором Кунгурского стационара был В. С. Лукин [17]. Он вложил много сил и энергии в организацию стационара и оборудование пещеры, сумел собрать и удержать энтузиастов, людей, для которых она стала вторым домом. В их числе был Е. П. Дорофеев, благодаря которому сохранились данные многих уникальных наблюдений и замеров. В 1997 г. ушел из жизни В. С. Лукин, а в 1998 г. не стало и Е. П. Дорофеева. Однако вместе с ними не должны были исчезнуть знания, накопленные за много лет, труд коллектива стационара и большого круга сотрудничавших с ним ученых Прикамья и всей страны. Так родилась идея создания Банка данных по Кунгурской пещере, которую выдвинул переехавший в 1997 г. в Пермь профессор В. Н. Дублянский, имеющий опыт подготовки Кадастра карстовых полостей Крыма [137].

Работа над Банком данных началась в 1998 г. Сначала были разобраны архивы стационара и определена его примерная структура, затем найден и заказчик — Комитет по природным ресурсам Пермской области. Хотя финансирование и было скромным (600 тыс. руб. на 3 года), в конце 2002 г. отчет по федеральному заказу был сдан в геологические фонды, а в 2003—2004 гг. подготовлена настоящая монография.

Над составлением Банка данных работал коллектив из 16 человек: 8 — из Горного института УрО РАН, 6 — из Пермского госуниверситета, 2 — из ЕНИ, в том числе 3 доктора наук, 5 кандидатов наук, 6 младших научных сотрудников, 3 инженера. При подготовке курсовых и дипломных работ к работе привлекались 12 студентов геологического и географического факультетов ПГУ. Работой руководил профессор В. Н. Дублянский.

Банк данных представляет собой три книги (995 стр., 159 табл.), включающие 11 частей: климатические условия района, наблюдения за уровнями поверхностных и подземных вод в районе пещеры, данные о геологии района, морфологии, микроклимате и отложениях пещеры, химическом составе водопроявлений района, биологии и экспериментах в пещере, ее открытии, использовании и охране, библиографии. Объяснительная записка к Банку данных состоит из двух книг (462 стр.). Отчет подготовлен на электронных (диск CD-R) и бумажных носителях [360].

Материалы, собранные в Банке данных, стали доступными для многих специалистов, что позволило использовать их для решения новых исследовательских задач, в том числе на базе современных информационных тех-

Количество и виды гидрометеорологических наблюдений

(● — ежедневные, ▲ — пентадные, ■ — недельные,

Параметр	Год											
	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	
Температура, °С	●	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Метеостанция
Влажность, мб	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Осадки, мм	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Абс. мин., °С	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Абс. макс., °С	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Промерзание, м	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Температура, °С	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Метеостанция
Влажность, мб	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Давление, мб	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Река Сылва	●	●	●	●	●	◆	◆	◆	◆	◆	◆	Уровни воды в р. Сылве,
Ход паводков	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	▲	
Озера в гротах*	—	—	—	—	●	●	—	●	●	—	—	
Скв. 1, 2, 3, 7	—	—	—	—	◆	◆	—	—	—	—	—	
Параметр	Год											
	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	
Температура, °С	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	Метеостанция
Влажность, мб	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Осадки, мм	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Абс. мин., °С	—	—	—	—	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	
Абс. макс., °С	—	—	—	—	—	◇	◇	◇	◇	◇	◇	
Промерзание, м	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	
Температура, °С	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Метеостанция
Влажность, мб	—	—	—	—	—	—	—	—	—	●	●	
Давление, мб	—	—	●	—	—	—	—	—	—	●	●	
Река Сылва	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	Уровни воды в р. Сылве,
Ход паводков	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Озера в гротах	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	
Скв. 1, 2, 3, 7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Всего	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

\* Озера в гротах Атлантида, Великан, Вышка, Геологов, Грозный, Длинный, Дружбы Народов, Колизей, Корал-

нологий. Банк данных по Кунгурской пещере, которая отличается “консерватизмом” микроклимата, приобретает особое значение при решении современных экологических проблем. Однако анализ Банка данных показал разнородность собранных материалов (табл. 8.1, 8.2).

**Количество наблюдений.** В Кунгурской пещере и близ нее выполнено более 100 тыс. замеров разных параметров, однако продолжительность

Таблица 8.1

в районе Кунгурской пещеры в 1950—1999 гг.

◆ — декадные, ◇ — месячные, (—) — отсутствуют

Год														
1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975
<i>Кунгур</i>														
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
—	—	—	—	—	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Кунгурская пещера</i>														
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>озерах, скважинах, колодцах</i>														
▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	●	●
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Год													Всего	
1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999		
<i>Кунгур</i>														
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
◇	◇	◇	◇	◇	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
◇	◇	◇	◇	◇	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
◇	◇	◇	◇	◇	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
<i>Кунгурская пещера</i>														
●	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
●	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
<i>озерах, скважинах, колодцах</i>														
●	●	●	●	●	●	●	●	●	—	—	—	—	—	
●	—	●	●	●	●	●	●	●	—	—	—	—	—	
●	◇	◇	◇	◇	●	●	◇	◇	◇	—	—	—	—	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
													14 610	
													16 258	
													16 258	
													288	
													144	
													20	
													1465	
													1095	
													94	
													743	
													658	
													40	
													36	
													51 709	

ловый, Крестовый.

различных видов наблюдений была разной. Даже самые полные ряды по метеостанции Кунгур содержат пропуски в десятки лет. Наблюдения за химическим составом воды в озерах пещеры имеются за 39 лет, по температуре воздуха — 35, ходом паводков на р. Сылве — 29, уровнями озер в пещере — 25, влажностью воздуха в пещере — 15, температурой льда — 11, капелью — 3.

**Количество и виды гидрометеорологических и гидрохимических наблюдений**  
 (● — ежедневные, ▲ — пентадные, ■ — недельные,

Параметр	Год										
	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960
Температура, °С	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
пород	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
льда	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
воды	◆	◆	◇	◇	◆	◆	◇	◇	◇	—	—
воздуха	■	■	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	—	◆
Влажность воздуха	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
абсолютная	◆	◆	◆	◆	◆	◆	—	—	—	—	◆
относительная	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Химический состав воды	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
снег	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
поверхностные воды	—	—	—	—	—	—	◇	—	—	—	—
капель	—	—	—	◇	◇	◇	◇	—	◇	—	—
озера в гротах*	—	—	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	—	◇
шурфы и скважины	—	—	—	◇	◇	◇	◇	◇	◇	—	—
лед	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	◇
р. Сылва	—	—	—	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	—
Эксперименты	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
капель	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
конденсация	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Параметр	Год										
	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Температура, °С	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
пород	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
льда	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
воды	—	◆	—	—	—	—	◆	—	—	◆	◆
воздуха	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Влажность воздуха	—	—	—	—	●	◆	●	●	●	●	●
абсолютная	—	—	—	—	●	◆	●	●	●	●	●
относительная	●	●	—	—	●	●	●	●	●	●	●
Химический состав воды	—	—	—	—	—	—	◇	—	—	—	—
снег	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
поверхностные воды	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	◇
капель	—	—	—	—	—	—	—	◇	—	◇	—
озера в гротах	—	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
шурфы и скважины	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
лед	—	—	—	—	—	—	◇	◇	◇	—	—
р. Сылва	—	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Эксперименты	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
капель	●	●	●	—	—	—	—	—	—	—	—
конденсация	—	—	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Всего	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

\* Озера в гротах Аквалангистов, Атлантида, Близицы, Вышка, Географов, Геологов, Дорофеева, Грязный.



Только 30 % данных представляют собой полные годовые ряды. В 70 % случаев это “разорванные ряды”, охватывающие несколько месяцев. Еще сложнее обстоит дело, если учесть количество замеров по конкретному посту. Например, гидрометрические данные по пещере охватывают ряд с 1952 по 1997 гг. Всего выполнено около 6,2 тыс. замеров уровней. По годам они распределяются неравномерно: 1985 г. — 14 %, 1953 и 1954 гг. — по 12 %, 1955 г. — 7,6 %, в остальные годы — от 5 до 0,1 %. По 13 % замеров приходится на озера в гроте Длинный и Дружбы Народов; 9,7 % — в гроте Геологов; 8,1 % — в гроте Коралловый; 7,8 % — в гроте Руины. В 13 озерах других гротов сделано от 6 до 0,1 % замеров.

Поэтому найти “репрезентативные интервалы”, обеспеченные всеми наблюдениями, было практически невозможно, что заставило искать другое решение проблемы.

**Качество наблюдений.** Наблюдательная сеть Кунгурской пещеры имеет ряд недостатков: гидрометрические посты не охватывают весь диапазон многолетних изменений уровней воды, шпурсы для вытяжных термометров не горизонтальны, поэтому в некоторых из них накапливалась вода. Разные наблюдатели использовали различные приборы, а результаты наблюдений записывали и обрабатывали нерегулярно, в журналах имеются пропуски, а также записи “затоплен”, “обсох”, “замерз”, “разрушен”, “завален”. За 50 лет наблюдений неоднократно менялась частота замеров: они были ежедневными (непосредственно или путем расшифровки лент самописцев), пентадными (30—1, 6, 11, 16, 21, 26 числа), недельными (30—1, 8, 15, 22, 27 числа), декадными (30—1, 11, 21 числа) и месячными (14—16 числа). Так как Кунгурский стационар неоднократно менял подчиненность (в 1948—1951 гг. — Карстово-спелеологическая станция МГУ, в 1952—1970 гг. — стационар Горно-геологического института УФАН СССР, в 1971—1987 гг. — стационар Института геологии и геохимии УНЦ АН СССР, с 1988 г. — лаборатория Горного института УрО РАН), контроль за его деятельностью зачастую был формальным. Внешний контроль за работой его лабораторий не производился ни разу.

В качестве примера приведем данные по химической лаборатории стационара. Она была создана в 1955 г. Анализы воды производились по методикам, разработанным для полевого анализа подземных вод. Определяли от 6 до 16 компонентов минерализации (ионы  $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ; реже —  $\text{CO}_2$  своб., рН,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ , сухой остаток; изредка —  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ). Ион  $\text{Na}$  определяли по разности сумм анионов и катионов, поэтому приблизительный контроль выполнения анализов возможен только по сухому остатку, данные о котором имеются всего в 40 % бланков. Используемые приборы и реактивы сертификацию не проходили.

Внутренний контроль был проведен 19.IV.1977 г. Из озера в гроте Дружбы Народов отобрано 10 проб, которые были проанализированы “вслепую”. Коэффициент вариации содержаний ионов  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ , а также рН и  $\text{SiO}_2$  составил 0 %. Это ни теоретически, ни практически невозможно и свидетельствует о том, что химик-аналитик знал о проверке.

В пещере были выполнены многие оригинальные эксперименты, но, к сожалению, их планирование часто было недостаточно продуманным [401]. Приведем три примера.

В 1948—1950 гг. начала складываться система наблюдений в Кунгурской пещере. Ясно, что их необходимо было связывать с наблюдениями на поверхности. В качестве эталонных решили использовать данные по метеостанции Кунгур [219], которая находится на левом берегу р. Сылвы, в 2 км к югу от Кунгурской пещеры, на IV надпойменной террасе, в 135 м над ур. м., хотя ее данные существенно отличаются от данных у входа в пещеру (правый берег р. Сылвы, I надпойменная терраса, 120 м над ур. м.). Каждый цикл метеонаблюдений в пещере в 1960—1991 гг. начинался замером температуры и влажности воздуха на поверхности. Такими замерами обеспечено всего 40 % наблюдений под землей. Замеры давления воздуха на поверхности производились только в 1978 г. Контрольные наблюдения на поверхности после выхода из пещеры вообще отсутствовали.

В 1975 г. был задуман интересный эксперимент по фиксации интенсивности капли с помощью специально сконструированного прибора [155]. Опытные установки были опробованы в 1975—1976 гг. в гроте Геологов (6 мес.), а в 1976—1978 гг. проведен цикл наблюдений в гротах Геологов (4 установки), Великан и Смелых, однако ни по одной из установок не был набран полный годовой цикл наблюдений — в сентябре и октябре замеры вообще не производились.

В 1983 г. Кунгурский стационар и Пермский госуниверситет начали исследования условий растворения гипса и ангидрита карстовыми водами. Из пяти штучков были выпилены 22 пластинки размером 5×5×1,5 см, которые разместили в разных условиях на поверхности и в пещере. Пластинки периодически снимали, высушивали при комнатной температуре и взвешивались на аналитических весах. Замеры вели более 10 лет. Однако повторность опытов была различной (1—5 образцов); продолжительность периода между взвешиваниями составляла от 14 до 552 сут, а периоды между взвешиванием не были привязаны к сезонам года и гидрологическим фазам. Поэтому интересный эксперимент привел к тривиальным выводам (было установлено ускорение темпа потери веса таблеток [85, 86, 88, 95]).

При анализе метеорологических и гидрологических данных по пещере разные исследователи использовали только короткие сроки наблюдений (А. В. Турышев — замеры 1955 г. [399]; Е. П. Дорофеев — 1977—1980 гг. [127], К. А. Горбунова — 1980—1992 гг. [82, 87, 98, 449]). Исследователи часто ограничивались качественными выводами (“из сравнения графиков видно...” [154]), не подтвержденными расчетами (коэффициент вариации, уравнение связи и пр.).

Для обобщения материалов наблюдений использовался топоплан Кунгурской пещеры в масштабе 1:500, составленный Е. П. Дорофеевым [107].

**Обработка материалов при составлении Банка данных.** При составлении Банка данных применялась следующая процедура.

1. *Устранение систематических ошибок.* Тщательный анализ всей исходной информации, сравнение записей в журналах, бланках, аналитических таблицах. Исключение дефектных материалов (например, отбраковка химических анализов подземных вод, в которых сумма анионов больше суммы катионов, расчетная минерализация меньше плотного остатка и пр.).

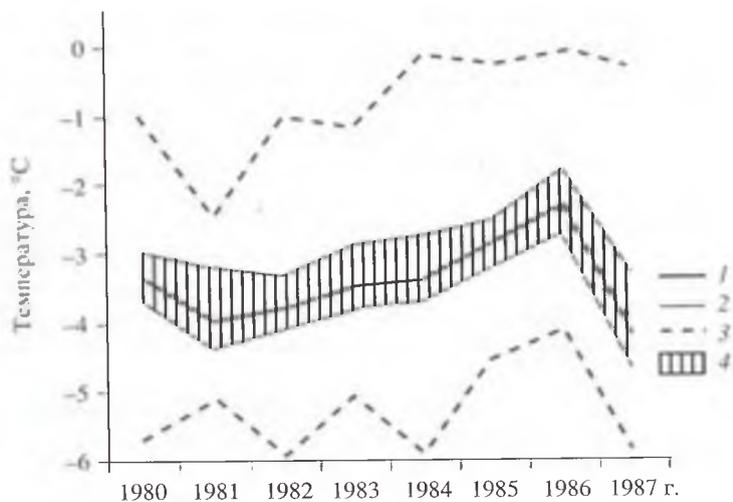


Рис. 8.1. Средняя годовая температура в гроте Бриллиантовый (1980—1987 гг.).

1—3 — по данным ежедневных замеров: 1 —  $X_{cp}$  (годовая многолетняя), 2 —  $X_{cp} \pm \Delta X$ , 3 —  $X_{cp} \pm \sigma$ ; 4 — поле пентадных, недельных, декадных и месячных замеров температур

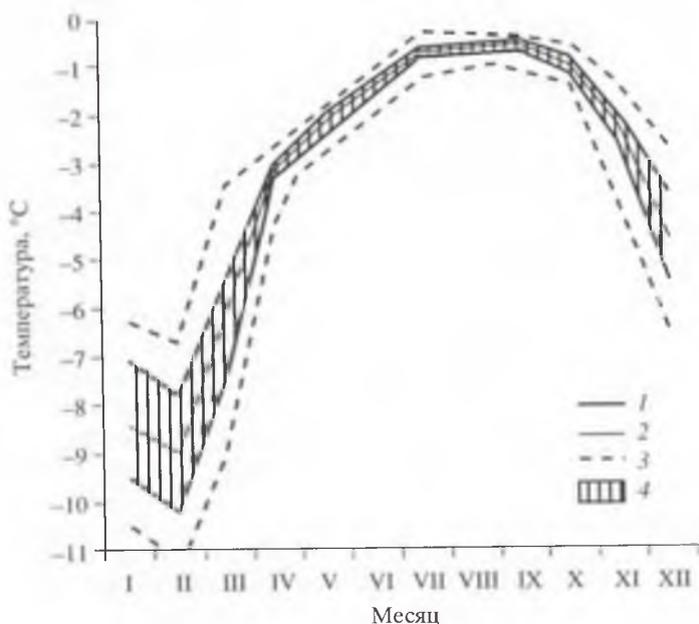


Рис. 8.2. Средняя месячная температура в гроте Бриллиантовый (1980—1987 гг.) по данным ежедневных замеров:

1 —  $X_{cp}$  — (месячная многолетняя), 2 —  $X_{cp} \pm \Delta X$ , 3 —  $X_{cp} \pm \sigma$ , 4 — поле пентадных, декадных, недельных и месячных замеров температур

2. *Оценка ошибки наблюдений.* Для каждого вида измерений определяли ошибку наблюдений  $\pm\Delta X$ : материалы топосъемки пещеры — 4 % [356], материалы химических анализов — 5 % (определение иона Na по разности сумм анионов и катионов [383], гидрометеоданные — 10 % [372]). Значения в пределах  $X_{\text{ср}} \pm \Delta X$  лежат в области ошибки наблюдений и не подлежат анализу. Например, в 1975 г. Ю. А. Ежов [153] попытался установить суточный ход минерализации воды озера в гроте Смелых (ежечасный отбор проб) и обнаружил, что суточная вариация содержаний основных компонентов не превышает 1 %. Поэтому говорить о наличии суточного хода минерализации воды в озере нет оснований.

3. *Использование статистических параметров.* Для всех анализируемых рядов рассчитаны статистические параметры ( $X_{\text{ср}}$ ,  $\sigma$ ,  $CV$ ,  $\Sigma X$  и пр.) [192]. Отбраковка “крайних” вариант производится по  $\tau$ -критерию:  $\tau = (X_{\text{макс}} - X_{\text{ср}})/\sigma$ , а затем определяются исправленные значения  $X_{\text{ср}}$ . По значениям асимметрии и эксцесса выявлено, что в большинстве случаев исследуемые признаки подчиняются модели нормального распределения. В более сложных случаях применялся критерий  $\chi^2$ . При сравнении принадлежности выборочных совокупностей к одной генеральной (химические анализы воды из разных озер и пр.) использовали критерий Стьюдента,  $t_Q$  и  $H$ -критерии, для оценки тесноты связи между двумя рядами признаков — коэффициент корреляции. При этом учитывалось не только его абсолютное значение, но и пределы колебаний, при которых для уровня значимости 5 % оправдывается нулевая гипотеза. Сглаживание рядов производилось по формуле  $(X_1 + X_2 + X_3)/3$ , а определение тренда — методом наименьших квадратов [397].

4. В качестве основы для нанесения всех данных по Кунгурской пещере создан и использован электронный план [206]. По нему рассчитаны морфометрические показатели пещеры. Для получения некоторых из них (объем пещеры, глубина озер) в 2000—2002 гг. произведены дополнительные съемочные работы [145, 369].

5. *Обработка разноточных наблюдений.* Единой методики обработки наблюдений, выполненных в разные сроки, насколько известно авторам, не существует, поэтому были построены графики многолетнего и месячного хода температур и влажности (грот Бриллиантовый), а также уровней воды в озерах (грот Длинный) для гротов, имеющих достаточно длинные ряды наблюдений и испытывающих значительные колебания этих параметров. На рис. 8.1 и 8.2 приведен пример годового и месячного хода температур в гроте Бриллиантовый (по данным ежедневных наблюдений), а также отклонения от них ( $\pm\Delta X$  и  $\pm\sigma$ ).

## Глава 9

# МОРФОЛОГИЯ

Изучение морфологии карстовых полостей базируется на их топографической съемке и включает *морфографию* (описание отдельных элементов), *морфометрию* (определение их размеров) и *морфогенезис* (выяснение происхождения отдельных элементов и всей пещеры в целом [356]). Так как дать ответ на последний вопрос можно только после рассмотрения особенностей геологии, гидрогеологии, микроклимата, отложений пещеры, ниже ограничимся изложением материалов по двум первым разделам.

### 9.1. МОРФОГРАФИЯ ПЕЩЕРЫ

Кунгурская пещера представляет собой лабиринт, состоящий из гротов и соединяющих их более узких проходов. По разным данным, в ней имеется около 50 гротов суммарной площадью приблизительно 50 тыс. м<sup>2</sup> (75 % от общей площади пещеры). Названия гротов и проходов пещеры возникли не сразу: одни из них имеют интересную историю, а происхождение других пока не выяснено. На плане Кунгурской пещеры С. Ремезова [460] гроты названий не имели. Первое упоминание о гроте Крестовый, в котором якобы имелся деревянный крест, содержится в рукописи И. Г. Гмелина [74]. Он же первым указал, что местные жители зовут пещеру “Ледяной”. В 1770 г. Кунгурскую пещеру описал руководитель академической экспедиции И. И. Лепехин. Он метко назвал один из гротов пещеры “Ледяная палата”, но это название не прижилось.

В 1814 г. И. Л. Суворов описал 24 грота, третий из них он назвал Манжетным. На плане пещеры М. Я. Китары [184] номерами обозначен 21 грот, а три из них получили названия Бриллиантовый, Резной (позднее переименован в Коралловый) и Склеп. Наиболее близкий от входа грот именовался Первым, а следующий за ним, ныне почти полностью заваленный глыбами гипса, — Вторым.

В 1914 г. в связи с началом экскурсий в пещеру новые наименования ряда гротов предложил А. Т. Хлебников. Так появились названия Атлантида, Готический, Дантов Ад, Колизей, Метеорный, Морское Дно, Руины Помпеи, Скульптурный, Титанический, Эфирный. Большинство из них сохранились до нашего времени, некоторые получили более короткое имя (Данте, Руины).

В 30-е гг. XX в. на глазомерном плане пещеры В. Я. Альтберга указаны гроты Бриллиантовый, Полярный, Склеп, Резной и Колизей. Многие названия были предложены сотрудниками топоотряда партии “Ленгидростройпроект” (грот Бирюзового озера, Близнецы, Великан, Вышка, Геоло-

гов, Грозный, Грязный, Заозерный, Ночь Осенняя, Перепутье, Переслегина, Смелых). Сотрудники отряда так увлеклись, что был издан специальный приказ по экспедиции, запрещающий давать именные названия (Надежды, Станислава и пр.). До нашего времени сохранилось только название, увековечивающее имя руководителя отряда, — грот Переслегина. В 1937 г. по предложению участников 17-го геологического конгресса грот Титанический получил имя Дружбы Народов.

В 60-е гг. XX в. ряд наименований гротам дал Е. П. Дорофеев (Вышка П, Географов, Космический), а также спелеологи Москвы, Свердловска, Ярославля (Аквалангистов, Братский, Геофизиков, Кастере, МГУ, Романтиков, ход Хрустальный, Юбилейный). Ряд эмоциональных наименований в эти же годы дали экскурсоводы (Девичьи Слезки, Мокрая Кочка, Тернистый Путь, ход Трубный, ход Горе Толстяков, Чертов Мостик).

В 1999 г. на совместном научном семинаре лаборатории-стационара Ги УрО РАН и туристско-экскурсионного отдела ЗАО “Сталагмит” были утверждены названия гротов Татищева, Хлебниковых, Лукина, Дорофеева, увековечивающие память исследователей и первых экскурсоводов пещеры.

Особняком стоят названия не существующих в наше время гротов: в 1961 г. К. А. Горбунова назвала именем Лепехина большой грот между гротами Морское Дно и Центральный, описанный им в 1770 г. Этот грот сейчас завален.

В XX в. более или менее подробные экскурсионные, природоохранные и туристические описания Кунгурской пещеры составили В. Н. Андрейчук, В. А. Весновский, А. К. Воронихин, Е. П. Дорофеев, Е. Н. Косвинцев, И. В. Ледомский, В. С. Лукин, Г. А. и Н. А. Максимович, А. П. Нечаев, А. П. Протопопов Д. В. Рыжиков, А. В. Турышев [51, 58, 129—132, 194, 203, 211, 272, 317, 357, 398]. Краткие описания пещеры как длиннейшей в СССР неоднократно приводятся в монографических работах по географии и геологии [43, 63, 260, 374, 418], а также в энциклопедиях.

Рассмотрим морфологические особенности Кунгурской пещеры.

**Направления заложения пещеры.** До XX в. этому вопросу особого внимания не уделялось. Указывалось только, что ходы пещеры не имеют строго выдержанной ориентировки, хотя в целом используют трещины СВ, С и СЗ направлений. Однако на протяжении более 60 лет, начиная с работ Г. А. Максимовича [258] и кончая исследованиями Е. П. Дорофеева и В. С. Лукина [131, 132], А. И. Печеркина [342], В. Н. Катаева [176, 178] и В. Н. Андрейчука [21] приводятся факты о приуроченности ходов, гротов и органных труб Кунгурской пещеры к трещинам, о совпадении простираний линейных спелеоформ и трещин двух основных направлений. Исследователи выделяют две взаимно пересекающиеся системы трещин, имеющие СВ (55—60°) и СЗ (330—335°) простираения.

Первые серьезные работы по изучению трещиноватости Кунгурской пещеры выполнил доцент Пермского университета В. А. Апродов [30]. Для выявления основных направлений заложения пещеры он замерил азимуты простираения коренных стен и целиков пещеры — всего 4 км стен (табл. 9.1). Все ходы ориентируются по четырем направлениям и объединяются в две сопряженные системы трещиноватости: 20° и 110° (I—II); 70° и 320° (III—IV). В системах I—II средняя ширина ходов несколько больше, чем в

Характеристика заложения галерей Кунгурской пещеры [31]

Система трещин	Азимут простирания, град.	Средняя ширина ходов, м	Коэффициент вариации	% ходов
I	СВ 20	19,0	0,46	38,0
II	ЮВ 110	16,3	0,47	22,0
III	СВ 70	13,1	0,44	21,0
IV	СЗ 320	14,6	0,54	19,0

системах III—IV. Преобладают меридионально ориентированные элементы, на которые приходится 57 % всей площади пещеры. Выявленные особенности Кунгурской пещеры В. А. Апродов связывал с особенностями движения карстовых вод и полагал, что в карстовых районах преобладающий сток направлен перпендикулярно дрене. Поэтому наиболее разработанными оказались направления трещиноватости, перпендикулярные р. Сылве.

В 1954—1955 гг. изучением трещиноватости Кунгурской пещеры занимался сотрудник стационара Б. Ф. Перевозчиков. В девяти гротах (Геологов, Географов, Длинный, Дружбы Народов, Крестовый, Морское Дно, Руины, Смелых, Центральный) он замерил 107 трещин и на основании этого недостаточно представительного материала сделал вывод о наличии в пещере двух динамопар: 40° (12,0 %) — 320° (11,0 %) и 0° (12,0 %) — 90° (6,0 %).

В 1960-е гг. геофизики МГУ провели в Кунгурской пещере опытно-методические работы. Сначала на образцах гипса и ангидрита сейсмоסקопом ИПА были определены скорости продольных волн (4900—5500 м/с). Затем произведено сейсмическое просвечивание целиков между гротами Дружбы Народов — Центральный и Дружбы Народов — Заозерный. Здесь скорость распространения волн оказалась значительно меньшей: продольных — 3600 м/с, поперечных — 2100 м/с. Это связано со значительной раздробленностью массива, благодаря которой сток карстовых вод пещеры происходит в основном не по озерам, а по целикам [5].

В 1970—1980-е гг. изучением трещиноватости Кунгурской пещеры занимался Е. П. Дорофеев. Он пришел к выводу, что ходы пещеры в основном имеют СВ (30—60°, 40 %) и СЗ (310—340°, 30 %) простирания. Поверхностные и подземные формы обнаруживают четкий структурно-тектонический контроль, используя одни направления тектонических трещин. В 1990-е гг. В. Н. Катаев [176, 177] сделал ряд важных выводов: пещера приурочена к участку пересечения СВ, СЗ и меридиональной зон тектонической трещиноватости; южный, восточный и часть центрального района по линии гротов Вышка—Атлантида—Эфирный контролируются зоной СВ простирания; центральный район к западу от гротов Вышка—Эфирный — зонами СЗ и С простирания; залы и галереи пещеры проработаны в пределах зон и участков повышенной (300—600 м/2500 м<sup>2</sup>), а целиковые участки — пониженной (менее 200 м/2500 м<sup>2</sup>) линейной плотности тектонических трещин.

Тектоническая трещиноватость нижних и верхних слоев ледянопещерской пачки различна (рис. 9.1). В нижних более жестких ангидритовых слоях зоны тектонических трещин выражены четче, а сами трещины часто не

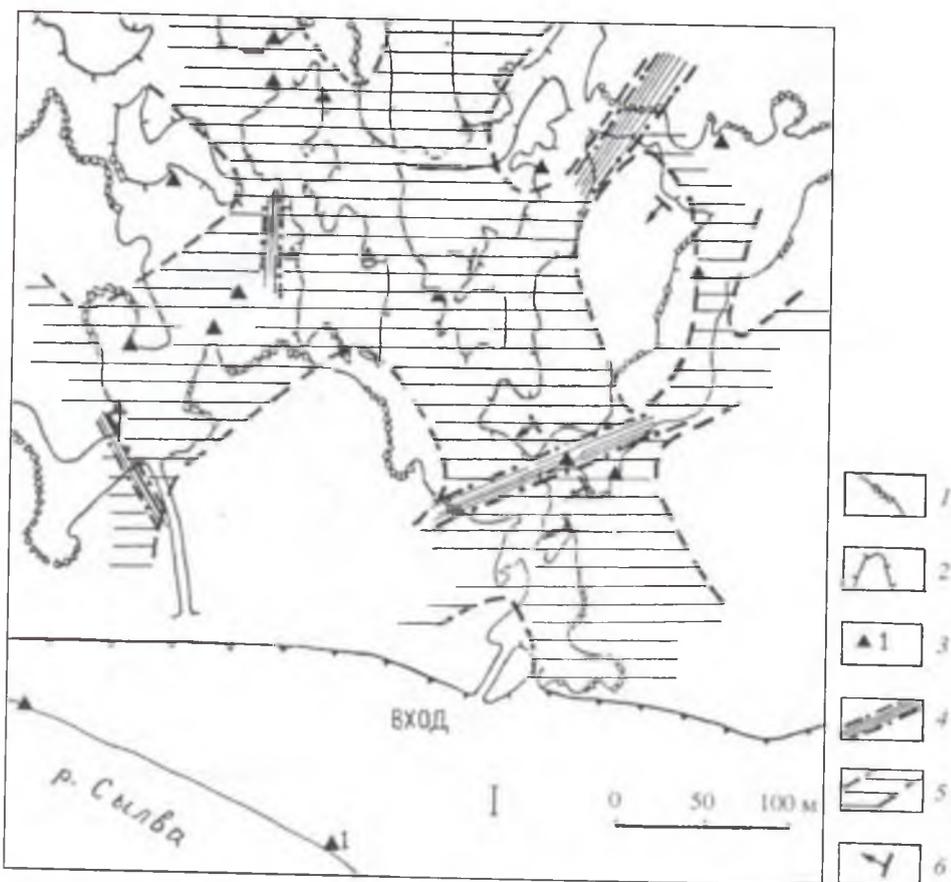


Рис. 9.1. Соотношения зон тектонических трещин в нижних и средних слоях ледянопещерной пачки [177].  
 1 — контур пещеры; 2 — крупные останцы; 3 — наблюдательные посты; 4, 5 — зоны трещин: 4 — нижних слоев, 5 — средних слоев, 6 — элементы залегания пород

имеют заполнителя. Ширина зон в этих слоях варьирует в пределах 10—25 м (гроты Данте и Центральный). Трещинные зоны в средних и верхних “гипсовых” слоях разреза более широкие (100 м и более); пространственно трещинные зоны нижних слоев ориентированы вкрест простирания трещинных зон средних и верхних слоев пачки.

**Потолки гротов.** В 70-е гг. XX в. в ближней части Кунгурской пещеры стационар выполнил съемку ее потолков (рис. 9.2). Гипсами и ангидритами сложено 97 % площади потолков и лишь 3 % — карстовой брекчией (гроты Коралловый и Метеорный, возможно — Географов). Кроме того, в описаниях пещеры имеются упоминания о находках брекчии в гротах Бриллиантовый, Руины, Морское Дно, Скульптурный и Близнецы, однако не ясно, что это за брекчия — “коренная” или из органичных труб.

Коррозионные своды занимают 10 % площади пещеры (проход Коралловый—Руины, грот Центральный, участки в гротах Хлебниковых и Геологов) и заложены в подошве ледянопещерской гипсово-ангидритовой

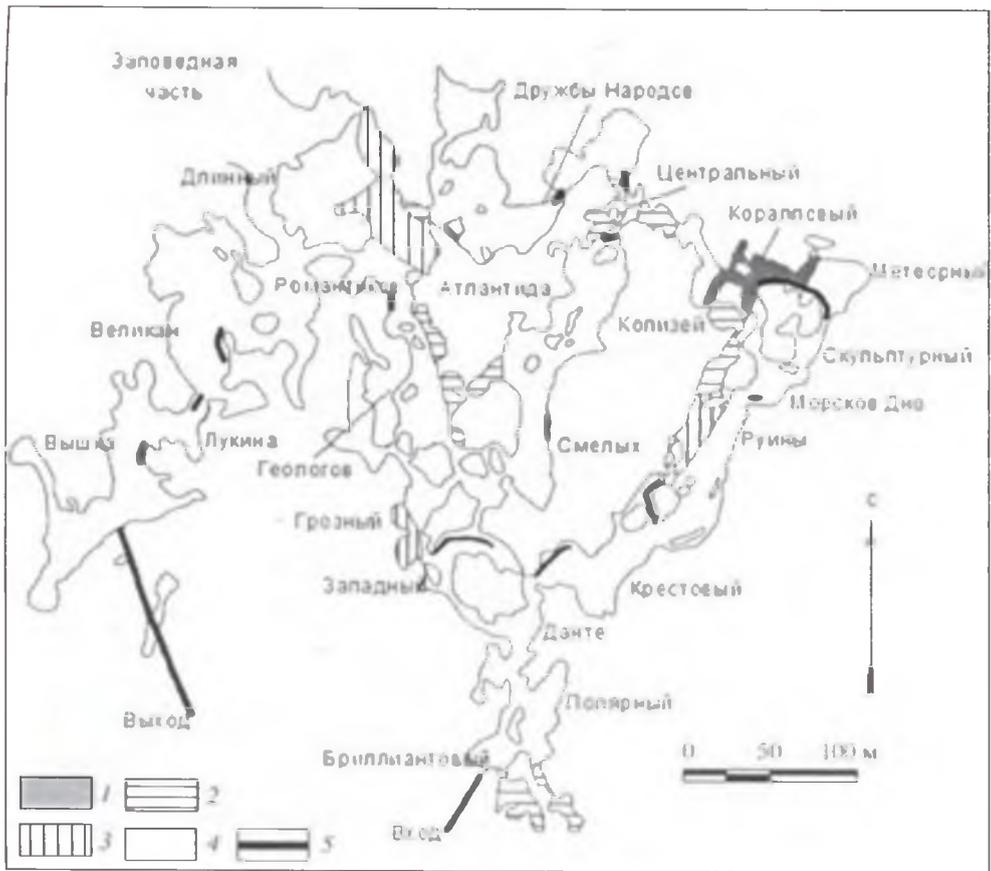


Рис. 9.2. Характер потолков в Кунгурской пещере.

1 — потолки, выработанные в карстовой брекчии; потолки, выработанные в ангидритах и гипсах; 2 — первичные коррозийные, 3 — вторичные обваловые с проявлениями карстовой тектоники, 4 — вторичные, сформированные при обрушении; 5 — техногенные потолки (в местах оборки сводов, искусственных расширениях ходов, тоннелях)

пачки в интервале высот 111—121 м. Здесь имеются немногочисленные короткие (2—10 м) отрезки разновысотных сифонных ходов, имеющих субгоризонтальную (проход Трубный, северо-западная часть грота Геологов, северная — грота Коллизей) или субвертикальную (грот Близнецов) ориентировку. Часть из них осушена, часть заполнена водой и пройдена с аквалангом. Все они образованы в зоне сифонной циркуляции [1963] и выделить среди них этажи невозможно.

Своды обрушения располагаются выше границ коррозии, занимая до 75 % площади пещеры. В отдельных случаях они достигают подошвы шалашинской гипсовой пачки (гроты Вышка, Вышка II, Космический). Так как одновременно с обрушениями возрастает мощность обваловых отложений, высота гротов не превышает 10 м. Образующиеся при этом горизонтальные потолки имеют пролеты 10 м (в гипсах, в гротах Бриллиантовый, Геологов, Данте) — 25 м (в ангидритах, грот Грязный). Иногда отмечается “провисание” потолков с величиной стрелы до 1 м (Длинный). Меж-

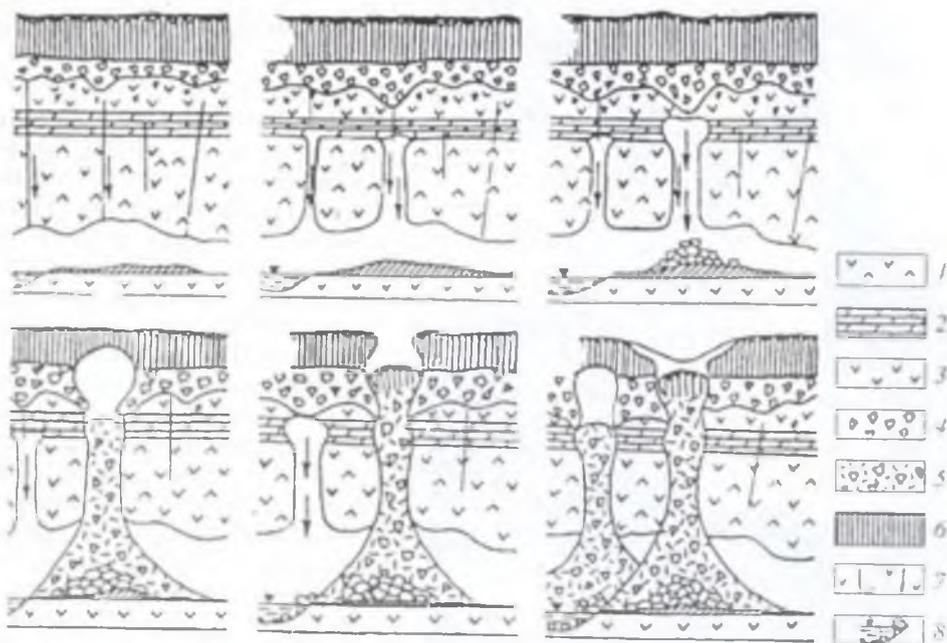


Рис. 9.3. Развитие органичных труб и образование провальных впадин над Кунгурской пещерой [438].

1 — гипс (шалаининская пачка); 2 — доломит (неволинская пачка); 3 — ангидрит и гипс (ледянопещерская пачка); 4 — карстово-обвальные отложения; 5 — обвальные отложения органичных труб; 6 — суглинок «вачов»; 7 — инфильтрация по трещинам; 8 — подземные озера

ду целиком и провисшим потолком В.С. Лукин описал эфемерные полости отслаивания, сохраняющиеся до обрушения пласта. В гроте Великан такая полость существовала до 60-х гг. XX в., пока не обрушился пласт длиной 20 м, шириной 10 м и толщиной 1—2 м. Под его обломками погребена половина озера, изображенного на более раннем плане. Отслаиванию способствуют процессы гидратации.

Следы карстовой тектоники носят 15 % потолков (район старого входа, северная часть гротов Руины и Романтиков, восточные тупики грота Геологов).

Отдельные ходы (Хрустальный) проложены в вертикальных тектонических трещинах и имеют треугольное сечение, в нижней части иногда осложненное коррозионными площадками.

**Органичные трубы** являются специфичным для Кунгурской пещеры образованием. Этот термин ввел в литературу Н. И. Каракаш [172]. В пещере обнаружено 146 труб, из них 57 — зияющие, а 89 заполнены рыхлым грунтом. На контакте ледянопещерской и неволинской пачек фрагменты горизонтальных ходов отсутствуют. Не вскрыты они также в органичных трубах.

**Образование.** Трубы формируются инфильтрационными водами. Для их развития и сохранения необходимы [203] наличие вертикальных тектонических трещин, сравнительно однородный состав надпещерных отложений и карбонатные прослои (рис. 9.3). Высота труб достигает 25 м



Рис. 9.4. Бороздчатые карры на глыбе гипса под трубой в гроте Эфирный [260]

(грот Эфирный), а поперечник колеблется от нескольких сантиметров до 9 м (грот Географов). Органичные трубы часто образуют ассоциации (в гроте Морское Дно вдоль трещин заложено 5, а в Эфирном — 3). Рядом с основной располагаются трубы меньших размеров, отделенные от нее перегородкой, исчезающей по мере их роста (гроты Вышка, Вышка II, Космический). Отсутствие в местах труб интенсивной фильтрации (гроты Великан, Геологов, Заозерный, Ночь Осенняя) связано с образованием новых трещин, “перехвативших” сток из смежных труб, находящихся на расстоянии от них до 10 м.

**Морфология.** Трубы пронизывают ледянопещерскую и доходят до неволинской пачки. На контакте сульфатных пород с доломитами расширения труб иногда сопровождаются вывалами. Например, в гроте Дружбы Народов в доломитах образовалась камера высотой около 5 м с поперечником, превышающим диаметр трубы. В продольном сечении преобладают конические трубы, иногда переходящие в щель (Шапка Мономаха); реже встречаются цилиндрические формы с плоскими потолками, разбитыми трещинами. Поперечные сечения труб имеют округлую, эллипсоидальную или более сложную форму. Стенки труб и глыбы гипса в их основании покрыты многочисленными бороздчатыми и желобковыми каррами, разделенными гребнями (грот Эфирный, рис. 9.4). Конденсационная влага формирует на стенах труб лунковые карры.

**Заполнение.** Породы неволинской пачки при размокании теряют крепость и вываливаются в трубы. Иногда их обломки застревают в трубах и цементируются карбонатными натеками в брекчию<sup>3</sup>, слагающую пробки и штоки диаметром до 3 м, а иногда вываливаются на осьшь под трубой. После обрушения в органичную трубу карбонатных пород неволинской пачки в нее начинает поступать рыхлый материал покровных отложений, в которых формируется обвальный купол. Изредка он доходит до поверхности, образуя цилиндрическую впадину на склоне Ледяной горы или на дне воронки. Сквозной провал может произойти при диаметре труб 1,5—2,0 м (грот Эфирный), в то же время обвалы не наблюдаются при диаметре 6—

<sup>3</sup> Обвальную брекчию ( $Q_4$ ), заполняющую органичные трубы, не следует смешивать с “коренной” брекчией ( $N_3-Q_4$ ), обнажающейся в стенах некоторых гротов пещеры.

8 м. На совмещенном плане ходов Кунгурской пещеры и карстовых воронок Ледяной горы прослеживается связь всех 33 крупных воронок на ее поверхности с органичными трубами и осыпями на полу пещеры [109].

Об отсутствии полостей в лежащей выше шалашнинской пачке гипсов свидетельствуют и гравиметрические исследования, проведенные в 1966 г. Институтом геофизики УФАН СССР с помощью высокоточного кварцевого гравиметра [378]. Породы, слагающие Ледяную гору, имеют разную плотность: 1,9 г/см<sup>3</sup> — четвертичные суглинки, глины, глыбы, 2,3 — гипсы шалашнинской пачки, 2,5 — гипсо-ангидриты ледянопещерской пачки, 2,7 — известняки и доломиты неволинской пачки и филипповской свиты, 3,0 — ангидриты ледянопещерской пачки. Ошибка наблюдений не превышала 0,06 мгл. Для расчета приращений силы тяжести за расчетный уровень принят средний меженный уровень р. Сылвы. Подземные наблюдения показали, что крупные гроты образуют аномалии до 0,5 мгл, которые при съемке на поверхности Ледяной горы не фиксируются.

Исследуемый участок характеризуется средней плотностью пород 2,01 г/см<sup>3</sup>: по линиям, удаленным от склона, — 2,06—2,11; по линиям, расположенным ближе к склону, — 1,91—2,02. Вариация плотностей везде незначительна ( $CV^4 = 0,009—0,044$ ). Средняя расчетная плотность по западной и центральной линиям составила 2,09 г/см<sup>3</sup>, что несколько меньше минералогической плотности пород (это указывает на огипсованность ангидритов Ледяной горы); разность между расчетной и фактической плотностями (0,21 г/см<sup>3</sup>) обусловлена наличием пустот в разрезе (степень пустотности 9 %). Мощность разреза по западной и центральной линиям составляет 67 м. Если считать, что пустоты заполнены только воздухом (плотность 0,001 г/см<sup>3</sup>), то их высота не должна превышать 6 м, а это соответствует максимальным размерам известных гротов.

Таким образом, по геофизическим данным, над Кунгурской пещерой нет полостей, соизмеримых по размерам с ее гротами (рис. 9.5), однако имеются зоны локальных плотностных неоднородностей. Для их прослеживания был использован метод подземной регистрации космических излучений [5] (см. рис. 15.7). Профиль длиной 250 м был проложен от грота Дружбы Народов до грота Смелых. Замеры произведены в семи точках по профилю. Очевидно, локальные максимумы интенсивности космического излучения соответствуют неизвестным карстовым пустотам и разрушенным зонам. При апертурном угле 36° оптимальное количество частиц, необходимых для получения погрешности не более 10 %, равно приблизительно 100. Благодаря значительной мощности (до 75 м) и большой средней плотности покрывающих пород (2,4 г/см<sup>3</sup>) для регистрации такого количества частиц необходима экспозиция продолжительностью до 2 ч.

Проведенные геофизические исследования не подтверждают предположение Г. А. Максимовича [258], К. А. Горбуновой [269] и А. Г. Чикишева [419] о наличии в Кунгурской пещере четырех этажей, коррелирующихся с террасами р. Сылвы.

В Кунгурской пещере методом микросейсморазведки с помощью одноканальной сейсмической установки ОСУ-2м с ударным возбуждением колебаний изучены разрезы под дном гротов и определена глубина залегания доломитов филипповской свиты. Работы производились в гроте Дружбы Народов, где был разбит профиль длиной около 30 м. Годограф свидетель-

<sup>4</sup>Принятое в данной монографии написание коэффициента корреляции.

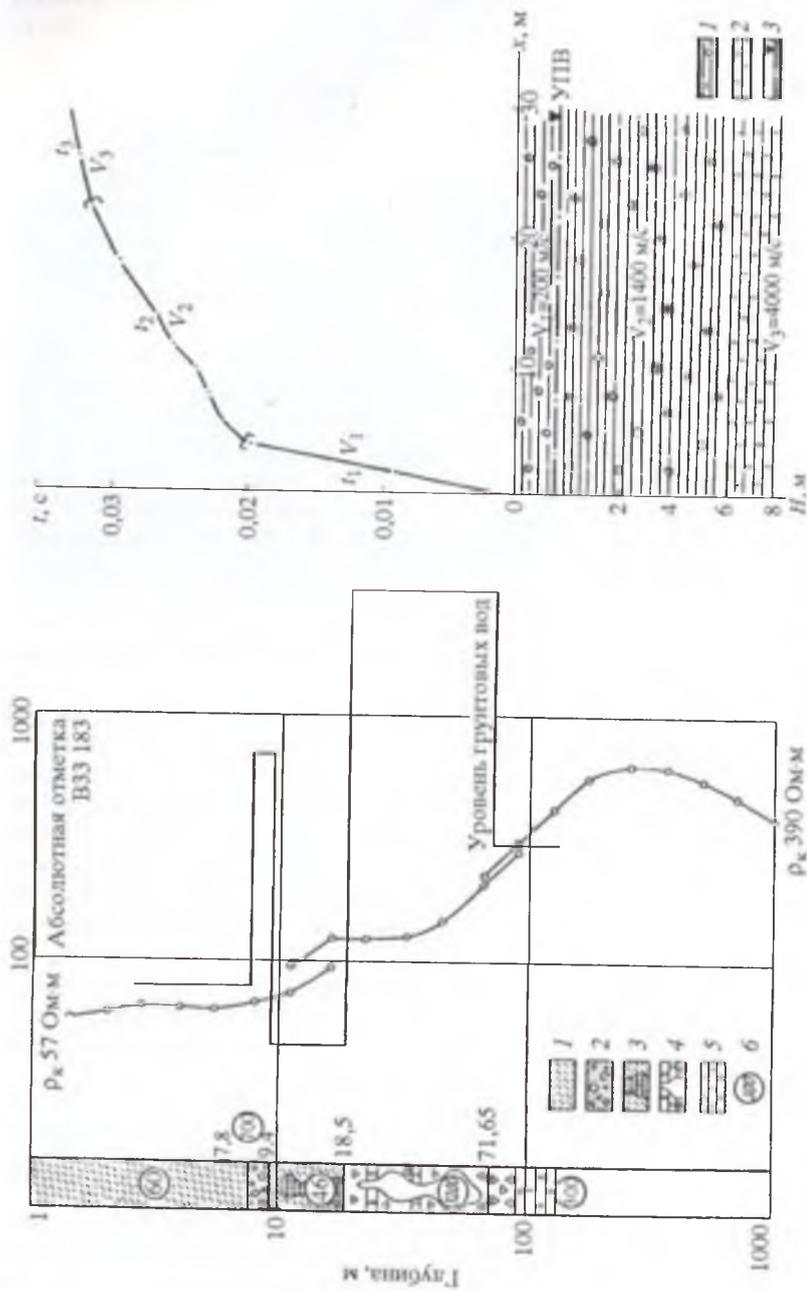


Рис. 9.5. Кривая кажущихся удельных сопротивлений карстующейся толщи Ледяной горы в районе грота Смелых [419].  
 1 — сульфат; 2 — галка и песок; 3 — глыбы брекчий в глинистых отложениях; 4 — сульфиты и карбонатные породы с разлитыми полостями; 5 — во-  
 доносимые сульфатные и карбонатные породы; 6 — удельные сопротивления (Ом м)

Рис. 9.6. Годограф преломленных волн и сейсмологический разрез грота Дружбы Народов [5].  
 1 — обломочный материал с глинистым заполнителем; 2 — доломиты; 3 — уровень подземных вод

ствует о наличии трех слоев со скоростями прохождения в них 200, 1400 и 4000 м/с (рис. 9.6). Верхний слой (мощность 1,7 м) соответствует обломочному материалу со слабоуплотненным глинистым заполнителем, средний (6,3 м) — обводненному обломочному материалу, нижний — доломитам филипповской свиты.

### **Происхождение форм мезо- и микрорельефа Кунгурской пещеры.**

Большинство популярных описаний пещеры содержит упоминания наиболее примечательных с точки зрения экскурсоводов объектов (отдельных гротов, озер, обвалившихся глыб и пр.), причем изобилуют превосходные степени — грот “гигантский”, озеро “бездонное”, глыбы “величественные”, многим из них присвоены ассоциативные названия Чудовище, Лягушка, камень Грешника и пр.

Между тем уже первые описания морфологии проливают свет на образование пещеры. Еще в начале XIX в. И. Л. Суворов [389] отмечал в пещере “большие кабаны” и свисающие со сводов “скотские головы с рогами и губами” (интересно, что в эти же годы о “бычьих головах” в гипсовой пещере у с. Нижнее Кривче в Подолии упоминал П. Ржончинский [147]); в 30-е гг. XX в. Н. К. Тихомиров писал о “гусиных лапах” и “макрогубке” на стенах пещеры; в 50-е гг. В. С. Лукин описал “лунковидные” и “бороздчатые карры”, “наклонные” и “перевернутые коррозионные площадки”. Эти исследователи в значительной мере предвосхитили более поздние работы отечественных [426] и зарубежных [446] ученых о формах пещер, возникающих в разных условиях. Их идеи в эмбриональном виде содержались также в работе В. А. Апродова [31] о карстополіномах Кунгурской пещеры. Он выделил крипто-, микро- и макрокарстопроявления, рассматривая их во взаимосвязи. Карстовый полином представляет собой единую систему полостей, объединяемую циркуляцией карстовых вод. Таким образом, В. А. Апродов еще в 50-е гг. применил в карстоведении системный подход.

В. А. Шипунова [426] при исследовании Красной пещеры в Крыму выделила по 16 признаков формирования полостей во фреатических и вадозных условиях. В качестве ведущих можно использовать лишь те из них, которые присущи “чистым”, не накладывающимся друг на друга генетическим линиям развития карстовых полостей. Поэтому в перечень не включены такие бесспорные и яркие показатели, как субаэральные водные хемогенные отложения, которые могут формироваться как в вадозных, так и во фреатических полостях, выведенных в верхние гидродинамические зоны в результате восходящих тектонических движений.

Применим этот прием к морфологическому анализу заложенной в гипсах Кунгурской пещеры.

О формировании в фреатических условиях свидетельствуют общая лабиринтовость (в плане), сифонные каналы (во многих гротах), тупиковые замыкания ходов (повсеместно), округлые сечения отдельных сохранившихся напорных каналов (Трубный проход), фасетки на стенах (описаны Н.К. Тихомировым как лунковидные карры), скальные мосты (район Трубно́го прохода и др.), “подвески” (описаны как “гусиные лапы” в гротах Грязный, Перепутье, Колизей—Центральный и пр.), сквозные отверстия в стенах и сводах, сотовые формы (гроты Коралловый (рис. 9.7), Морское Дно, Скульптурный). Очевидно, в этих же условиях образованы и наклонные площадки, описанные В. С. Лукиным. Они имеют размеры



Рис. 9.7. Фреатический канал в стене грота Коралловый



Рис. 9.8. Ячеистые карры в гроте Великан

Рис. 9.9. Желобчатые карры в гипсоангидритах ледянопещерской пачки

см<sup>2</sup>—м<sup>2</sup> и чаще всего располагаются у основании стен, образуя цоколь высотой 1—3 м (проход Трубный). Их наклон к горизонту составляет 30—50°, увеличиваясь на выступах стен и уменьшаясь в нишах. В вертикальном разрезе обычно имеют слабоогнутый профиль. На стенах целикков, сложенных массивными и слоистыми ангидритами, иногда образуют подобие черепицы. В трещиноватых породах наклонные площадки не образуются. В. С. Лукин [224] считал, что при малой скорости движения воды нижние части стен омываются водой более высокой минерализации, поэтому полость растет в ширину в верхней части, омываемой паводковыми водами, и суживается книзу. Как только участок стены выполаживается до 40—50°, на нем начинается отложение материала, замедляющее растворение.

К фреатическим образованиям следует отнести и ячеистые карры (рис. 9.8), развитые повсеместно на сводах и стенах напорных каналов.

Лунковидные формы, распространенные по всей пещере, иногда достигают нескольких метров в диаметре. Вероятно, они полигенетичны: часть из них — фреатические фресетки, часть — вадозные карры. Иногда крупные лунки (их описывают как ниши) осложнены "историчными" лунками. Так возникает "шагреновая поверхность растворения" [395] асимметричной формы, обусловленная неравномерным воздействием потока медленно движущейся воды. Специальные работы, проведенные в 30-е гг., не выявили ее упорядоченности по латерали, зато она имеется в вертикальном разрезе: верхний край лунки всегда более крутой (30—50°), чем нижний (10—20°), на нем накапливается растворенный материал, замедляющий растворение. Эти наблюдения предвосхищают значительно более поздние работы А. Бегли [440], в которых он обосновывает формирование фасеток.

Встречается гладкая поверхность с небольшими бороздами, развитыми по трещинам (грот Западный) или покрытая лунковидными каррами (грот Колизей). Иногда на их поверхности выступают "ядра" менее растворимых ангидритов (гроты Геологов и Длинный), а торцы перерывает бахрама нерастворимых доломитовых включений.

О формировании в вадозных условиях свидетельствуют трещинное выклинивание ходов (повсеместно), полигональные сечения ходов, эрозионные камишы ("органичные трубы"), желобчатые карры, глыбово-обвальные отложения, поступившие с поверхности (аллохтонные) песок, галька и гравий. В. С. Лукин [224, 225] первым выделил "перевернутые площадки", образующиеся у потолков гротов, заложенных в массивных или слоистых ангидритах. Они располагаются в 3—4 м выше межвенного уровня озер, имеют площадь см<sup>2</sup>—м<sup>2</sup>, высоту "ступеней" 0,5—20,0 см. Наиболее крупные площадки описаны в гроте Центральный (длина 8—10 м, ширина 3—4 м).

Реперные наблюдения показали, что преимущественное растворение пород идет в торцах ступеней, особенно интенсивно при горизонтальном залегании пластов слоистых ангидритов. При наклонном залегании горизонт площадок "срезает" пласты (гроты Вышка, Длинный, Центральный). Это свидетельствует о наиболее вероятном их образовании при задержке уровня подземных вод, различного в разные годы. Детальные nivelировки уровней, проведенные в двух гротах пещеры [224], показали, что они почти горизонтальны. Небольшой уклон площадок (в гроте Дружбы Народов — до 10°), возможно, связан с более поздней пластической деформацией пластов.

Желобчатые карры (рис. 9.9) формируются в ангидритах, не подвергшихся гидратации (гроты Атлантида, Дружбы Народов, Колизей, Романтиков, Центральный), и представляют собой расширенные растворением вертикальные трещины. Обычно они неглубоки, но на их продолжении прослеживается залеченная трещина с зонами гидратации по краям. В ангидритах, подвергшихся гидратации, на стенах и глыбах вследствие избирательного растворения образуются горизонтальные борозды (гроты Геологов, Западный). Иногда они углубляются на метр и более в породу, образуя ниши, выклинивающиеся ходы, “заколы” по трещинам напластования, по которым происходит отслаивание плиток и блоков (грот Грязный).

В. Н. Андрейчук [27] детально описал широко распространенные в Кунгурской пещере ходы с полигональными сечениями пяти- и шестигульной формы. Подобные сечения — результат колебаний уровней пещерных вод, тесно связанных с водами р. Сылвы. Они формируются в зоне между максимальными и несколько ниже средних уровней воды подземных водоемов. При повышении уровней вода растворяет неровности и выступы на сводах и превращает их в горизонтальные поверхности, которые прослеживаются иногда на значительной площади. В поперечном разрезе ходов они являются верхней горизонтальной линией полигональных сечений. Образование их наклонных и вертикальных поверхностей происходит по тектоническим трещинам.

О влиянии вод р. Сылвы, в паводки периодически вторгающихся в массив Ледяной горы через гроты Вышка — Лукина — Длинный, свидетельствуют следы коррозии на их стенах, имеющие отметки 120,62 м (гроты в 100—200 м от реки); 120,50 (200—300 м) и 120,44 (300—400 м).

При изучении морфологии Кунгурской пещеры составлены типовые описания всех ее гротов, сводные таблицы встречаемости признаков полостей, выработанных во фреатических и вадозных условиях, таблицы распределения разных отложений по гротам.

## 9.2. МОРФОМЕТРИЯ ПЕЩЕРЫ

К основным морфометрическим показателям любой пещеры относятся [356] протяженность (м), средняя ширина (м), средняя высота (м), амплитуда (м), площадь ( $m^2$ ), объем ( $m^3$ ), коэффициент Корбеля (сотни м), удельный объем ( $m^3/m$ ), коэффициент площадной закарстованности (доли единицы). По мере накопления наших знаний о Кунгурской пещере эти показатели также менялись. Рассмотрим данные за 1935, 1965, 2001 и 2003 гг. (табл. 9.2).

**Протяженность.** В 1848 г. М. Киттары указал, что длина обследованных ходов Кунгурской пещеры составляет 0,8 км. Ее общая длина до начала XX в. оценивалась “более 10 км”. Считалось, что в ней имеется 10—20 гротов. В 1935 г. по результатам съемки “Гидростройпроекта” границы известной части пещеры расширились, что положило конец фантастическим предположениям о “подземном городе” [209]. Длина пещеры составила 4,6 км. Исследования Кунгурского стационара и спелеологов страны позволили увеличить ее к 1965 г. до 5,6 км, а к 1983 г. — до 5,7 км [232].

**Средняя ширина.** Первым цикл морфометрических измерений в пещере произвел в 1949 г. В. А. Апродов. Выполненные через каждые 5 м

Изменения морфометрических показателей Кунгурской пещеры Таблица 9.2

Параметр	Год исследований				
	до 1935	1935	1965	2001	2003
Длина ( $L$ ), м	2—10	4600	5600	5700	5700
Средняя ширина ( $b_{ср}$ ), м	—	19,3*	—	11,4**	11,4**
Средняя высота ( $h_{ср}$ ), м	—	3,0*	2,9**	3,0	3,0
Амплитуда ( $Am$ ), м	—	—	—	—	а) 2,8* б) 3,2**
Площадь ( $S$ ), тыс. м <sup>2</sup>	—	88,7	—	30 (+27/-3)	32 (+27/-5)
Объем ( $V$ ), тыс. м <sup>3</sup>	—	266	150	65,0	65,0
Коэффициент Корбеля ( $Q$ ), LBA, сотни м	—	—	—	195	206
Удельный объем ( $Q_{уд}$ )	—	—	26,7****	—	а) 182** б) 230***
Коэффициент площади закарстованности ( $K_{з}$ )	—	—	17,9****	—	36,1
$S_{пещ}/S_{бл}$	—	—	—	—	—
Количество гротов, шт.	10—20	> 20	40	45	0,28
Количество озер, шт.	—	36	50	50	45
					70*

- \* Средние по времени замерам.  
 \*\* По формулам  $V/L$ ,  $S/L$  и  $V/S$ .  
 \*\*\* По формуле Симпсона.  
 \*\*\*\* По Г. А. Максимиовичу [260].

замеры (250 шт.) дали среднюю ширину гротов 19,3 м. Распределение ширины многомодально и не поддается геолого-карстологической интерпретации. В дальнейшем средняя ширина была определена как площадь пещеры (планиметрирование), деленная на протяженность и оказалась существенно меньшей (11,4 м).

**Средняя высота.** В. А. Апродов выполнил по оси теодолитного хода 100 замеров высоты. Их распределение подчиняется биномиальному закону с четко выраженной левосторонней асимметрией. Средняя высота составила 3,0 м. Расчет средней высоты с учетом данных 12 поперечных профилей через характерные залы пещеры снизил ее до 2,9 м. В 2002 г. были проведены специальные трудоемкие работы по построению поперечных профилей пещеры [145]. Для замеров недоступных расстояний применялся лазерный дальномер РД-20. Всего было промерено 68 сечений, а их общее число (с учетом сечений В.А. Апродова), достигло 80. Были определены их площади и по каждому сечению получена средняя высота. Кроме того, были использованы данные по продольному профилю, построенному по оси теодолитного хода (100 точек). Средневзвешенная высота пещеры, рассчитанная по этим данным, составила 2,8 м.

**Амплитуда.** Амплитудой в пещере называют расстояние по вертикали между самой высокой и самой низкой точками. Высшей точкой пещеры считался верх органичной трубы в гроте Эфирный (+22 м над входом). Топоъемка Кунгурского стационара дала максимальную отметку в

гроте Вышка II (+27 м над уровнем озера). В озерах пещеры в акваланге удалось опуститься на глубину –5 м. Таким образом, амплитуда Кунгурской пещеры составляет 32 м.

Площадь. До внедрения компьютерных технологий площадь пещеры рассчитывалась как произведение длины на среднюю ширину хода. По данным съемки 1935 г. она составляла 88,7 тыс. м<sup>2</sup>. Е. П. Дорофеев [107], выполнив планиметрирование составленного им плана пещеры, привел более “осторожную” цифру — 52,0 тыс. м<sup>2</sup>. И. А. Лавров [206], произведя расчет площади в программе “Mapinfo Professional”, получил наиболее точную величину 65,0 тыс. м<sup>2</sup>, которая и принята авторами как окончательная.

Объем — наиболее трудно определяемый параметр пещеры. Чаще всего его рассчитывают как произведение площади на среднюю высоту. В. А. Апродов [31] оценил объем полости в 266,4 тыс. м<sup>3</sup> (88,8 тыс. м<sup>2</sup> × 3,0 м). По данным Е. П. Дорофеева [107], она несколько меньше — 150,8 тыс. м<sup>3</sup> (52,0 тыс. м<sup>2</sup> × 2,9 м).

Мы использовали для расчета объема пещеры два разных метода. Первый из них — традиционный. Приняв площадь пещеры за 65,0 тыс. м<sup>2</sup> и уточненную среднюю высоту 2,8 м, получим объем пещеры 182 тыс. м<sup>3</sup>. Второй путь расчета — нетрадиционный [356]. Он заключается в определении площадей сечений пещеры (рис. 9.10) и поэлементном расчете объема пещеры с использованием средних площадей сечения по формуле Симпсона

$$V = L(S_1 + 4S_2 + S_3),$$

где  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  — площади 1—3-го сечений, м<sup>2</sup>, а  $L$  — расстояние между ними, м. Трудоемкий расчет по этой формуле и суммирование всех частных объемов дали итоговую цифру 230 тыс. м<sup>3</sup>. Наиболее точный объем пещеры на уровне наших сегодняшних знаний и технических возможностей среднее арифметическое 206,0 тыс. м<sup>3</sup> [169].

Коэффициент Корбеля. Для крупной пещеры это объем призмы, в которую она вписана (сотни метров). По Г. А. Максимовичу он равен 26,7, по нашим данным — 11,7.

Удельный объем. Г. А. Максимович [264] ввел понятие об удельном объеме (миделевом сечении) пещеры, который рассчитывается как частное от деления объема полости на ее протяженность. По его данным он составил 17,9, а по нашим — 36,1 м<sup>3</sup>/м.

Коэффициент площадной закарстованности ( $K_s$ ). Определяется как отношение площади пещеры к площади наименьшего выпуклого многоугольника, проведенного по ее крайним точкам. Для обеспечения большей сравнимости показателей А.Б. Климчук [189] предлагает определять площадь пещерного массива как площадь выпукло-вогнутого многоугольника, описывающего пещеру. Для Кунгурской пещеры эти площади составляют 363,5 и 229,4 тыс. м<sup>2</sup>, а рассчитанные по ним  $K_s$  0,18 и 0,28 соответственно. Значения коэффициента площадной закарстованности свидетельствуют о вероятном формировании Кунгурской пещеры в закрытых гидрогеологических условиях.

Коэффициент связности. Для лабиринтовой Кунгурской пещеры коэффициент связности (отношение числа пересечений к площади полости [21]) составляет 0,0005, что свидетельствует о значительной ее разветвленности.



Рис. 9.10. Схема определения морфометрических параметров Кунгурской пещеры. 1 — направления сечений пещеры, выполненных по замерам стационара в 1949 (а) и 2002 (б) гг.; 2 — параметры призма Корбеля; 3 — контур выпуклого многоугольника, вмещающего пещеру ( $S_{обл}$ ); 4 — контур выпуклого многоугольника, описывающего пещеру ( $S_{опис}$ ).

В 70-е гг. Кунгурская Ледяная пещера имела аномально высокие по отношению к другим 84 гипсовым пещерам Приуральской спелеологической провинции показатели: на ее долю приходилось 48 % их общей длины, 58 % — объема и 63 % — площади [332]. К концу XX в. количество известных гипсовых пещер области увеличилось с 84 до 158 [346], и эти показатели несколько изменились. Однако их определение до составления кадастра пещер невозможно.

**Морфометрия гротов пещеры.** Интересны сведения об удалении гротов от р. Сылвы (по прямой): в 500—600 м от нее находятся гроты Бирюзовое оз., Грязный, Переслегина; 400—500 м — Близнецы, Географов, Заозерный, Коралловый, Метеорный, Мокрая Кочка, Морское Дно, Перепутье, Скульптурный, Центральный, Эфирный; 300—400 м — Атлантида, Вышка II, Геофизиков, Длинный, Дружбы Народов, Колизей, Космический, Ночь Осенняя, Романтиков, Руины, Смелых, Хлебниковых; 200—300 м — Великан, Геологов, Грозный, Данте, Западный, Крестовый, Полярный, Скандинавский, Склеп; 100—200 м — Аквалангистов, Братский, Бриллиантовый, Вышка, Лукина.

Для дальнейших исследований важно знать морфометрические параметры отдельных гротов пещеры. В 1960 г. Е. П. Дорофеев определил их по заявке геофизиков ПГУ, в 2000 г. И. А. Лавров существенно уточнил их по электронному плану пещеры. В табл. 9.3 приведены данные о морфометрии всех гротов (для удобства пользования — в алфавитном порядке). Длина, ширина и площадь гротов определены по их стенам, без учета заполнителя.

**Длина.** Залы длиной 20—60 м составляют 61 % (в том числе: гроты длиной 20—30 м — 13 %, 31—40 м — 16 %, 41—50 м — 20 %, 51—60 м — 12 %); 18 % гротов имеют длину 61—90 м (в том числе: длиной 61—70 м — 7 %, 71—80 м — 7 % и 81—90 — 4 %). Остальные гроты имеют меньшую частоту встречаемости. Самые длинные гроты пещеры в экскурсионной части — Длинный (196 м), а в заповедной — Грязный (144 м) и Географов (136 м).

**Ширина.** Распределение по ширине более равномерное: 50 % гротов — 11—20 м, 32 % — 21—30 м, 11 % — до 10 м и лишь 7 % — более 30 м. Самые широкие гроты пещеры: в экскурсионной части — Великан (49 м), Вышка (28 м) и Дружбы Народов (27 м), в заповедной — Географов (37 м) и Грязный (36 м).

**Высота.** Замеры высоты до применения лазерных дальномеров представляли большую сложность, тем более в Кунгурской пещере, значительная часть гротов которой занята глыбовыми навалами. Поэтому к приводимым ниже цифрам надо относиться осторожно — это высоты, рассчитанные как разность отметок свода и пола грота: 66 % гротов имеют высоту до 6 м, 18 % — 6—10 м, 11 % — 11—15 м и 5 % — более 15 м. Наибольшую высоту имеют гроты Вышка и Вышка II (в среднем по 17 м) и грот Великан (средняя высота 12 м).

**Площадь.** Замер проективной площади гротов пещеры производится с ее плана. Площадь до 500 м<sup>2</sup> имеют 29 % гротов, 500—1000 м<sup>2</sup> — 29 %, 1000—1500 м<sup>2</sup> — 11 %, 1500—2000 м<sup>2</sup> — 13 %, более 2000 м<sup>2</sup> — 18 %. Самые крупные по площади гроты: Грязный (5,1 м<sup>2</sup>), Географов (5,0 тыс. м<sup>2</sup>), Великан (3,9 м<sup>2</sup>), Длинный (3,5 м<sup>2</sup>). Грот Дружбы Народов (2,3 тыс. м<sup>2</sup>), разме-

Таблица 9.3

## Морфометрическая характеристика гротов Кунгурской пещеры

№	Грот	Длина, м	Средняя ширина, м	Высота, м	Площадь, м <sup>2</sup>	Средняя отметка, м			Средняя высота кровли, м	Расстояние от р. Сыды, м
						земная поверхность	свод	пол		
1	Аквалангистов	31	14	2	429	188	115	113	73	320
2	Атлантида	20	13	7	250	187	120	113	67	320
3	Оз. Бирюзовое	94	24	2	2229	197	115	113	82	540
4	Близнецы	58	20	3	1171	199	116	113	83	460
5	Братский	52	13	2	650	183	115	113	68	300
6	Бриллиантовый	33	13	3	426	165	123	120	42	160
7	Великан	80	49	12	3902	182	125	113	57	220
8	Вышка	121	28	17	3379	177	140	113	37	100
9	Вышка II	70	26	17	1838	192	140	113	52	360
10	Географов	136	37	12	4986	194	125	113	69	460
11	Геологов	72	23	9	1624	185	123	114	60	250
12	Геофизиков	23	19	4	439	189	118	113	71	360
13	Грозный	34	17	6	593	182	122	116	60	240
14	Грязный	144	36	3	5134	195	116	113	79	520
15	Данте	36	16	4	577	175	122	118	53	230
16	Длинный	196	18	5	3533	193	118	113	75	360
17	Дорофеева	47	20	6	934	190	140	113	50	340
18	Дружбы Народов	86	27	4	2314	193	117	113	76	380
19	Заозерный	57	16	4	901	191	117	113	74	440
20	Западный	18	14	4	255	178	120	116	58	210
21	Колизей	74	25	12	1812	190	125	113	65	380
22	Коралловый	43	10	3	424	188	119	117	69	460
23	Космический	50	22	5	1088	194	140	135	54	350
24	Крестовый	82	22	11	1802	181	128	117	53	280
25	Лукина	50	21	7	1064	182	120	113	62	190
26	МГУ	13	5	2	66	186	120	117	60	480
27	Метеорный	44	19	8	829	186	125	117	61	480
28	Мокрая Кочка	23	16	4	375	192	118	114	74	440
29	Морское Дно	36	14	4	521	184	120	116	64	410
30	Ночь Осенняя	43	21	5	891	189	118	113	71	360
31	Первый	39	10	3	396	165	123	120	42	150
32	Перепутье	57	15	5	834	189	128	113	61	410
33	Переслегина	37	14	2	536	200	115	113	85	510
34	Полярный	51	19	3	984	175	122	119	53	200
35	Романтиков	50	18	3	876	192	117	113	75	370
36	Руины	93	23	5	2154	182	122	117	60	360
37	Скандинавский	28	10	5	277	175	123	118	52	200
38	Скульптурный	23	15	3	337	184	120	116	64	450
39	Смелых	99	19	5	1842	185	120	115	65	300
40	Тернистый Путь	67	23	12	1534	194	125	113	69	430
41	Хлебниковых	50	28	7	1387	188	120	113	68	340
42	Ход Хрустальный	67	7	0,5	465	197	115	113	80	600
43	Центральный	20	14	4	275	193	120	116	73	440
44	Эфирный	41	21	7	880	194	140	115	54	460
Среднее по гротам		59	19	6	1300	187	123	115	64	355



Рис. 9.11. Кунгурская пещера и ее вероятные продолжения.

1 — контур полости; Ледяная гора: 2 — подошва склона, 3 — обрывистая бровка, 4 — воронки на Ледяной горе; 5 — конусы осыпания в пещере; 6 — реконструкция галерей, входы в которые закрыты гравитационными отложениями (по Е. П. Дорофееву)

рами которого так восхищаются экскурсанты, по площади занимает 6-е место, уступая перечисленным крупнейшим гротам, а также гроту Вышка.

Объем гротов отдельно не подсчитывался.

Анализ всех материалов по трещиноватости пород района пещеры, материалов геофизической разведки над пещерой, радиопросвечивания под землей, морфологии пещеры и распределения карстовых форм над ней позволил Е. П. Дорофееву выполнить палеогеографическую реконструкцию ходов пещеры, ныне недоступных из-за обвалов сводов и высыпания рыхлого материала из органичных труб (рис. 9.11). Вероятная длина неизвестных ходов пещеры составляет более 3 км.

## Глава 10

### ГИДРОГЕОЛОГИЯ

Вопрос о принадлежности подземных озер Кунгурской пещеры к гидрологическим или гидрогеологическим объектам считается до сих пор дискуссионным. Г. А. Максимович [260] и Г. Триммель [461] описывают подземные озера как гидрологические элементы пещер. Позднее Г. А. Максимович [266] отнес озера Кунгурской пещеры к подземно-проточному ("кунгурскому") типу, который находится в зоне горизонтальной циркуляции карстовых вод, подчеркивая этим их гидрогеологическую сущность. Нами все водоявления Кунгурской пещеры рассматриваются как элементы ее гидрогеологии.

По данным первых исследователей пещеры [239, 256], в ней насчитывалось 36 озер. После топосъемки в 60-е гг. их число возросло до 60. В литературе конца XX в. упоминается о 50 озерах [29, 204]. Расхождения объясняются тем, что количество озер в разные сезоны года меняется, а небольшие озера были засыпаны при благоустройстве туристского маршрута или промерзали после проходки выходного тоннеля. Поэтому указание их точного числа без даты подсчета не имеет смысла [107, 110]. По данным съемки, выполненной Е. П. Дорофеевым и обработанной в программе *MapInfo*, на электронном плане пещеры выделено 70 озер [206]. Двенадцать наиболее крупных озер (гроты Дружбы Народов, Аквалангистов, оз. Бирюзовое, Великан, Географов (северное и южное), Грязный, Дорофеева, Ночь Осенняя, Длинный, Длинный—Близнецы, Романтиков) имеют площадь в межень 100 м<sup>2</sup> и более. Наибольшее озеро (1460 м<sup>2</sup>) находится в гроте Дружбы Народов. Озера располагаются у основания ангидритовых стен пещерных галерей на расстоянии 120—580 м от реки и имеют глубину до 5 м. Наличие поноров на дне озер свидетельствует о возможности поглощения воды или ее подтока из филипповского горизонта, однако прямых доказательств этому нет.

Первые замеры уровней воды в озерах пещеры выполнены в 30-е гг. XX в. Они производились по временным рейкам, не привязанным к геодезической сети. К сожалению, журналы с записями не сохранились. Регулярные ежемесячные замеры начались с 1954 г. и проводились на озерах семи гротов (Атлантида, Бриллиантовый, Геологов, Грозный, Дружбы Народов, Колизей, Смелых). В 1959—1975 гг. наблюдения были прерваны. В 1974—1975 гг. в гротах Длинный, Дружбы Народов и Крестовый установили самописцы ГР-38, а остальные посты оборудовали постоянными водомерными рейками, увязанными с геодезической сетью. В 1976—1996 гг. наблюдения проводились на озерах 12 гротов (рис. 10.1):

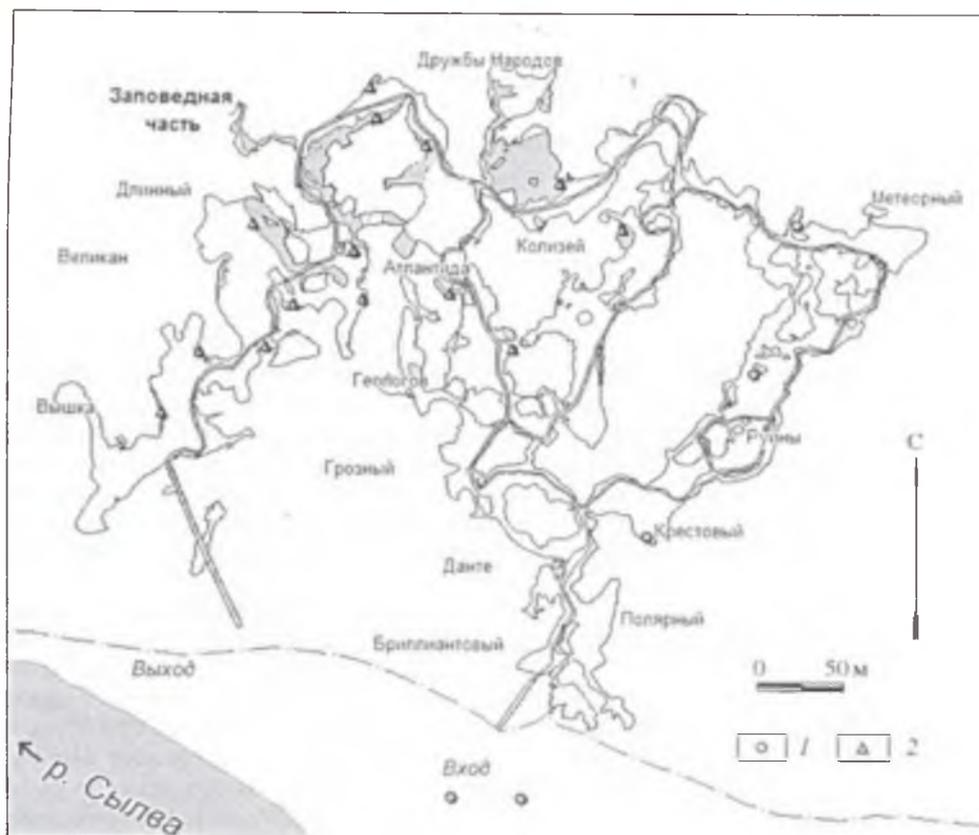


Рис. 10.1. Размещение уровневых постов (1 — в скважинах, 2 — на озерах) в Кунгурской Ледяной пещере и на прилегающей территории

Атлантида, Бриллиантовый, Великан, Геологов, Грозный, Длинный (северное, восточное и южное), Дружбы Народов, Коллизей, Лукина, Романтиков. Уровни измеряли по стационарным рейкам с делениями через 1 см, установленными на дне озер или на стенах гротов. Точность измерений 5 мм.

Кроме того, замеры производили в трех скважинах в пещере, а также в скважинах и колодцах у входа в пещеру. Уровни замеры гидromетрической рулеткой от репера, касание грузом воды наблюдали с помощью фонаря. Точность измерений 2 мм. В 1950—1995 гг. замеры уровней воды в р. Сылве.

Всего в 1952—1996 гг. выполнено около 6,2 тыс. замеров уровней, однако по годам и озерам они распределяются неравномерно. В табл. 10.1 приведены данные по водопунктам, имеющим наиболее продолжительный ряд наблюдений.

Таблица 10.1

**Многолетние уровни воды по водопунктам у Кунгурской пещеры**

Водопункт	Количество лет	Уровень						Амплитуда		
		средний		максимальный		минимальный		макс.	мин.	средняя
		м	CV	м	дата	м	дата			
<i>Скважины в пещере</i>										
Коралловый	23	114,49	0,006	115,83	V.85	113,61	III.93	1,98	0,24	0,81
Крестовый	11	113,31	0,013	116,24	V.87	112,20	IX.55	2,97	0,99	1,98
Руины	23	113,46	0,009	116,35	V.87	112,75	IX.77	3,12	0,51	1,63
Мокрая Кочка*	4	113,75	0,008	114,23	V.57	113,54	V.54	0,69	0,57	0,47
<i>Озера в пещере</i>										
Колизей	22	113,37	0,009	115,29	V.85	112,75	I.82	2,90	0,52	1,42
Дружбы Народов	23	113,34	0,008	115,56	V.87	112,49	XI.55	2,30	0,59	1,16
Романтиков	18	113,32	0,005	114,87	V.81	112,80	X.77	2,04	0,59	0,89
<b>Среднее</b>	<b>22</b>	<b>113,34</b>	<b>0,007</b>	<b>115,23</b>		<b>112,68</b>		<b>2,54</b>	<b>0,57</b>	<b>1,16</b>
Геологов	23	113,22	0,010	114,94	IV.95	112,24	X.55	1,92	0,27	1,05
Атлантида	21	113,23	0,009	114,86	V.81	112,12	XI.54	2,22	0,31	0,98
<b>Среднее</b>	<b>22</b>	<b>113,22</b>	<b>0,009</b>	<b>114,90</b>		<b>112,18</b>		<b>2,07</b>	<b>0,29</b>	<b>1,00</b>
Длинный										
южное	20	113,37	0,008	115,25	V.85	112,82	X.82	2,13	0,21	0,93
восточное	18	113,35	0,006	115,26	V.85	112,81	X.82	1,75	0,31	1,04
северное	18	113,36	0,006	114,99	V.85	112,83	X.77	1,96	0,26	0,88
<b>Среднее</b>	<b>18</b>	<b>113,36</b>	<b>0,007</b>	<b>115,26</b>		<b>112,82</b>		<b>2,13</b>	<b>0,21</b>	<b>0,95</b>
Вышка	20	113,52	0,005	115,25	V.85	113,08	VIII.88	2,48	0,30	1,24
Лукина	9	113,44	0,005	115,25	V.85	112,89	XI.89	2,42	0,30	1,29
Великан	18	113,41	0,006	114,93	IV.95	112,64	V.82	2,04	0,30	0,86
<b>Среднее</b>	<b>18</b>	<b>113,46</b>	<b>0,005</b>	<b>115,10</b>		<b>112,87</b>		<b>2,41</b>	<b>0,30</b>	<b>1,13</b>
Колодцы и скважины у пещеры	7	113,52	0,017	115,60	VI.79	112,55	IX.77	2,0	1,60	1,74
Река Сылва	62	113,22	0,037	117,06	V	112,02	II	0,72	4,34	1,94

\* Озеро в гроте Мокрая Кочка отнесено к группе скважин по сумме признаков, рассмотренных в тексте.

## 10.1. УРОВНИ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ В ПЕЩЕРЕ

Все предшествующие исследователи [98, 113, 218, 399, 449 и др.] рассматривали данные по скважинам совместно с озерами. В настоящей работе они впервые рассматриваются как отдельная совокупность, дающая информацию об изменениях уровня в иренском водоносном комплексе. В Кунгурской пещере имеются три скважины с длинными (12—23 года) рядами наблюдений — в гротах Коралловый, Крестовый и Руины (см. рис. 10.1).

Установлено, что средние годовые уровни воды в скважинах на 0,26—0,68 м выше, чем в озерах (см. табл. 10.1 и рис. 10.2), следовательно, иренский водоносный комплекс питает озера Кунгурской пещеры.

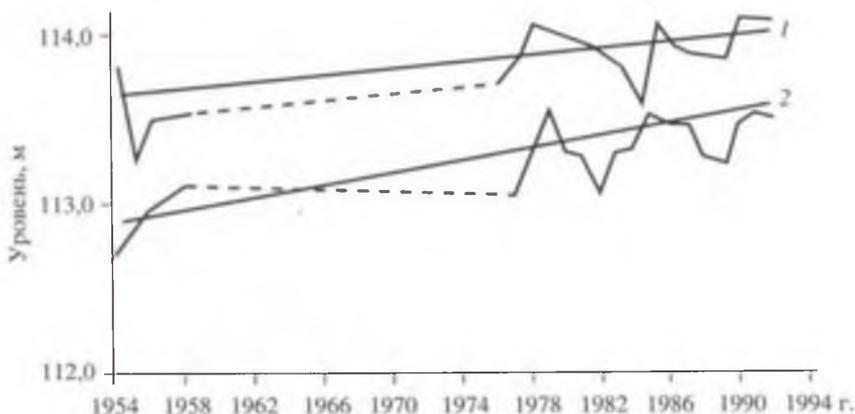


Рис. 10.2. Среднегодовые уровни воды в скважинах (1) и озерах (2) Кунгурской пещеры

На протяжении 30 лет прослеживается увеличение уровня воды в скважинах (положительный тренд с интенсивностью 0,010 м/год). Между многолетними уровнями воды в скважинах и озерах имеется невысокая, но статистически достоверная связь ( $r = 0,50 \pm 0,11$ ). Так как рост уровня озер за этот период выше, чем в скважинах, можно предполагать, что они имеют еще один источник питания (подток из филипповского горизонта или из р. Сылвы).

Сказанное подтверждает и месячный ход уровней воды (рис. 10.3, табл. 10.2): на протяжении всего года уровни воды в скважинах выше, чем в озерах. В гроте Мокрая Кочка он близок к ходу уровней в скважинах. Коэффициент корреляции между ними  $r = 0,92 \pm 0,12$ , что ставит под сомнение предположение о его подвешенности [109].

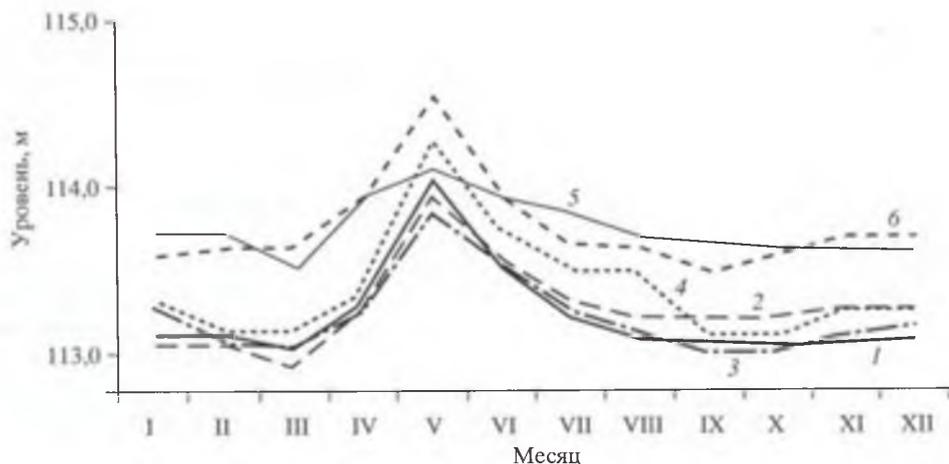


Рис. 10.3. Ход средних месячных уровней воды в озерах Кунгурской пещеры.  
 1 — Вышка, Лукина, Великан; 2 — Длинный (северное, восточное, южное); 3 — Атлантида, Геологов, Грозный;  
 4 — Колизей, Дружбы Народов, Романтиков; 5 — Мокрая Кочка; 6 — скважины в пещере; озера в гротах

Средний месячный ход уровней воды в скважинах и озерах Кунгурской пещеры, м

Грот	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Ср
<i>Скважины в пещере</i>													
Коралловый	114,24	114,33	114,32	114,68	114,69	114,59	14,30	114,37	114,36	114,34	114,39	114,38	114,38
Крестовый	113,18	113,07	113,04	113,42	114,64	113,47	113,21	113,21	112,97	113,16	113,30	113,30	113,31
Руины	113,32	113,27	113,25	113,64	114,51	113,63	113,38	113,34	113,20	113,35	113,48	113,43	113,46
<b>Среднее</b>	113,58	113,56	113,54	113,91	114,61	113,90	113,63	113,64	113,51	113,62	113,72	113,70	113,72
Мокрая Кочка	113,65	113,64	113,53	113,98	114,10	113,90	113,82	113,72	113,70	113,67	113,66	113,66	113,41
<i>Озера в пещере</i>													
Вышка	113,34	113,30	113,24	113,44	114,35	113,77	113,50	113,41	113,30	113,32	113,50	113,37	113,52
Лукина	113,34	113,27	113,22	113,52	114,26	113,66	113,47	113,33	113,28	113,23	113,29	213,33	113,44
Великан	113,28	113,23	113,21	113,45	113,7	113,62	113,3	113,28	113,34	113,2	113,30	113,36	113,41
<b>Среднее</b>	113,32	113,27	113,22	113,47	114,13	113,68	113,45	113,34	113,34	113,25	113,36	113,35	113,46
Длинный													
северное	113,27	113,21	113,18	103,42	113,85	113,61	113,34	113,22	113,20	113,25	113,26	113,29	113,36
восточное	113,23	113,19	113,22	113,61	113,97	113,58	113,36	113,26	113,21	113,26	113,32	113,31	113,35
южное	113,30	113,21	113,17	113,38	14,00	113,59	113,36	113,26	113,26	113,21	113,28	113,30	113,37
<b>Среднее</b>	113,25	113,20	113,19	113,47	113,94	113,59	113,35	113,25	113,22	113,27	113,27	113,29	113,36
Атлантида	113,14	113,05	113,06	113,33	113,77	113,50	113,24	113,15	113,11	113,10	113,18	113,21	113,23
Геологов	113,17	113,27	113,24	113,36	113,89	113,53	113,23	113,12	113,10	113,17	113,20	113,18	113,22
Грозный	112,57	112,54	112,52	112,98	113,78	113,13	112,63	112,57	112,44	112,40	112,72	112,60	112,69
<b>Среднее</b>	112,96	112,95	112,94	113,22	113,81	113,39	113,03	112,94	112,88	112,89	113,03	113,00	113,04
Коллизей	113,24	113,19	113,17	113,49	114,24	113,79	113,27	113,34	113,15	113,16	113,32	113,32	113,37
Дружбы Народов	113,15	113,16	113,35	114,22	113,62	113,35	113,25	113,15	113,17	113,24	113,29	113,34	113,34
Романтиков	113,32	113,23	113,19	113,34	114,00	113,60	113,35	113,24	113,21	113,22	113,29	113,33	113,32
<b>Среднее</b>	113,26	113,18	113,17	113,39	114,22	113,67	113,32	113,31	113,17	113,18	113,28	113,31	113,34
Колодцы и скважины у пещеры	113,48	113,35	113,35	113,78	114,00	113,63	113,16	113,16	113,28	113,22	113,42	113,62	113,52
Река Сылта	112,91	112,88	112,89	114,11	114,44	113,11	112,99	112,94	112,88	113,11	113,27	113,09	113,22

## 10.2. УРОВНИ ВОДЫ В ОЗЕРАХ ПЕЩЕРЫ

Все данные об уровнях воды в озерах Кунгурской пещеры можно разделить на четыре статистически значимые совокупности (с востока на запад):

— 1-я группа включает озера в гротах Дружбы Народов, Романтиков, Колизей. Здесь наблюдается снижение средних отметок в глубь массива (от 113,37 до 113,32 м), четко прослеживающееся по максимальным (2,90—2,04 м) и средним (1,42—0,89 м) амплитудам; по максимальным и минимальным амплитудам эта зависимость нарушается, что свидетельствует о возможном подтоке из филипповского водоносного горизонта. Связь уровней воды озер этой группы с уровнем р. Сылвы практически отсутствует ( $r = 0,41 \pm 0,25$ ).

— 2-я группа объединяет озера в гротах Грозный, Геологов и Атлантида, причем все данные статистически неразличимы.

— 3-я группа включает данные по постам в озерах грота Длинный. Все три поста расположены настолько близко, что дают статистически неразличимую среднюю (113,35—113,37 м,  $CV = 0,006, 0,006$  и  $0,008$ ). Минимальные уровни в них практически одинаковы, а максимальные немного снижаются от южного (115,25 м) к северному (114,99 м) озеру, что свидетельствует о периодическом питании озер за счет р. Сылвы.

— 4-я группа включает озера в гротах Вышка, Великан и Лукина. Они имеют одинаковый многолетний годовой и месячный ход; внутри массива уровни немного понижаются (от 113,52 в гроте Вышка до 113,41 м в гроте Великан); еще более значительна разница в майских отметках (114,70, 114,25, 113,85 м); отмечено понижение абсолютных минимумов (113,08, 112,89, 112,64 м) и амплитуды (1,24, 1,29, 0,86 м), что указывает на связь этих озер с р. Сылвой ( $r = 0,82 \pm 0,11$ ).

Все четыре группы озер имеют одинаковый ход уровней (см. рис. 10.3) с коэффициентами корреляции  $r = 0,75—0,80 \pm 0,12—0,14$ . Незначительные отличия наблюдаются лишь в высоте весеннего паводка.

Особое место занимает озеро в гроте Мокрая Кочка, имеющее более высокие (на 0,5 м) средний и минимальный уровни, более низкие (почти на 1 м) максимальный уровень и амплитуды. Е. П. Дорофеев [113] считал, что это происходит за счет “подвешенности” озера и его питания инфильтрационными водами. Пост имеет короткий ряд наблюдений (4 года), и поэтому достоверность данных невысокая.

## 10.3. УРОВНИ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ У ПЕЩЕРЫ

Первые сведения (рис. 10.4) об уровнях воды в скважинах у пещеры привел А. В. Турышев [399]. В меженный период уровни снижаются вниз по течению Сылвы (от 113,0 до 112,2 м), а в паводок убывают в обратном направлении (от 114,8 до 114,00 м). Интересно, что воды аллювиальных отложений между Сылвой и пещерой в межень и паводок имеют напор более высокий (113—114 м), чем карстовые воды, а в межень — в р. Сылва. Этот вывод сделан на основании данных по шести скважинам на первой надпойменной террасе. Наблюдения 1955 г. свидетельствуют о том, что пик па-

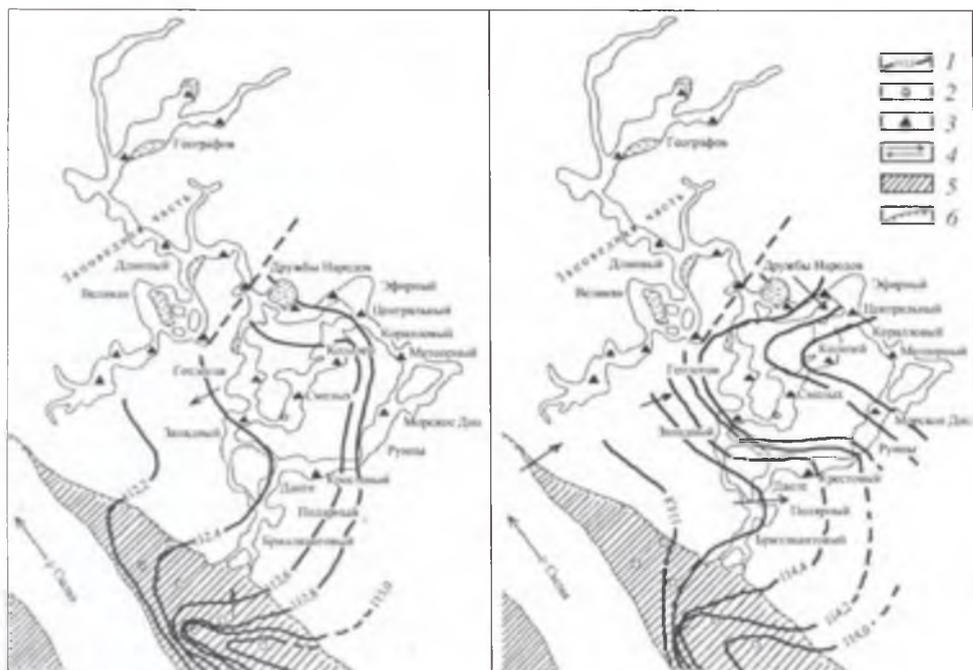


Рис. 10.4. Схема гидроизогипс на участке Кунгурской пещеры [399] в межень (23.VIII.1955 г., слева) и паводок (02.V.1955 г., справа). 1 — гидроизогипсы, м; 2 — скважины; 3 — водомерные посты в пещере; 4 — направление движения подземных вод; 5 — первая надпойменная терраса; 6 — подошва Ледяной горы

водка на озере грота Мокрая Кочка прошел раньше пика, вызванного таянием снега. Следовательно, причина подъема уровней в нем иная.

В 1976—1995 гг. у входа в пещеру были произведены разновременные замеры в трех скважинах и колодцах: у экскурсионного бюро (5 лет), у пещеры (3 года), у турбазы “Сталагмит” (3 года). Усредненные данные приведены в табл. 10.1 и на рис. 10.4. Связь между уровнями воды в скважинах в пещере и у входа в нее отсутствует ( $r = 0,51 \pm 0,25$ ).

#### 10.4. УРОВНИ ВОДЫ В р. СЫЛВЕ

Ход уровней воды в р. Сылве характеризуют табл. 10.1, 10.2 и рис. 2.3. Связь между уровнями воды в р. Сылве, в скважинах у входа в пещеру и озерами в пещере довольно высокая ( $r = 0,74 \pm 0,19$  и  $r = 0,72 \pm 0,20$ ). Река Сылва питает озеро Кунгурской пещеры непосредственно и через аллювиальный водоносный горизонт) только в апреле и мае.

#### 10.5. РЕЖИМ КАРСТОВЫХ ВОД ЛЕДЯНОЙ ГОРЫ

По классификации Г. Н. Каменского [327] подземные воды Ледяной горы имеют прибрежный режим, который по мере удаления от реки сменяется водораздельным. На режим карстовых вод влияет ряд факторов: гео-

логический (общее падение кровли филипповского горизонта в сторону р. Сылвы, наличие карстовых брекчий, различная степень трещиноватости и закарстованности гипсо-ангидритовых пачек), гидрогеологический (разгрузка карстовых вод Уфимского вала в долине р. Сылвы, наличие в области питания зон очаговой инфильтрации и инфлюации), геоморфологический (положение пещеры у границы закарстованного массива и I террасы р. Сылвы), биологический (характер растительности в области питания карстовых вод) и другие [98, 113, 141, 399].

Для режима карстовых вод в пещере характерны периоды, синхронные периодам на р. Сылве: предпаводковая межень (I—III), начало весеннего паводка (III—IV), пик паводка (IV—V), спад паводка (V—VI), послепаводковая межень (VI—XII). В дождливые годы в послепаводковую межень проявляются невысокие летние и осенние паводки. Весенний паводковый период в пещере обычно длится 2—4 мес.

Для установления режима уровней карстовых вод пещеры предыдущие исследователи применяли традиционные методики, однако они использовали не многолетние данные, а наиболее представительные с их точки зрения интервалы: за 1 год [399], за 3 года [124], за 5 лет [82, 87, 449, 450]. К. А. Горбунова с соавт. [87, 98, 449] использовала данные за 1987—1991 гг. Г. А. Сычкина методом интерполяции составила 20 карт гидроизогипс в масштабе 1:500, а С. М. Блинов [450] обработал эти материалы на компьютере в программе "SURFER" и получил 14 карт гидроизогипс и 14 моделей уровня карстовых вод. Типичные карты и модели представлены на рис. 10.5 и 10.6. К сожалению, в них не учтены данные по колодцам и скважинам у пещеры, поэтому, несмотря на применение компьютерной техники, полученные результаты не полностью соответствуют действительности.

Более подробно рассмотрим два года — 1987 и 1990.

В 1987 г. минимальный уровень р. Сылвы установился 15.XII (112,92 м), максимальный — 10.V (120,34 м), а его годовая амплитуда составила 7,42 м. В озере грота Дружбы Народов — годовая амплитуда 2,4 м, карстовых вод в скважине грота Коралловый — 1,6 м. На хронологическом графике выделяется предпаводковая межень с минимальной отметкой 112,93 м (18.III), весенний паводок с пиком 10.V и послепаводковая межень (VI—XII). Для озер центральной части пещеры после высокого весеннего паводка отмечается более высокий уровень в межень по сравнению с предыдущими годами и незначительное поднятие уровня после дождливого периода в сентябре. В предпаводковую межень (18.III) наибольшие отметки уровня наблюдались в скважине грота Коралловый. Отсюда сток карстовых вод направлен на юго-запад с уклоном 0,008, в озерной части пещеры уклоны уменьшаются, а зеркало карстовых вод приобретает почти горизонтальное положение. Эта часть пещеры дренируется р. Сылвой.

С началом паводка уровень р. Сылвы повышается, и речные воды инфильтруются в аллювиальные отложения или, как в районе грота Вышка, непосредственно внедряются в карстовый массив. В пик паводка (10.V) прослеживаются два потока — с юго-востока (со стороны грота Руины) и с юга (от р. Сылвы). В приречной части уклоны составляют 0,020, постепенно уменьшаясь в пещере до 0,003. Спаду паводка 14.V соответствует уменьшение уклонов, но повышение уровня воды в пещере продолжается в результате подпора карстовых вод речными водами с юга. Летняя межень

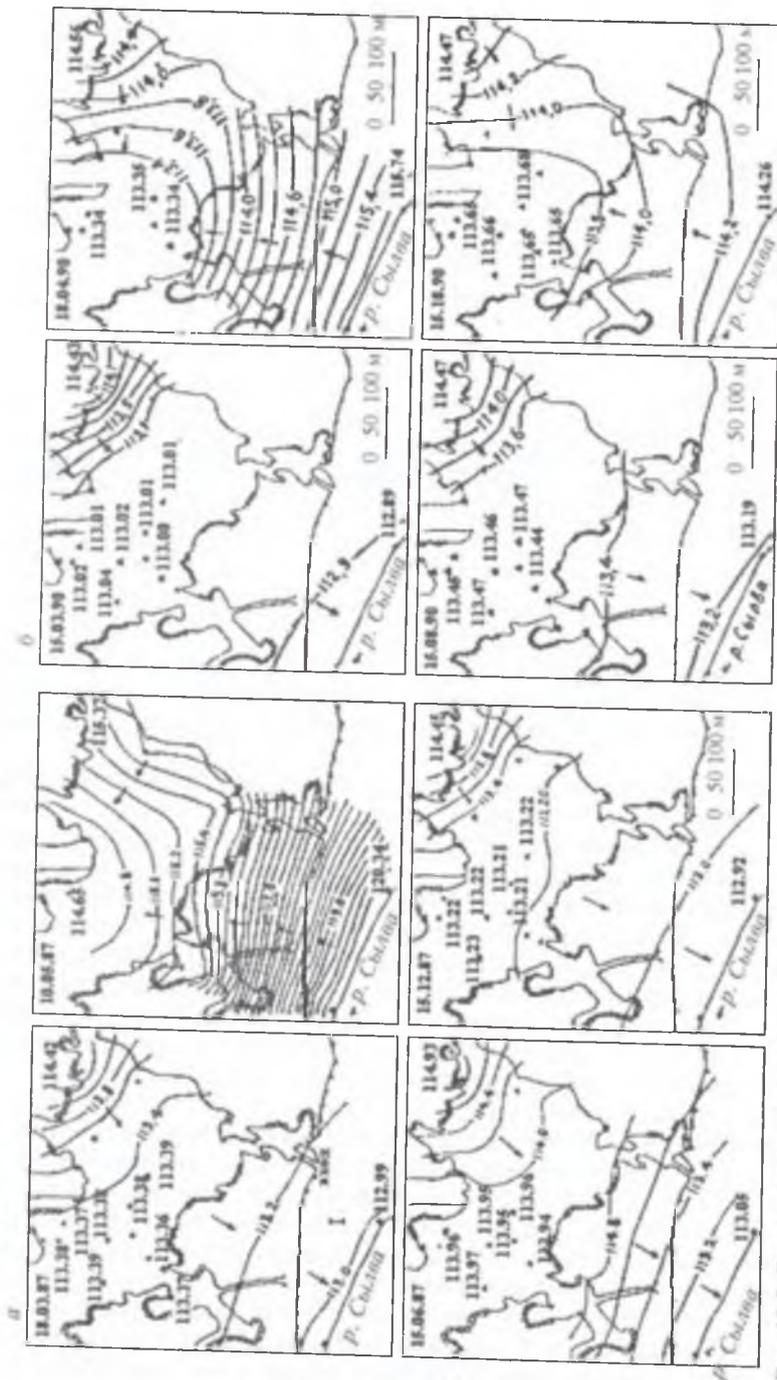


Рис. 10.5. Гидрологические уровни карстовых вод в Кунгурской пещере для типичных гидрологических периодов 1987 и 1990 гг. [202].  
 а: 15.VIII — начало паводка; 15.VI — конец паводка; 15.V — пик паводка; 15.IV — окончание паводка; 15.VIII — начало межень; 15.XI — пик межень; 15.IV — окончание межень; 15.V — пик межень; 15.IV — окончание межень.  
 б: 15.VIII — начало межень; 15.XI — пик межень; 15.IV — окончание межень.

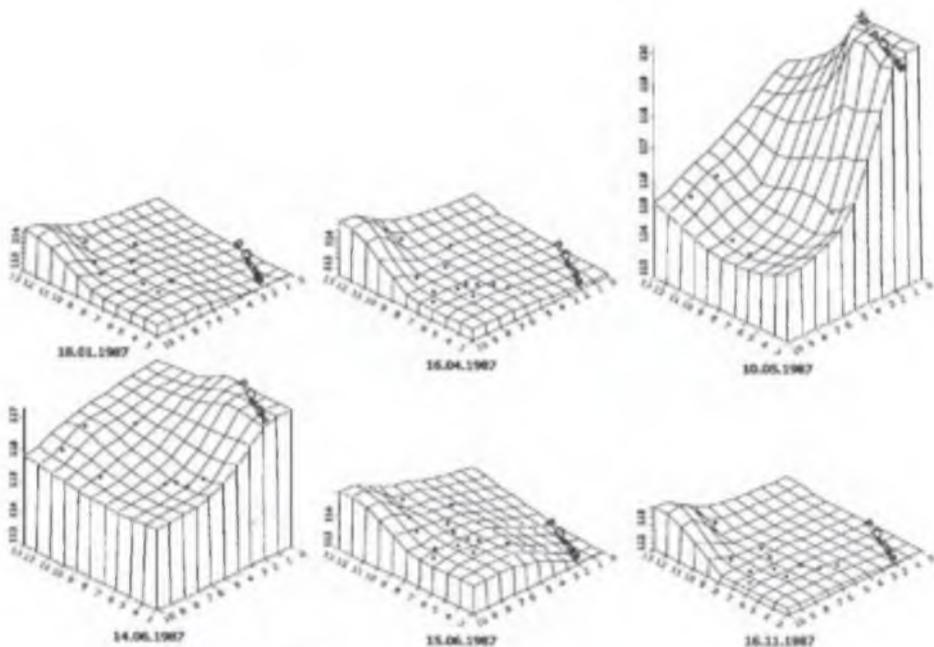


Рис. 10.6. Модель поверхности карстовых вод в Кунгурской пещере в 1987 г. [98]

(15.VI) отличается от зимней (15.XII) более высоким уровнем карстовых вод в пещере. Подъем и спад уровня воды в весенний паводок продолжают-ся на р. Сылве около 2 мес, в подземных озерах — 2—2,5 мес, а в скважине грота Коралловый — 3—3,5 мес.

Предпаводковая межень почти не отличается от предыдущих лет. В январе отметка уровня воды в скважине грота Коралловый была наибольшей. Отсюда сток карстовых вод был направлен в сторону озерной части с уклоном 0,010. В озерной части зеркало карстовых вод имело отметки 112,93—113,05 м при отметке уровня р. Сылвы 112,93 м, т. е. уклоны были незначительными. Начало весеннего паводка (18.VI) характеризуется подъемом уровня воды в р. Сылве и подземных озерах. Выявлены два направления стока: из грота Кораллового и с юга, со стороны р. Сылвы в глубь пещеры. Данные о пике паводка в пещере отсутствуют. В летнюю межень (18.VI—15.VIII) зафиксированы более высокие уровни подземных озер по сравнению с 1987—1989 гг. Осенний дождевой паводок четко прослеживается на р. Сылве и в пещере.

**Режим карстовых вод в 1990 г.** Минимальный уровень воды в р. Сылве установился 15.III (112,89 м), максимальный — 3.V (119,02 м), годовая амплитуда колебаний составила 6,13 м. Отмечены высокие уровни подземных озер в летне-осенний период и наличие осеннего паводка, пик которого прошел 12.XI (114,96 м). Годовая амплитуда колебаний уровня воды в озере грота Дружбы Народов — 1,5 м, карстовых вод в скважине грота Коралловый — 1,3 м.

В летнюю межень 1997 г. (19—26.V) эти данные были верифицированы геофизическими методами. Съёмка потенциалов ЕП фильтрации [286] показала (рис. 10.7), что основные пути фильтрации в межень проходят не

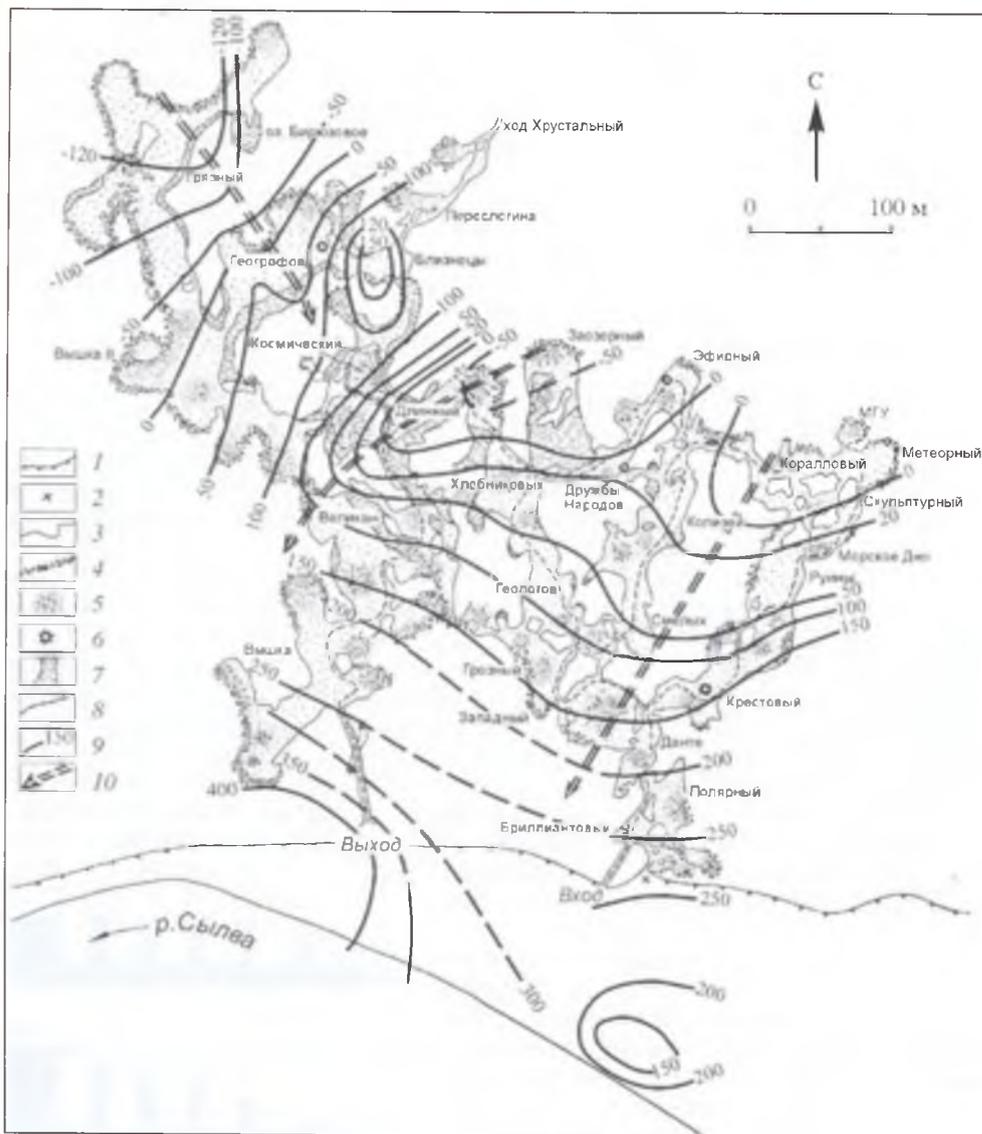


Рис. 10.7. Изолнии потенциалов ЕП фильтрации в Кунгурской пещере 19—26.VI.1997 г. [286].

1 — подножие Ледяной горы; 2 — старый вход; 3 — коренные стены; 4 — стены, сложенные разрушенными породами; 5 — глыбово-глинистые осыпи; 6 — органичные трубы; 7 — озера; 8 — экскурсионная тропа; 9 — изолнии потенциалов ЕП, мВ; 10 — направления движения карстовых вод

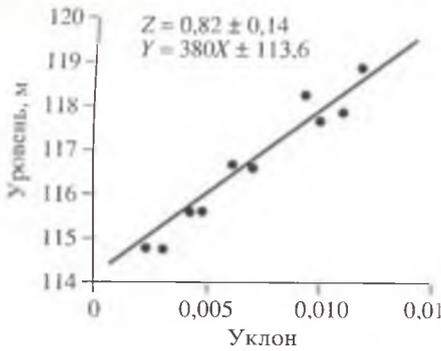


Рис. 10.8. Зависимость уклона карстовых вод в Кунгурской пещере от уровня воды в р. Сылве

через полости пещеры, а между ними, по так называемым “целикам”. Общее направление потоков — юго-западное, в сторону р. Сылвы, где на ее правом берегу против грота Вышка в период спада паводков зафиксирована основная зона разгрузки карстовых вод. Геофизическими методами выявлена, но не объяснена зона минимумов ЕП про-

тив входа в пещеру, которая соответствует подтоку воды из аллювиального водоносного горизонта. Сомнение вызывает и приток воды с северо-запада.

Анализ карт гидроизогипс и моделей уровня подземных вод показал, что придолинный пещерный массив представляет собой сложную гидрогеологическую систему, контролируемую уровнями сопряженной с ней реки. Массив Ледяной горы и примыкающая к нему аккумулятивная терраса р. Сылвы характеризуются изменяющейся в горизонтальном направлении водопроницаемостью.

На основании карт изолиний построен график зависимости уклонов карстовых вод в массиве Ледяной горы от уровней воды в р. Сылве (рис. 10.8). Уклон меняется от 0,000 при уровне 114,0 м до 0,0125 при 119,0 м. Следует иметь в виду, что эта схема реализуется только в начале и конце паводка, когда уровни воды в р. Сылве быстро меняются, а емкости Ледяной горы “отстают” в своем заполнении и опорожнении. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в разделе, посвященном паводкам.

Приведенные выше графики гидроизогипс и компьютерные модели построены по традиционной методике, которая не учитывает специфики карстовых вод [146]. Если бы на Ледяной горе были развиты обычные поровые коллекторы или водоемы Кунгурской пещеры представляли собой просто озеро, то по закону сообщающихся сосудов их уровень был бы одинаковым во всех гротах (рис. 10.9, а). Однако, согласно Г. А. Максимовичу [260], озера относятся к подземно-проточным водоемам и вскрывают в разных местах поток карстовых вод, который на Ледяной горе направлен с востока на запад (рис. 10.9, б). Если бы сечения вскрывающих поток трещин, каналов и озер были одинаковыми, то уровень подземных вод был бы на-

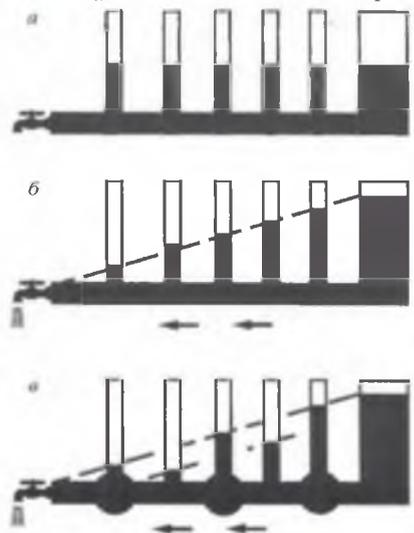
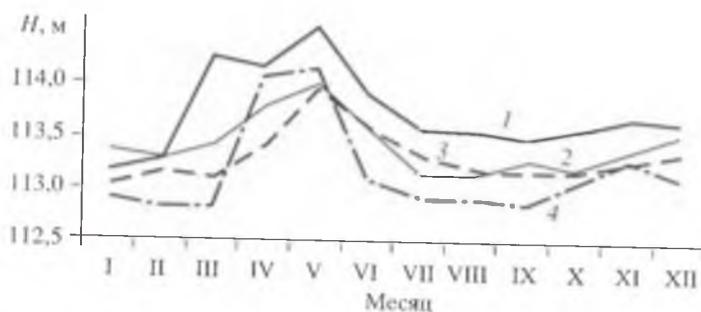


Рис. 10.9. Уровни воды в сообщающихся карстовых полостях (по А. Бегли [440]):

а — при отсутствии движения карстовых вод (озерный режим); б — при наличии потока карстовых вод (проточный режим); в — при наличии озер и трещин разной емкости (озерно-проточный режим)

Рис. 10.10. Многолетний ход средних месячных уровней.

1 — в скважинах в пещере;  
2 — в скважинах у пещеры;  
3 — в озерах пещеры; 4 — в р. Сылве



клонным везде одинаково. Но в потоке воды имеются разные ем-

кости, поэтому уровень воды в сообщающихся карстовых полостях различен (рис. 10.9, в). В соответствии с законом Бернулли средние многолетние отметки уровней карстовых вод в пещере различны (см. табл. 10.2 [440]).

Переток воды из одного озера в другое зафиксирован прямыми наблюдениями и опытами с окрашиванием флюоресцеином [106], а многолетние наблюдения выявили еще более сложную картину. Оказалось, что на уровни воды конкретных озер оказывают влияние подток воды снизу, из филипповского водоносного горизонта, а в паводок — переток воды р. Сылвы через аллювиальные отложения у пещеры или прямое втекание воды р. Сылвы.

На рис. 10.10 приведены многолетние данные об изменениях уровней воды в водопроявлениях района Кунгурской пещеры. На протяжении всего года максимальные уровни наблюдаются в скважинах в пещере, вскрывших иренский водоносный горизонт. Несколько ниже уровни воды в скважинах у пещеры. Их ход в целом совпадает, и это свидетельствует о том, что аллювиальный водоносный горизонт подпитывается водами иренского водоносного комплекса или филипповского горизонта. В период паводка (апрель, май) ощущается подток воды из р. Сылвы.

## 10.6. РЕЖИМ ВОДОПРОЯВЛЕНИЙ КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ В ПАВОДОК

В 1977—1980 гг. уровни воды в р. Сылве и подземных озерах в гротах Дружбы Народов и Длинный фиксировались самописцем ГР-38 (табл. 10.3). Видно, что пик паводка в пещере наступает на 5—11 дней позже, чем на р. Сылве, а сам паводок происходит, когда уровень реки уже идет на снижение, что объясняется слабой проницаемостью каналов, связывающих реку с подземными озерами. При малых паводках внедрение речных вод идет широким фронтом по всем подземным ходам, причем вода поступает в подземные озера в значительной степени осветленная. При высоких паводках вода движется концентрированным мутным потоком со стороны ближайшего к реке грота Вышка на уровне глинисто-глыбового заполнителя ходов. В 1981—1992 гг. во время паводков проводились измерения уровня воды по рейкам на р. Сылве и в гроте Дружбы Народов (табл. 10.4).

Анализ хода паводков в р. Сылве, озерах гротов Дружбы Народов и Длинном, а также в скважине грота Коралловый позволил К. А. Горбуновой с соавт. [87] сделать вывод о том, что “аномально высокий уровень карстовых вод в скважине Кораллового грота (на метр превышающий уровень

Таблица 10.3

**Связь пиков паводков на р. Сылве с паводками в пещере, м**

Год	Река Сылва	Грот	
		Дружбы Народов	Длинный
1977	116,03 (29.IV)	113,34 (07.V)	113,33 (04.V)
1978	115,70 (08.V)	113,77 (19.V)	113,78 (19.V)
1979	120,74 (09.V)	117,28 (затоплен)	117,28 (затоплен)
1980	116,95 (27.IV)	Не работал	114,08 (03.V)

Таблица 10.4

**Прохождение пиков паводков на р. Сылве и в озере грота Дружбы Народов (по срочным замерам), м**

Дата	Река Сылва	Грот Дружбы Народов	Дата	Река Сылва	Грот Дружбы Народов
11.V.1981	119,11	114,87	10.V.1987	120,34	113,90
28.IV.1982	117,50	113,32	27.IV.1988	115,88	114,00
13.IV.1983	117,70	113,75	11.V.1989	116,68	113,80
12.V.1984	115,83	113,64	03.V.1990	119,02	114,55
30.IV.1985	119,36	114,64	23.IV.1991	119,38	115,85
22.IV.1986	117,16	115,20	02.V.1992	115,59	114,75

пещерных озер) объясняется напором карстовых вод с востока”. К сожалению, этот вывод не получил дальнейшего развития.

Данные замеров уровней дополняют материалы непосредственных наблюдений в катастрофический паводок 1979 г. (рис. 10.11, 10.12). В гроте Вышка 7.V.1979 г. появился мутный поток воды, который с шумом сбегал с камней со стороны реки. Низкие участки тропы в гротах Великан, Длинный, Романтиков, Хлебниковых, Геологов залило водой, а 12.V мутная вода затопила грот.

Вода отступила от входа в пещеру только 15.V. Глиняная плотина у дверей тоннеля была вскрыта. Оказалось, что вода затопила входной тоннель на глубину 0,3 м (рис. 10.13). В Бриллиантовый грот речные воды не попали. В низком проходе гротов Крестовый — Руины слегка мутноватая вода стояла на уровне 0,5 м ниже потолка. В северной части грота Руины и далее до Метеорного грота пол был затоплен водой. Нивелировка показала, что в максимум паводка уровень воды по всей пещере выровнялся и составлял 117,20 м (грот Руины) — 117,05 м (грот Вышка). Максимальный подъем, отмеченный по намерзшей ледяной корочке, составил 117,28 м (грот Крестовый).

Свидетелями древних высоких паводков являются горизонтальные площадки на стенах и потолках гротов. В. С. Лукин [224] правильно связал их образование с древними уровнями карстовых вод. В гроте Центральный 23 такие площадки находятся на высоте 115,57—118,44 м (средняя 117,07 м, амплитуда 2,87 м). Стена грота представляет собой как бы естественную гидрометрическую рейку, запечатлевшую многолетние изменения уровней карстовых вод в массиве Ледяной горы. Вторая такая же “гидрометричес-

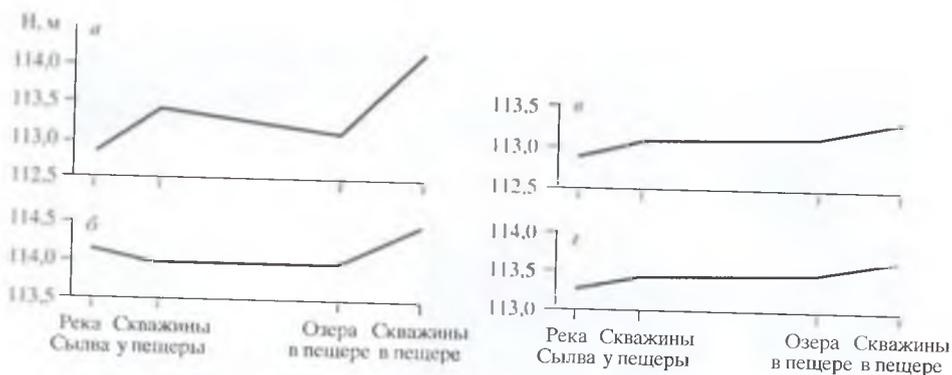


Рис. 10.11. Типовое распределение уровней в водопроявлениях у Кунгурской пещеры: а — зимняя межень (март); б — паводок (май); в — летняя межень (август); г — осенний паводок (ноябрь)

кая рейка" находится в 200 м к западу, на восточной стене грота Длинный, где также прослежены 23 отметки уровней карстовых вод на высоте 115,02—117,90 м (средняя 116,47 м, амплитуда 2,88 м). Наличие двух таких "рек" позволяет рассчитать палеоуклон карстовых вод в паволок: разность средних уровней равна 0,6 м, отсюда уклон составляет  $0,6 \text{ м} : 200 \text{ м} = 0,003$ . Современный паводковый уклон между уровнями карстовых вод в скважине грота Коралловый (114,69 м) и гроте Длинный (113,94 м) составляет  $0,75 \text{ м} : 260 \text{ м} = 0,003$ . Это совпадение говорит о том, что пещера хранит информацию о движении воды, происходившем в ней много лет назад<sup>4</sup>.

Паводки сопровождаются изменениями минерализации воды озера. В химической лаборатории стационара в 1980—1987 гг. было исследовано 96 ежемесячных проб воды из озера грота Длинный. Средняя минерализация воды, отобранных в апреле—мае, составила 2210 мг/дм<sup>3</sup>, а в июне—марте — 2300 мг/дм<sup>3</sup>. Таким образом, приток воды из р. Сыльвы вызвал снижение средней минерализации на 90 мг/дм<sup>3</sup>. Точность выполненных химических анализов оценена в 5 % [383]. Средняя минерализация воды в озере грота Длинный составляет 2230 мг/дм<sup>3</sup>, а вероятная ошибка  $\pm 110$  мг/дм<sup>3</sup>. Таким образом, уменьшение средней минерализации в межень лежит в пределах ошибки наблюдений. Именно поэтому К. А. Горбуновой не удалось установить закономерности в распределении минерализации воды озера грота Длинный.

Связь р. Сыльвы и подземных озера Кунгурской пещеры зависит от уровня воды в них: чем выше подъем воды в реке, тем свободнее она проникает в пещеру, а на отметках 115—117 м озера пещеры вообще образуют общий горизонт. В меженный период, когда уровень воды низкий, озера имеют разные отметки поверхности, и наиболее низкий устанавливается у озера в гроте Географов. В результате запуска флюоресцеина выявлено, как сюда стекает вода из грота Длинный, а нивелировкой прослежен поток воды от реки через гроты Вышка → Великан → Длинный. Другие потоки обнаружены в гротах Руины → Колизей → Дружбы Народов и Геологов →

<sup>4</sup> В 1914—1995 гг. на р. Сыльве у Кунгурской пещеры было зафиксировано 55 крупных паводков. Максимальный паводок составил 120,92 м (1979 г.), средний — 117,49 м, CV — 0,013.

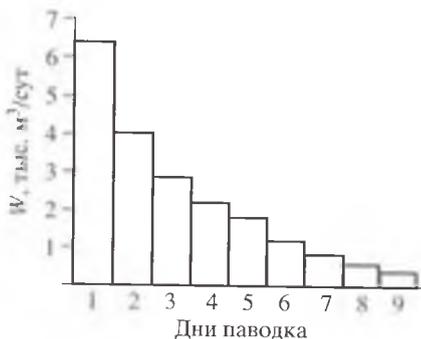


Рис. 10.12. Паводок на р. Сылве (май 1979 г.)



Рис. 10.13. Затопление входа в пещеру в паводок (май 1979 г.)

Рис. 10.14. График заполнения емкостных коллекторов Кунгурской пещеры во время паводка



Атлантида → Романтиков. Так как в межень уклоны карстовых вод в озерной части пещеры невелики (0,000—0,0025), в 1974 г. флюоресцеин в озере грота Дружбы Народов сохранялся 2,5 мес, а грота Романтиков — свыше 3 мес [113].

Чтобы выяснить, сколько воды поступает в пещеру из р. Сылвы в паводки, инженер стационара И. А. Никифорова 15—23.IV.2002 г. произвела предварительный расчет. Перед пещерой I надпойменная терраса имеет длину 300 м и среднюю ширину 80 м. На ней в разное время было пробурено около 30 скважин. Геологический разрез получен по скважине 987: 109,80—111,60 — гравелистый грунт с галькой и песком (2,80 м); 111,60—113,15 — песок разнородный с гравием (1,55 м); 113,15—115,15 — суглинок с дресовой известняком (2,00 м); 115,15—122,15 — суглинок (8,00 м); мощность водоносного горизонта 12 м. Повышение уровня воды в р. Сылве от  $H$  до  $H_1$  происходит по параболическому закону

$$H = [H_1^2 + \alpha_1 t]^{0.5},$$

а снижение от  $H_2$  до  $H_1$  — по закону

$$H = [H_2^2 - \alpha_2(t - t_1)]^{0.5},$$

где  $\alpha_1 = 6,74$ ;  $\alpha_2 = 5,4$ . Средний коэффициент фильтрации по данным семи скважин, пробуренных в Кунгуре на аллювий  $Q_{IV}$  в долине р. Сылвы, — 11,4 м/сут; средняя уровеньпроводность скважин — 907 м²/сут.

Расчет фильтрационных потерь из реки против пещеры произведен по формуле Н. Н. Веригина [383]:

$$Q_{\phi} = KL(H_2^2 - H_1^2)(1 - t^{\alpha})^{0.5} / (\pi \alpha t)^{0.5}.$$

Всего за 9 дней паводка в пещеру поступило 20,4 тыс. м³ речных вод (рис. 10.14). Заполнение емкостных коллекторов происходило по параболическому закону, с ежедневным уменьшением количества поступающей воды. К сожалению, замеры уровней воды в р. Сылве в это время не производились, поэтому связать с ними ход паводка невозможно.

Неоднократное изменение направления и скорости движения карстовых вод, гидравлически связанных с менее минерализованными грунтовыми и речными водами, свидетельствуют об активизации карста в массиве, которая проявляется в образовании просадок на дне пещеры, оседании подпорных сооружений по всей пещере и швеллеров в гроте Вышка.

## Глава 11

### ГИДРОХИМИЯ

Первые химические анализы воды из Кунгурской пещеры выполнили Г. Г. Кобяк и Г. А. Максимович [270] в 1934 и 1940 гг.. Они установили, что вода подземных озер имеет минерализацию более  $2 \text{ г/дм}^3$  и относится к минерализованным (соленым) разновидностям природных вод. Химическая лаборатория при Кунгурском стационаре была создана в 1955 г. Всего в ней проанализировано более 1800 проб. В 70—90-е годы пробы воды из пещеры анализировали также в лабораториях кафедры динамической геологии и гидрогеологии Пермского госуниверситета и Естественно-научного института (более 400 проб).

В 1999—2000 гг. весь имеющийся материал был обработан. Прежде всего были отбракованы ошибочные анализы (минерализация меньше плотного остатка), затем все данные пересчитаны по единой форме: в бланках анализов в разные годы имелись данные по 6—16 компонентам; для получения сравнимых результатов минерализация была рассчитана по шести (при наличии  $\text{CO}_3$  — по 7) основным компонентам. Всего в Банке данных содержится 2415 анализов, а общее количество анализов из одного водопроявления колеблется от 1—2 (озера в гротах Эфирный и Переслегина) до 300 (озеро в гроте Дружбы Народов). Сведения о времени отбора приведены в табл. 8.2.

Анализировались восемь групп водопроявлений: атмосферные осадки (снег и дождь); поверхностные воды (озера на Ледяной горе); капель (в гротах); вода подземных озер; вода из шурфов и скважин (в пещере); лед из пещеры; вода из колодцев и скважин (у пещеры); вода рек Сылвы и Шаквы.

Для каждого объекта рассчитаны многолетние годовые и месячные значения ( $x_{\text{ср}}$ ), коэффициент их вариации ( $CV$ ), максимальные, минимальные значения и амплитуда. При анализе материалов использовались данные на отдельные сезоны (теплый, холодный) и фазы водности (межень, паводок). Для анализа использовались графики Дурова [149] и Бродского [185].

#### 11.1. АТМОСФЕРНЫЕ ВОДЫ

Химический состав атмосферных осадков в районе Кунгура изучен довольно слабо [408]. В 1993 г. К. А. Горбунова и С. М. Блинов [81] по 16 анализам составили карту минерализации снега на поверхности Ледяной горы и рассчитали средний химический состав снега у пещеры. Содержание ионов:  $\text{HCO}_3^-$  — 25,8;  $\text{SO}_4^{2-}$  — 21,2;  $\text{Cl}^-$  — 15,0;  $\text{Ca}^{2+}$  — 13,3;  $\text{Mg}^{2+}$  — 2,5;  $\text{Na}^+$  — 10,6  $\text{мг/дм}^3$ ; минерализация — 90,5  $\text{мг/дм}^3$ . Отмечено также присутствие ионов  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_4$  и Fe.

Таблица 11.1  
Химический состав снеговых вод на Ледяной горе, мг/дм<sup>3</sup>

Месяц	Кол-во проб	НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Минерализация снега	pH	Тип воды*
I	1	9,8	0,0	2,8	0,8	0,0	4,6	18,0	6,3	ХГН
II	3	8,1	5,7	2,7	1,9	0,3	4,8	23,5	6,2	СГКН
III	20	25,0	19,4	13,4	12,0	2,3	9,4	81,5	6,1	ХСГКН
IV	8	18,6	11,3	2,9	5,4	0,6	7,1	45,9	6,2	СГКН
V	1	43,9	6,0	3,9	6,0	3,3	9,0	72,1	7,0	ГМКН
X	1	11,0	0,0	2,1	0,0	0,0	5,5	18,6	6,9	ГН
XI	9	24,0	1,8	4,1	4,4	1,4	4,8	40,5	7,0	ХГКН
XII	13	12,4	0,8	2,2	0,7	0,3	4,8	21,2	7,0	ГН
Ср.	56	19,1	5,6	2,3	3,9	1,0	6,4	38,3	6,5	ГКН
Дождь	1	43,9	6,0	3,9	6,0	3,3	8,8	71,9		ГКН

\* Гидрохимический тип воды определяли по содержанию компонентов, превышающих 20 % мг-экв, наименование давалось от меньшего к большему, разделяясь для анионов и катионов (например, гидрокарбонатно-сульфатный магнито-кальциевый); Г — гидрокарбонатный, С — сульфатный, Х — хлоридный, К — кальциевый, М — магниевый, Н — натриевый

Таблица 11.2  
Изменения химического состава снега по годам лет, мг/дм<sup>3</sup>

Годы	Кол-во лет	НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Минерализация	pH	Тип воды
1968—1975	7	16,5	5,9	2,8	5,0	0,5	3,6	34,3	6,0	СГКН
1976—1987	12	18,7	8,4	5,1	5,2	2,3	3,4	43,1	7,1	ГКНМ
1988—1994	7	24,2	18,7	12,7	11,3	2,0	9,0	79,2	6,7	ХСГКН

В 1968—1994 гг. проанализировано 56 проб атмосферных осадков (55 — снеговых и 1 — дождевых вод), из них 30 % проб отобрано “над пещерой” или “на Ледяной горе”, 20 % — “со льда Сылвы” и “в г. Кунгур”, 50 % — не имеют привязки. Распределение проб по годам и месяцам неравномерное, нет и полного ряда данных за холодный сезон (X—IV). Среднемесячный состав снеговых вод на Ледяной горе характеризуется табл. 11.1. Средняя проба снега имеет минерализацию 38,3 мг/дм<sup>3</sup>, содержание отдельных ионов — от 1,0 до 19,1 мг/дм<sup>3</sup>, pH 6,5 и ГКН состав при высоких коэффициентах вариации компонентов: максимальный — ион Mg<sup>2+</sup> (1,19), минимальный — ион НСО<sub>3</sub><sup>-</sup> (0,60).

Средние месячные значения минерализации также сильно варьируют (18,6—81,5 мг/дм<sup>3</sup>). Высокая минерализация характерна для всех замеров, выполненных в марте 1993 г. Так, снег, отобранный у бровки коренного склона Ледяной горы, имеет минерализацию 226 мг/дм<sup>3</sup>. Столь же велики амплитуды колебаний содержаний всех анионов (85,4—59,6 мг/дм<sup>3</sup>). Несколько более устойчивы содержания катионов: по Са (типоморфный ион для района пещеры) — 50,1 мг/дм<sup>3</sup>, по магнию — 13,1 мг/дм<sup>3</sup>.

О пестроте состава снега и его загрязненности свидетельствует обилие гидрохимических типов вод (всего 21), среди которых преобладают ХГН (15 %), ГН (12 %), ХГКН (7 %) и ГСХКН (6 %). На графике Дурова видны

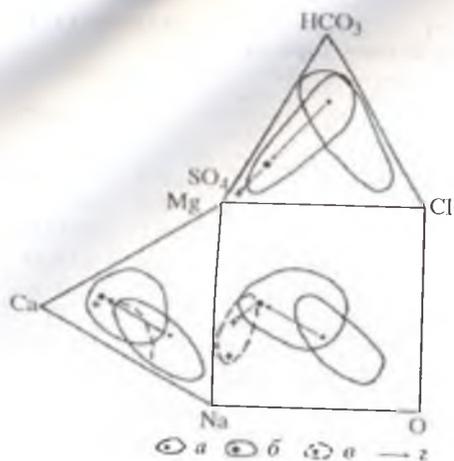


Рис. 11.1. Поля химического состава: а — снега; б — поверхностных вод; в — капли в гротах; г — пути трансформации ионного состава вод (точками показаны средние для каждого поля многолетние значения)

довольно четкие поля (рис. 11.1), хотя закономерности в изменениях минерализации по месяцам и годам не просматриваются. Анализ профиля Бродского (рис. 11.2), свидетельствует о том, что наиболее чистый снег со средней минерализацией 18—20 мг/дм<sup>3</sup> выпадает в начале зимы, затем его минерализация повышается до 70—80 мг/дм<sup>3</sup>, что сопровождается усложнением состава воды — двухкомпонентная ГН вода сменяется трехкомпонентной ХГН, четы-

рехкомпонентной СГКН, ГМНК, пятикомпонентной ХСГНК. Средняя проба снега имеет минерализацию 38,3 мг/дм<sup>3</sup>, ГКН состав и рН 6,5.

Жидкие осадки, к сожалению, охарактеризованы всего одной пробой, отобранной 31.V.1988 г. Для нее характерны несколько повышенные минерализация (71,9 мг/дм<sup>3</sup>) и содержание иона  $\text{HCO}_3^-$  (43,9 мг/дм<sup>3</sup>). Атмосферные осадки в районе г. Кунгура по сравнению с территорией Пермской области [408] имеют более высокую минерализацию, что, очевидно, связано с антропогенным загрязнением.

Анализ по группам лет свидетельствует о прогрессирующем загрязнении снега над Кунгурской пещерой: происходит рост средней минерализации, увеличивается содержание всех компонентов и усложняется химический состав (табл. 11.2).

С атмосферными осадками в массив Ледяной горы привносится довольно много минеральных веществ. Площадь, с которой происходит поступление осадков в пещеру, составляет примерно 360 тыс. м<sup>2</sup>. При среднем коли-

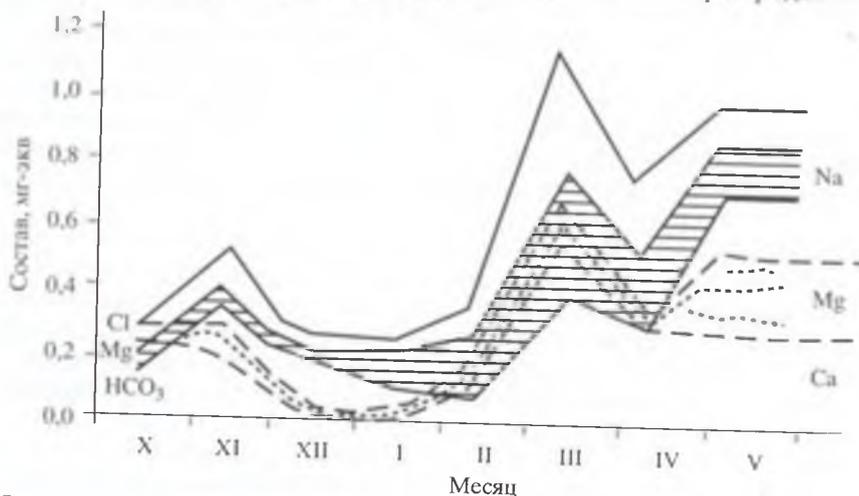


Рис. 11.2. Изменения химического состава снега в районе Кунгурской пещеры

честве осадков в год 470 мм это составляет  $0,169 \cdot 10^6 \text{ м}^3$  воды. При средней минерализации  $38,3 \text{ мг/дм}^3$  ( $38,3 \text{ кг/м}^3$ ) атмосферные осадки приносят на поверхность Ледяной горы в пределах области питания пещеры около  $6,4 \text{ т}$  твердых веществ в год. Эту величину следует учитывать при расчете химической денудации.

Почти по всем компонентам загрязнения снеговые воды лежат в пределах ПДК, и только в отдельных пробах отмечены превышения по рН и общему железу (в 2,6 раза). Об увеличении загрязнения свидетельствуют повышение минерализации снега с октября ( $18 \text{ мг/дм}^3$ ) по март ( $81 \text{ мг/дм}^3$ ) и данные гидрохимического опробования, проведенного ЕНИ 04.03.1993 г. на Ледяной горе. В дальнейшей части надпещерного поля снег имеет невысокую минерализацию ( $49 \text{ мг/дм}^3$ ), но уже загрязнен (о чем свидетельствует его пятикомпонентный ХГСКН состав). В прирвочной части Ледяной горы, в зоне ветрового переноса загрязняющих веществ, минерализация снега резко возрастает ( $231 \text{ мг/дм}^3$ ), а у основания склона опять снижается ( $59 \text{ мг/дм}^3$ ). Проба, отобранная у бровки коренного склона Ледяной горы к востоку от входа в пещеру, имеет аномально высокую минерализацию ( $226 \text{ мг/дм}^3$ ) и смешанный ГХСМНК состав.

## 11.2. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ

Сведения о химизме поверхностных вод Ледяной горы в литературе отсутствуют [408]. В 1956—1993 гг. на химический анализ было отобрано 23 пробы воды из временных озер в суффозионно-карстовых воронках на поверхности Ледяной горы. Для нескольких проб указаны места отбора, 80 % проб не имеют адреса. Распределение анализов по месяцам спорадично: половина проб отобрана в апреле 1975 г., в другие годы единичные пробы отбирали в феврале, марте и ноябре. Средний состав вод озер на Ледяной горе следующий,  $\text{мг/дм}^3$ :  $\text{HCO}_3^-$  — 106,8,  $\text{SO}_4^{2-}$  — 238,2,  $\text{Cl}^-$  — 18,4,  $\text{Ca}^{2+}$  — 106,0,  $\text{Mg}^{2+}$  — 11,1,  $\text{Na}^+$  — 18,9, минерализация — 499,4; рН — 6,7; тип воды — СК.

Средняя проба имеет минерализацию  $499,4 \text{ мг/дм}^3$  и СК состав. Средние значения минерализации воды озер варьируют от  $70 \text{ мг/дм}^3$  (талая снеговая вода) до  $1000$ — $2000 \text{ мг/дм}^3$  (вода в небольших временных озерах, насыщенная сульфатами). Ее отличает довольно высокое содержание иона  $\text{NO}_3^-$  ( $84,0 \text{ мг/дм}^3$ ). По отношению к исходному составу снега отмечается некоторое упрощение состава вод (13 типов, среди которых преобладают ГНК (26 %), СК (20 %), ГМК (15 %)). Обращает на себя внимание обилие вод четырех- (СГНК, СГКН, ХГНК) и пятикомпонентного состава (СГНМК, СГМНК).

На графике Дурова анализы воды озер образуют довольно четкие поля, имеющие конфигурацию, отличную от конфигурации полей твердых атмосферных осадков (см. рис. 11.1). Закономерности в изменениях по месяцам и годам не прослеживаются.

## 11.3. КАПЕЛЬ В ПЕЩЕРЕ

Химизм капли в Кунгурской пещере изучен слабо. Имеются данные [6, 25, 99] по небольшим выборкам (до 10 шт.) из проб, отобранных в случайное время и в случайных точках (рис. 11.3). В наиболее полной сводке по

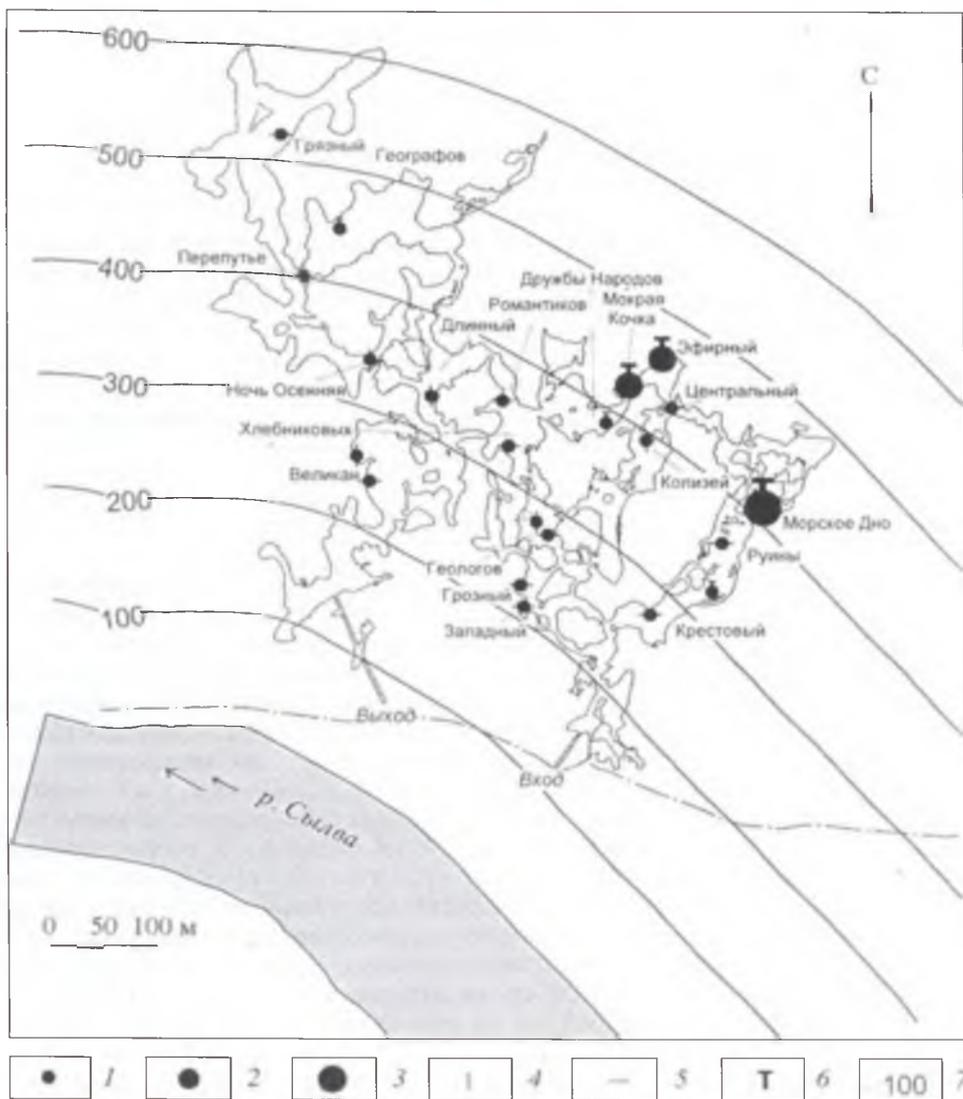


Рис. 11.3. Гроты, в которых отобраны пробы капели:

1—3 — количество проб в точке отбора: 1 — менее 10, 2 — 10—50, 3 — более 50; 4—6 — характер капели: 4 — из трубы, 5 — из трещин, 6 — со сводов; 7 — расстояние от р. Сылвы, м

гидрохимии Кунгурской пещеры [141] использовано 52 анализа. Основные выводы по ним сводятся к следующему: большая часть проб имеет минерализацию, близкую к 2000 мг/дм<sup>3</sup>, и СК состав; капель из трещин более минерализована, чем капель из органичных труб; максимум минерализации наблюдается в апреле, минимум — в мае (период таяния снега); почти повсеместно агрессивна по отношению к гипсу и ангидриду. Средний многолетний химический состав капели в Кунгурской пещере (184 анализа), мг/дм<sup>3</sup>: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> — 84,6, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> — 1418,9, Cl<sup>-</sup> — 6,9, Ca<sup>2+</sup> — 415,8, Mg<sup>2+</sup> — 81,0, Na<sup>+</sup> — 84,8; минерализация — 2092,0; pH — 7,7; тип воды — СМК. Наименьшая минерализация капели отмечена 28.VI.1968 г. в гроте Крестовый (745 мг/дм<sup>3</sup>), а наибольшая — 7.II.1968 г. в гроте Географов (2210 мг/дм<sup>3</sup>).

В отдельных гротах максимум минерализации наблюдается как летом (VI), так и в конце зимы (IV), а минимум — в любое время года (I, III, VII). В близко расположенных гротах отмечается значительная разница в минерализации (Мокрая Кочка — Морское Дно, 366 мг/дм<sup>3</sup>), превышающая амплитуду ее многолетних колебаний. Максимальные и минимальные значения содержания компонентов в разных гротах составляют: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> — 11,6—134,0, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> — 96,0—1718,8, Cl<sup>-</sup> — 1,4—16,3, Ca<sup>2+</sup> — 26,0—578,0, Mg<sup>2+</sup> — 4,8—133,8 мг/дм<sup>3</sup>; pH 7,0—7,9.

По типу химизма пробы капели отличаются однородностью и постоянством: 60 % — СМК, 40 % — СК состав. На графике Дурова видно четкое поле (см. рис. 11.1). Хорошо прослеживаются пути трансформации ионного состава вод (снеговые — поверхностные — капель), приводящие к упрощению их ионного состава (21—13 — 2 типа). При анализе проб капели авторы использовали разные подходы.

**Капель при разной мощности зоны аэрации.** Объем выборок отличается на порядок (табл. 11.3). Статистически значимые различия между ними отсутствуют (*H*-критерий меньше 1,96). По типам химизма для зон 300—400 и 100—200 м характерен преобладающий СК состав (78 и 70 %), в зоне 200—300 м они распространены примерно поровну (СК — 55 %, СМК — 45 %). Наиболее представительны гроты Морское Дно, Эфирный и Мокрая Кочка, где отобрано на анализ более 70 % всех проб (табл. 11.4).

При понижении средней минерализации капели увеличивается ее коэффициент вариации, снижается максимальная и минимальная минерализация. Четких зависимостей изменений амплитуды и колебаний по сезонам нет. Капель в гротах Мокрая Кочка и Эфирный имеет преимущественно СК состав (75—80 % проб), а Морское Дно — почти исключительно СМК состав (97 % проб). Такой же СМК состав по меньшему числу проб имеют и другие гроты (Великан, Дружбы Народов, Колизей, Крестовый, Романтиков, Хлебниковых).

**Капель в теплые и холодные месяцы.** Для анализа взяты данные по летним (VI, VII, VII, VIII) и зимним (XII, I, II, III) месяцам. Статистически значимых различий между минерализацией зимней и летней капели не обнаружено (табл. 11.5, *H*-критерий 0,42); амплитуда составила 320 мг/л.

**Капель разных условий формирования.** Генеральную совокупность проб можно разделить на три группы: со сводов, из трещин, из органичных труб. В этом направлении происходит снижение минерализации всех ее компонентов и pH (табл. 11.6). Наиболее постоянна минерализация капели, поступающей со сводов, длительное время находящейся в контакте с поро-

Таблица 11.3

**Химический состав капели в гротах, расположенных на разном расстоянии от подножия склона Ледяной горы, мг/дм<sup>3</sup>**

Расстояние от подножия склона, м	Средняя мощность зоны аэрации, м	Кол-во проб	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Минерализация	pH
300—400	75	139	83,3	1432,8	6,1	408,2	83,0	94,9	2108,3	7,4
300—300	65	10	102,5	1427,9	9,2	506,3	67,4	18,4	2131,7	7,4
100—200	55	12	85,9	1249,0	13,8	430,6	69,4	13,6	1862,3	7,5

Таблица 11.4

**Минерализация капели в гротах Морское Дно, Эфирный и Мокрая Кочка, мг/дм<sup>3</sup>**

Грот	Кол-во проб	Минерализация				
		средняя	максимальная (месяц)	минимальная (месяц)	амплитуда	CV
Морское Дно	87	2313	2473 (IV)	2151 (VII)	322	0,04
Мокрая Кочка	13	1947	2094 (VI)	1813 (III)	281	0,06
Эфирный	33	1517	1834 (IV)	1257 (I)	577	0,12

Таблица 11.5

**Минерализация капели в теплые и зимние месяцы**

Месяцы	Кол-во проб	Средняя минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	CV
Теплые	34	1800	0,32
Холодные	68	2120	0,34

Таблица 11.6

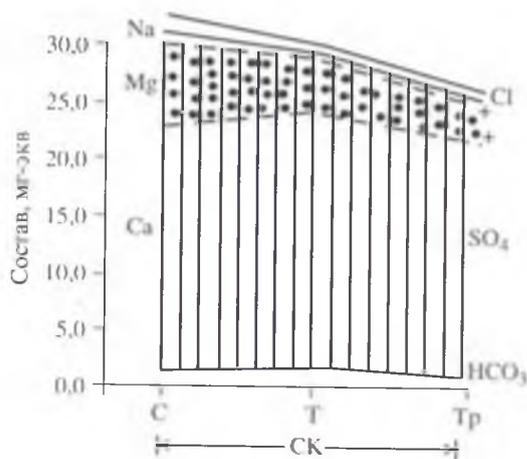
**Средний химический состав капели разных видов, мг/дм<sup>3</sup>**

Вид капели	Кол-во проб	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Минерализация	pH	Тип воды, %	
										СК	СМК
Со сводов	13	88,7	1446,7	8,4	480,3	83,5	22,1	2129,7	7,3	50	50
Из трещин	10	87,6	1360,0	9,3	396,9	47,5	24,5	1925,8	7,2	60	40
Из органичных труб	78	82,5	1230,9	6,8	438,1	65,6	4,4	1822,3	7,1	33	67

дой одного состава ( $CV = 0,03$ , амплитуда 364 мг/дм<sup>3</sup>); более изменчива минерализация капели из трещин, контактирующей с породами разного состава ( $CV = 0,20$ , амплитуда 929 мг/дм<sup>3</sup>); еще более изменчива минерализация воды из органичных труб ( $CV = 0,35$ , амплитуда 1293 мг/дм<sup>3</sup>). Между минерализацией и амплитудой ее изменений для капели разных типов обнаружены статистически значимые различия ( $F$ -критерий 3,8; 16,0 и 3,0 соответственно, что больше критического значения 1,96).

По типу химизма капель со сводов имеет СМ и СМК состав (по 50 %), из трещин — преимущественно СК (60 %), а из органичных труб — СМК состав (67 %). Для капели из органичных труб характерна большая

Рис. 11.4. Ионный состав и типы капели на графике Бродского. Капель: С — со сводов, Т — из трещин, Тр — из органичных труб; СК — гидрохимический тип



вариация минерализации (амплитуда  $1293 \text{ мг/дм}^3$ ), в разное время из них поступает пресная ( $813 \text{ мг/л}$ ) и солоноватая ( $2106 \text{ мг/дм}^3$ ) вода. Химический состав воды из органичных труб зависит от их высоты (какие части разреза они вскрывают и какую часть пути капли проходят по воздуху) и изменений водопритока (рис. 11.4).

#### 11.4. ЛЕД В ПЕЩЕРЕ

Химический состав льда Кунгурской пещеры рассмотрен во многих работах [19, 82, 139, 141, 271, 273, 437], хотя данные и получены на небольших выборках (2—10 образцов). Даже в наиболее полной сводке было учтено всего 23 анализа. Установлено [141], что покровный гидрогенный лед имеет среднюю минерализацию  $878,7 \text{ мг/дм}^3$  и СКМ состав, натечный лед (сталактиты и сталагмиты) —  $1113,9 \text{ мг/дм}^3$  и СКМ состав, атмосферные ледяные кристаллы —  $134,7 \text{ мг/дм}^3$  и ГСНК состав.

В 1934—1993 гг. отобрано 93 пробы льдов Кунгурской пещеры. Распределение проб по годам и месяцам пестрое (см. табл. 8.2). Больше всего их приходится на 1968 г (14 %) и 1989 г. (11 %). Остальные годы охарактеризованы единичными пробами. По месяцам лучше охарактеризованы март (28 %) и июль (17 %), несколько хуже — февраль и октябрь (10—11 %). В августе и сентябре пробы не отбирали.

Сведения о месте отбора проб льда и его формах в 85 % случаев позволяют определить генезис льда и разделить генеральную совокупность на три типа [259 и др.], включающие шесть видов льда: *конжеляционный гидрогенный* (сталактиты, сталагмиты, покровный лед), *сублимационный атмосферный* (кристаллы, изморозь) и *без разделения*. Представление об их среднем составе дает табл. 11.7 и рис. 11.5.

Льды Кунгурской пещеры имеют минерализацию, колеблющуюся в широких пределах, — от  $43,3$  до  $2614,4 \text{ мг/дм}^3$ .

*Гидрогенный лед* отличается высокой средней минерализацией ( $1062 \text{ мг/дм}^3$  — сталактиты,  $936 \text{ мг/дм}^3$  — сталагмиты,  $1212 \text{ мг/дм}^3$  — покровный лед).

*Конжеляционный лед* относится к необычным для поверхности земли солоноватым льдам с высокой средней минерализацией ( $936$ — $1212 \text{ мг/дм}^3$ ). Для него характерно повышение рН от 6,9 (сталактиты) до 7,2 (покровный лед). Хотя по *H*-критерию эти льды относятся к одной генеральной совокупности, даже для льда одного вида характерны существенные колебания содержания отдельных компонентов, особенно большие для сталагмитов.

Химический состав льдов Кунгурской пещеры, мг/дм<sup>3</sup> Таблица 11.7

Форма льда	Кол-во проб	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Минерализация	pH	Тип воды
Сталактиты	12	66,6	698,0	9,7	—	—	287,5	25,6	23,4	1062,2	6,9	СК
Сталагмиты	24	54,6	599,7	9,2	—	—	235,2	13,9	17,8	936,6	7,0	СК
Покровы	20	53,3	792,6	6,6	8,3	0,2	289,5	13,9	46,8	1212,4	7,2	СК
Кристаллы	21	30,6	74,1	16,3	3,3	0,2	30,1	2,8	13,5	161,2	6,7	СНК
Изморозь	4	25,6	33,4	1,1	2,7	0,2	10,7	2,3	10,6	89,6	7,4	СНК
Без разделения	12	62	560,5	9,1	6,0	0,3	198,5	14,7	40,5	886,2	7,5	СК
Всего	93	71,2	505,8	9,9	—	—	192,9	12,5	30,9	823,2	7,0	СК

“Вымерзание” льда озер и р. Сылвы

Таблица 11.8

Грот	Дата	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Минерализация	CO <sub>2</sub>	pH	Тип воды
Геологов, вода	I.69 г.	137,2	1323,9	10,6	517,0	42,7	4,6	2036,0	15,8	7,2	СК
лед	I.69 г.	12,2	176,9	2,1	50,1	9,0	13,8	264,1	22,4	7,2	СК
Великан/Вышка											
вода	I.69 г.	231,9	1052,4	14,2	420,0	48,4	20,9	1773,6	15,8	7,4	СК
лед	I.69 г.	195,3	384,3	14,2	160,3	2,3	78,1	834,5	22,4	7,0	ГСНК
Вышка, вода	IV.83 г.	219,7	975,8	8,5	360,2	60,8	26,7	1651,7	15,8	7,4	ГСК
лед	IV.83 г.	54,9	144,1	4,3	66,1	7,3	3,2	279,9	22,4	7,4	ГСК
Река Сылва, вода	III.71 г.	280,7	202,4	42,7	136,3	17,0	41,2	720,3	16,8	7,0	СГК
лед	III.71 г.	30,51	15,6	2,8	8,0	6,2	10,4	73,5	16,8	7,1	СГКН

Об этом же свидетельствует распределение проб льда по гидрохимическим типам: для сталактитов их четыре (СК — 76 %, СКМ, СНК и СНМК — по 8 %), для сталагмитов — семь (СК — 60 %, ГСКМ — 12 %, СНК — 8 %, СКН, ГСКН, СГКН, СХКН — по 4 %), для покровного льда — четыре (СК — 70 %, СКН — 15 %, СНК — 10 %, ГСК — 5 %).

Интересная, но слабо охарактеризованная разновидность конжеляционного льда — лед подземных озер, образующийся в ближних гротах при сильных морозах (табл. 11.8). При этом происходит “вымерзание” солей и резкое (в 8—10 раз) уменьшение минерализации льда по сравнению с исходной водой. Такой же процесс происходит и при замерзании воды в р. Сылве. Тип льда при этом не меняется или происходит его усложнение.

*Сублимационный лед* образуется при кристаллизации влаги на охлажденных поверхностях. Изморозь и кристаллы относятся к пресным льдам. Они имеют среднюю минерализацию 161,2 мг/дм<sup>3</sup> и pH 6,9. Для них характерна сильная изменчивость всех компонентов минерализации, что находит отражение в богатстве гидрохимических типов (12 типов, из них только 25 % СК). К наиболее чистым разновидностям ледяных образований Кунгурской пещеры относится изморозь (89,7 мг/дм<sup>3</sup>, pH 7,4), представленная четырьмя типами — СК, СКМ, СГК и ГСК (по 25 %).

*Льды без разделения* на типы объединяют пробы, установить происхождение которых невозможно. Судя по минерализации и составу, это в ос-

Рис. 11.5. Гидрохимические поля льдов Кунгурской пещеры.  
 1—5 — контуры полей: 1 — сталактиты, 2 — сталагмиты, 3 — покровы, 4 — кристаллы, 5 — изморозь; цифрами обозначено положение средней пробы



новном гидрогенные льды. На графике Дурова льды Кунгурской пещеры образуют перекрывающиеся друг друга геохимические поля (см. рис. 11.5), на которых находят свое место все 22 гидрохимических типа льдов. Средние пробы гидрогенных льдов располагаются не в центре полей, а на их периферии, что свидетельствует о пестроте химического состава льдов.

Имеющихся данных о “валовом” составе льдов пещеры недостаточно для выяснения особенностей метагенеза их химического состава, а также деталей его формирования при образовании, росте и разрушении. Для этого необходима постановка специальных работ и использование новых, более тонких методов анализа.

### 11.5. ВОДА ПЕЩЕРНЫХ ОЗЕР

Первые химические анализы воды из озер Кунгурской пещеры выполнили в конце 30-х гг. Г. А. Максимович и Г. Г. Кобяк [270], отметив их СК состав, причем в качестве источника сульфатов они однозначно рассматривали гипсы и ангидриты [408]<sup>5</sup>. В 1951—1996 гг. в озерах 37 гротов пещеры было отобрано 1074 пробы воды (рис. 11.6): гроты Длинный и Дружбы На-

<sup>5</sup> С. А. Дуров [148] считал, что до 30 % сульфатов в воде озер пещеры образовалось при окислении рассеянных в горной породе сульфидов (пирит, марказит, мельниковит).

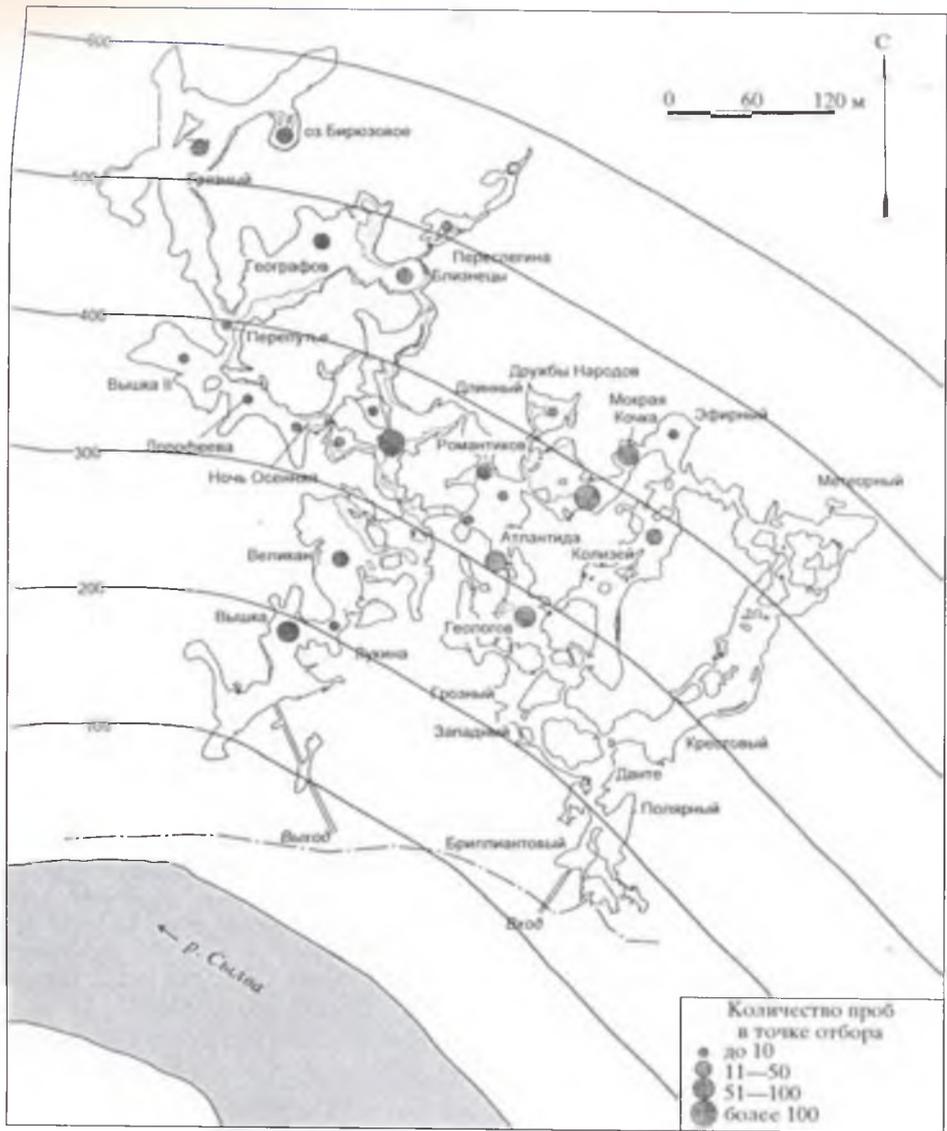


Рис. 11.6. Места отбора проб воды в озерах Кунгурской пещеры



Рис. 11.7. Распределение воды озер (▲) и скважин (□) Кунгурской пещеры по средней многолетней минерализации и типу химического состава: а — озера, б — шурфы (скважины); 1 — минерализация, мг/дм<sup>3</sup>; тип химизма: 2 — СК (100 %), 3 — СК и СМК (90 и 10 %), 4 — СК и СМК (80 и 20 %)

родов — по 27 %; гроты Атлантида, Вышка, Геологов, Мокрая Кочка — по 5 %; на долю остальных озер приходится от 4 до 0,1 % проб. Также пестро распределяются анализы во времени: даже на самые богатые наблюдениями пятилетия (1981—1985, 1986—1990 и 1956—1960 гг.) приходится не более 20 % анализов (см. табл. 8.2). Меньше всего проб проанализировано в 1971—1975 гг. (1,3 % анализов).

**Средняя многолетняя минерализация** (рис. 11.7). Средняя минерализация воды подземных озер Кунгурской пещеры составляет 2120 мг/дм<sup>3</sup>. Все пробы в пределах от 2015 до 2225 мг/дм<sup>3</sup> лежат в поле возможной ошибки анализа (5 %). С учетом этого проанализируем их распределение по площади. Минимальные значения минерализации (менее 2000 мг/дм<sup>3</sup>) отмечены в

Таблица 11.9  
Средняя многолетняя минерализация воды озер в Кунгурской пещере, мг/дм<sup>3</sup>

Грот	Кол-во проб	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Минерализация воды	pH	Тип воды
Аквалангистов	8	148,7	1382,6	8,1	545,3	34,2	33,1	2152,0	7,2	СК
Атлантида	56	147,0	1572,8	10,7	527,5	78,0	78,0	2031,3	7,3	СК
Оз. Бирюзовое	13	190,5	1380,4	9,9	548,3	49,7	25,8	2204,1	7,3	СК
Близнецы	24	171,6	1399,6	10,5	545,5	40,4	37,4	2205,0	7,3	СК
Великан	38	150,5	1356,8	11,8	512,6	56,2	25,6	2124,2	7,3	СК
Вышка	56	140,0	1307,3	10,0	484,5	51,1	32,0	2024,9	7,4	СК
Географов	27	193,0	1351,1	9,9	524,0	53,2	26,1	2165,6	7,3	СК
Геологов	55	149,0	1393,4	10,7	519,43	57,2	23,6	2153,3	7,2	СК
Грязный	15	190,4	1315,1	11,8	500,2	49,4	43,2	2110,0	6,9	СК
Длинный	298	96,9	1430,9	11,6	496,0	65,7	35,3	2136,4	7,4	СК
Дорофеева	6	166,3	1315,1	9,1	541,4	37,1	4,6	2073,4	7,3	СК
Дружбы Народов	301	155,5	1400,9	7,3	506,0	57,5	44,1	2169,2	7,4	СК
Колизей	42	97,1	1450,9	10,7	512,5	66,6	39,0	2177,2	7,4	СК
Мокрая Кочка	55	97,8	1280,7	8,4	477,5	44,8	21,7	1930,8	7,3	СК
Ночь Осенняя	10	155,6	1314,5	12,0	514,7	35,6	46,2	2078,5	7,2	СК
Романтиков	33	160,3	1246,5	8,9	499,7	37,0	19,5	1971,8	7,4	СК
Хлебниковых	3	150,5	1376,5	16,2	527,7	46,6	32,2	2149,6	7,4	СК
Хрустальный	4	155,6	1490,3	8,7	516,1	63,6	65,6	2299,9	7,4	СК
<b>Среднее</b>	<b>1044</b>	<b>150,9</b>	<b>1375,8</b>	<b>10,4</b>	<b>516,6</b>	<b>51,3</b>	<b>35,1</b>	<b>2119,7</b>	<b>7,0</b>	

двух местах. В озере грота Мокрая Кочка это объясняется обильным притоком инфильтрационных вод после снеготаяния и выпадения осадков. Озера с несколько повышенной минерализацией (более 2200 мг/дм<sup>3</sup>) группируются в северной части пещеры (Близнецы, Бирюзовое, Хрустальный). В распределении озер с водой средней минерализации (2000—2200 мг/дм<sup>3</sup>) закономерности не прослеживаются.

Отсутствие существенных различий в среднем многолетнем химическом составе озер Кунгурской пещеры подтверждает и распределение вод по типам. В целом для всех озер характерен СК состав. Детальный анализ выявил некоторые различия (см. табл. 11.10). Исключительно СК состав имеют озера северной группы (Бирюзовое, Географов, Близнецы, Грязный, Заозерный, Перепутье, Дорофеева); ближе к югу в незначительных количествах (6—10 %) появляются воды СКМ типа (гроты Длинный, Романтиков, Дружбы Народов, Мокрая Кочка, Ночь Осенняя, Великан), а еще южнее (гроты Аквалангистов, Вышка, Атлантида, Геологов, Грозный, Колизей) их количество возрастает до 13—30 %. Наиболее вероятно это связано с подтоком воды из р. Сылвы.

**Среднемесячная многолетняя минерализация.** Лучше других охарактеризованы март и апрель (по 20 % анализов), слабее — февраль (11 %) и май (7 %); на долю остальных месяцев приходится 4—6 %; для отдельных гротов имеются только единичные анализы (табл. 11.9).

Как эталонные выбраны озера гротов Длинный и Дружбы Народов, имеющие наиболее полный ряд наблюдений. По ним были вычислены средние месячные значения и их статистики, а затем с этими рядами сравнили корот-

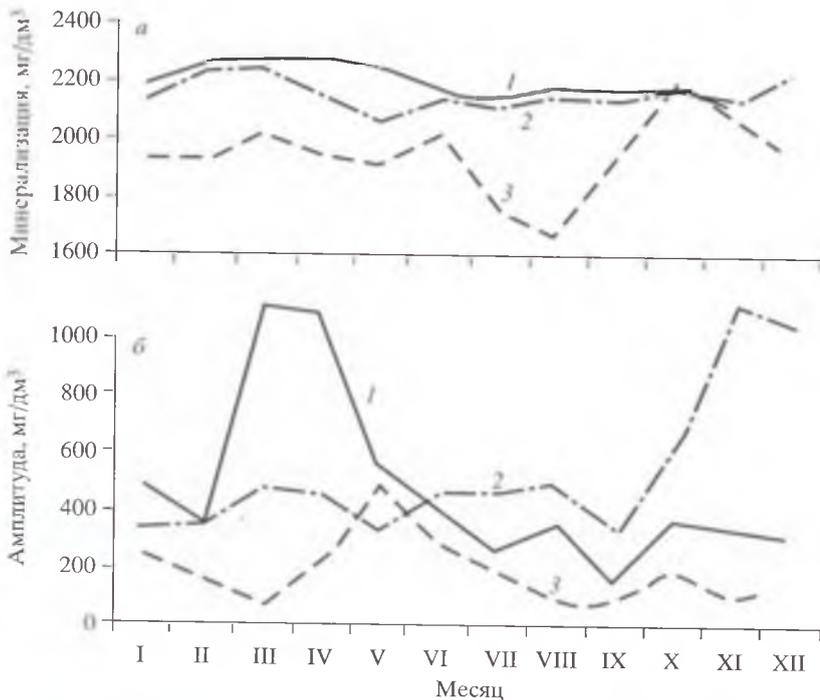


Рис. 11.8. Ход среднемесячных многолетних значений минерализации воды (а) и ее амплитуд (б) в трех группах озер.

Гроты: 1 — Длинный, 2 — Дружбы Народов, 3 — Мокрая Кочка

кие ряды по другим озерам. При совпадении ( $\hat{H}$ -критерий менее 1,96) за их счет наращивали длинные ряды. Так были сформированы три группы озер (рис. 11.8). Гроты Длинный и Дружбы Народов в основном отличаются ходом амплитуд, что объясняется степенью тесноты связей с водами р. Сылвы: подток ее более пресных вод определяет максимальные амплитуды колебаний в гроте Длинном в марте-апреле, а поступление вод иренского водоносного комплекса — в гроте Дружбы Народов в ноябре-декабре. Различия между группами подчеркивает не только высокое значение  $\hat{H}$ -критерия (4,9), но и разный характер распределения максимумов и минимумов.

Из 12 месяцев по абсолютной величине не совпадает (табл. 11.11) ни одно значение минерализации (максимумы — 3217 и 3113, минимумы — 1717 и 1228; по максимальной амплитуде — одно (1155 и 1228), по коэффициенту вариации — ни одно (0, 14 и 0,11); по месяцу наступления — ни одно (в гроте Длинном — в марте-апреле, в гроте Дружбы Народов — в ноябре); по годам наступления по максимуму — ни одно, по минимуму — 2 из 12 (июль 1993 г. и ноябрь 1962 г.); по амплитуде — ни одно; по коэффициенту вариации — июнь (0,05). Максимальные и минимальные значения и амплитуды колебаний в озере грота Длинный отмечены весной (февраль, март 1953 и 1984 гг.), а в гроте Дружбы Народов — осенью (ноябрь 1983 и 1962 гг.). Таким образом, многолетний месячный ход минерализации в них различается (см. табл. 11.11).

Гидрохимические типы воды в озерах Кунгурской пещеры, % Таблица 11.10

Грот	Кол-во проб	Тип воды		Грот	Кол-во проб	Тип воды	
		СК	СМК			СК	СМК
Оз. Бирюзовое	15	100	—	Мокрая Кочка	55	90	10
Географов	27	100	—	Ночь Осенняя	10	90	10
Близнецы	24	100	—	Великан	38	90	10
Грязный	15	100	—	Аквалангистов	8	87	13
Заозерный	6	100	—	Вышка	54	87	13
Перепутье	8	100	—	Геологов	52	87	13
Дорофеева	6	100	—	Колизей	43	81	19
Длинный	295	94	6	Грозный	15	80	20
Романтиков	33	94	6	Атлантида	58	70	30
Дружбы Народов	299	93	7				

Распределение параметров минерализации в озерах гротов Длинный и Дружбы Народов (в скобках — год наступления, полужирным выделены экстремальные значения) Таблица 11.11

Месяц	Длинный				Дружбы Народов			
	max	min	амплит.	CV, %	max	min	амплит.	CV, %
I	2401 (1985)	2046 (1982)	354	0,04	2336 (1996)	1846 (1963)	490	0,06
II	2412 (1980)	2011 (1984)	350	<b>0,14</b>	2376 (1989)	2002 (1994)	367	0,06
III	<b>3217</b> (1953)	2051 (1984)	<b>1155</b>	0,08	2501 (1968)	2113 (1960)	488	0,05
IV	2885 (1987)	<b>1717</b> (1984)	1151	0,09	2329 (1940)	1842 (1953)	487	0,05
V	2638 (1980)	2057 (1983)	581	0,07	2285 (1994)	1954 (1967)	331	0,06
VI	2377 (1980)	1945 (1968)	427	0,05	2356 (1958)	1901 (1957)	454	0,05
VII	2279 (1988)	1994 (1993)	298	0,06	2858 (1986)	1878 (1993)	480	0,05
VIII	2301 (1994)	1960 (1993)	341	0,04	2398 (1986)	1920 (1991)	478	0,05
IX	2268 (1990)	2101 (1993)	167	0,03	2257 (1989)	1913 (1953)	343	0,05
X	2413 (1994)	2023 (1988)	389	0,05	2462 (1953)	1842 (1993)	620	0,08
XI	1355 (1985)	1985 (1962)	370	0,05	<b>3114</b> (1983)	<b>1835</b> (1962)	<b>1228</b>	<b>0,11</b>
XII	2365 (1986)	2064 (1980)	301	0,03	2956 (1934)	1872 (1993)	1084	0,09

В озере грота Мокрая Кочка средние месячные значения минерализации весь год (кроме октября) ниже, чем в гротах Длинном и Дружбы Народов; особенно резко понижается минерализация в июле и августе. Существенно ниже и амплитуда колебаний минерализации, которая отличается еще и ходом (максимум в мае, когда наблюдается самый сильный водоприток по трещинам).

**Суточные замеры.** В 1975 г. Ю. А. Ежов [153, 154] для установления суточного хода минерализации в озерах Кунгурской пещеры выполнил два цикла замеров: в гроте Смелых 8—17 января пробы отбирали в 0, 6, 12, 18 ч, в гроте Крестовый 14—15 мая — ежедневно. Выявленные суточные колебания основных компонентов (1—4 %) лежат в пределах точности анализа (рис. 11.9) и поэтому нет оснований связывать их с какими-либо природными явлениями.

Рис. 11.9. Средний суточный ход химического состава воды в гроте Смелых (9—18.I.1975 г.)

В 1995 г. К. А. Горбунова [87] пыталась проанализировать гидрохимическую ситуацию в конкретные дни разных сезонов, используя для этого компьютерную технологию. Полученная картина оценена как не поддающаяся объяснению.

Особое место занимает вопрос об изменениях химического состава воды озер Кунгурской пещеры с глубиной, так как от этого зависит ответ на вопрос о наличии подтока воды из филипповского горизонта и косвенно о происхождении пещеры. Литературные данные по этому поводу противоречивы: большинство исследователей считает, что с глубиной минерализация воды увеличивается [29, 98, 99].

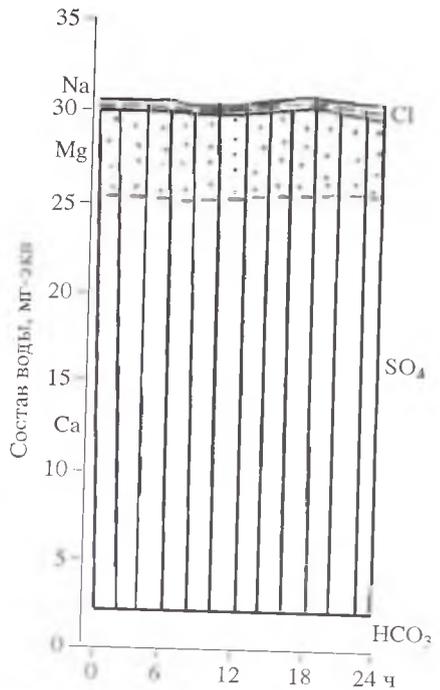
Кунгурский стационар 26.III.1983 г. провел последний отбор проб в центральной части Длинного озера. Статистическая обработка полученных данных

показала (табл. 11.12), что по ионам  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и pH коэффициент вариации (0,00—0,01) меньше ошибки наблюдений (0,05). По  $\text{Cl}^-$ , не играющему существенной роли в формировании минерализации воды, он больше (0,11). Тип химизма с глубиной не меняется (СК). Таким образом, изменения химизма воды по глубине Длинного озера лежат в пределах точности наблюдений. Обращают на себя внимание полное равенство содержаний ионов  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SiO}_2$ , что, исходя из методики производства химических анализов, невозможно, и незаконномерные изменения количества ионов  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{O}_2$  с глубиной.

Примерно такая же картина наблюдается и по пещере в целом. В 1968—1989 гг. было выполнено 44 пары анализов у поверхности и у дна озер на глубине от 0,2 до 4,0 м (табл. 11.13). Почти в половине случаев изменения минерализации с глубиной лежат в пределах точности определения, в 34 % — с глубиной она статистически достоверно возрастает (градиент  $+135 \text{ мг/дм}^3$  на 1 м), в 14 % — незначительно уменьшается (градиент  $-15 \text{ мг/дм}^3$  на 1 м).

На рис. 11.10 показано размещение гротов с разными типами изменений минерализации по глубине: в озерах гротов Атлантида, Дорофеева, Бирюзовое, Великан, Географов, Дружбы Народов, Перепутье, Романтиков, Хлебниковых она увеличивается, а в озерах гротов Близицы, Грязный, Длинный, Ночь Осенняя, Романтиков — уменьшается. Закономерности в их размещении по площади не просматриваются.

По мере приближения к р. Сылве происходит изменение типа химизма воды озер (см. табл. 11.10): от 100 % СК (Бирюзовое, Близицы, Географов, Заозерный, Перепутье) до 87—70 % (Аквалангистов, Атлантида, Вышка, Геологов, Грязный, Колизей).



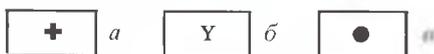
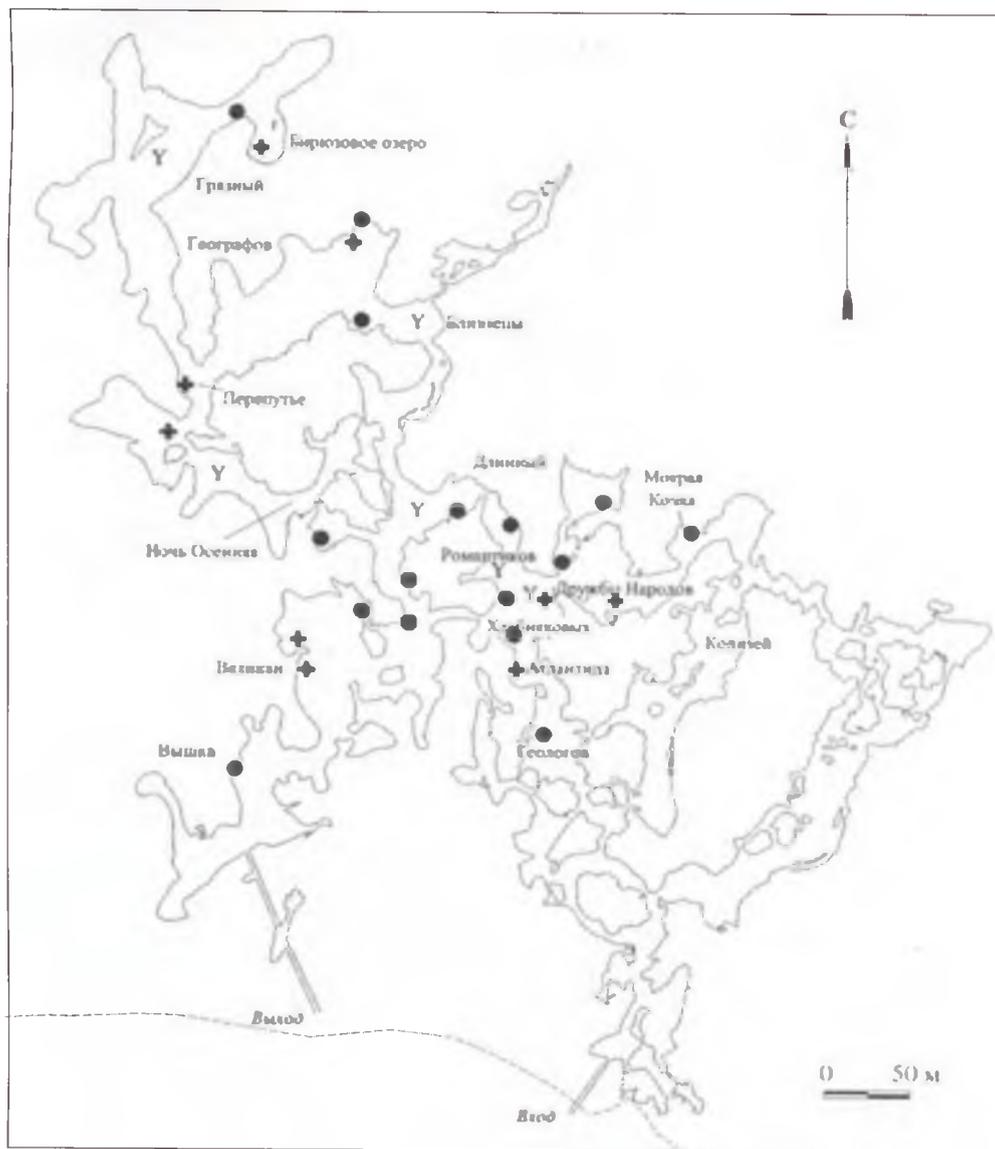


Рис. 11.10. Изменения минерализации воды по глубине (*a* — увеличение, *б* — уменьшение, *в* — отсутствуют)

Таблица 11.12

**Химический состав воды в озере грота Длинный на разной глубине, мг/дм<sup>3</sup>**

Глубина, м	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Минерализация	pH	SiO <sub>2</sub>
0,0	146,4	1481,4	5,3	521,0	72,9	2,8	0,08	2280,1	7,6	14,0
0,1	146,4	1481,4	5,3	521,0	72,9	3,2	0,03	2280,0	7,4	14,0
0,2	146,4	1497,9	6,4	521,0	72,9	3,2	0,06	2308,2	7,6	14,0
0,3	146,2	1497,9	6,0	521,0	72,9	3,0	0,07	2307,4	7,4	14,0
0,4	146,4	1506,1	6,4	521,0	72,9	2,0	0,05	2319,9	7,4	14,0
0,5	146,4	1497,9	7,1	521,0	72,9	2,6	0,05	2308,9	7,4	14,0
0,6	146,4	1497,9	5,7	521,0	72,9	2,8	0,03	2306,3	7,4	14,0
0,7	146,4	1497,9	5,7	521,0	72,9	3,4	0,03	2307,1	7,6	14,0
0,8	146,4	1506,1	6,4	521,0	72,9	2,8	0,03	2320,8	7,6	14,0
0,9	146,4	1497,9	7,1	521,0	72,9	2,8	0,03	2308,6	7,5	14,0
1,0	146,4	1497,9	7,1	521,0	72,9	3,0	0,03	2309,0	7,6	14,0
<b>Среднее</b>	<b>146,4</b>	<b>1496,4</b>	<b>6,2</b>	<b>521,0</b>	<b>72,9</b>	<b>3,0</b>	<b>0,04</b>	<b>2304,4</b>	<b>7,6</b>	<b>14,0</b>
<i>CV, %</i>	0,00	0,01	0,11	0,00	0,00	0,07	0,05	0,01	0,01	0,00

Таблица 11.13

**Изменение минерализации воды в озерах Кунгурской пещеры с глубиной**

Глубина, м	Изменения минерализации (М)								
	в пределах точности определения			Увеличение			Уменьшение		
	Кол-во анализов	М, мг/дм <sup>3</sup>	CV	Кол-во анализов	М, мг/дм <sup>3</sup>	CV	Кол-во анализов	М, мг/дм <sup>3</sup>	CV
0,0	23 (52 %)	2170	0,04	15 (34 %)	1980	0,14	6 (14 %)	2380	0,06
2,0		2200	0,04		2250	0,08		2230	0,05

Вопрос об изменении химического состава воды озер Кунгурской пещеры с глубиной нельзя считать решенным, так как геофизические исследования методом естественных потенциалов по руслу р. Сылвы [371] выявили как приток воды из лежащего ниже филипповского горизонта, так и поглощение речных вод. Необходимо произвести отбор проб в озерах, где наиболее вероятен подток воды из филипповских отложений (например, “Синюшкин колодец”), использовать для отбора проб батометры, а также применить более точные методы анализа химического состава подземных вод.

## 11.6. ВОДА ИЗ СКВАЖИН В ПЕЩЕРЕ

В Кунгурской пещере проводились наблюдения за химическим составом воды в двух скважинах (гроты Коралловый, Руины) и трех шурфах (гроты Грозный, Крестовый, Смелых). Сведения об их расположении приведены на рис. 10.1. За 1951—1996 гг. выполнено свыше 700 анализов воды. В разные годы и месяцы анализировалось от 0,3 до 17 % проб.

Средняя многолетняя минерализация составляет 2148 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 11.14), изменения по гротам и месяцам (1 %) лежат в пределах ошиб-

Таблица 11.14

Среднемесячная минерализация воды в шурфах и скважинах Кунгурской пещеры, мг/дм<sup>3</sup>

Грот	Кол-во замеров	Месяц					
		I	II	III	IV	V	VI
Грозный	59	2180	2094	2179	2114	2081	2112
Смелых	70	2131	2227	2233	2126	2135	2116
Крестовый	185	2254	2286	2219	2165	2127	2137
Руины	195	2161	2210	2193	2181	2184	2163
Коралловый	198	2169	2147	2183	2119	2078	2136
<b>Среднее</b>	<b>707</b>	<b>2179</b>	<b>2193</b>	<b>2202</b>	<b>2141</b>	<b>2122</b>	<b>2124</b>

Грот	Кол-во замеров	Месяц					
		VII	VIII	IX	X	XI	XII
Грозный	2158	2194	2132	—	—	2178	2127
Смелых	2108	—	—	—	—	—	2103
Крестовый	2185	2277	2176	2176	2266	2248	2170
Руины	2176	2159	2185	2205	2164	2174	2178
Коралловый	2100	2126	2155	2146	2179	2137	2151
<b>Среднее</b>	<b>2148</b>	<b>2191</b>	<b>2164</b>	<b>2179</b>	<b>2206</b>	<b>2187</b>	<b>2148</b>

Таблица 11.15

Тип воды в скважинах и шурфах Кунгурской пещеры

Грот	Кол-во проб	СК		СМК	
		всего	% от общ. кол-ва	всего	% от общ. кол-ва
Грозный	59	49	85	10	15
Смелых	70	66	95	4	5
Крестовый	185	172	90	13	10
Руины	195	172	90	23	10
Коралловый	198	181	90	17	10
<b>Среднее</b>	<b>707</b>	<b>640</b>	<b>90</b>	<b>67</b>	<b>10</b>

ки наблюдений (все анализы принадлежат к одной генеральной совокупности). По составу вода относится к СК типу (90—95 %, табл. 11.15), на втором месте СМК тип. Четких закономерностей в их распределении по месяцам нет.

## 11.7. ВОДА ИЗ СКВАЖИН У ПЕЩЕРЫ

**Аллювиальный водоносный горизонт.** В непосредственной близости от Кунгурской пещеры пробы воды в разные годы отбирали в четырех водопунктах: в колодце у экскурсбюро (№ 1, 34 анализа), в скважинах у киоска “Кристалл” (№ 2, 4 анализа), у стационара (№ 3, 5 анализов) и близ разворотного круга автобуса у т/б “Сталагмит” (№ 4, 3 анализа). Скважины

Среднемесячные значения компонентов минерализации воды из колодца у экскурсбюро

Таблица 11.16

Месяц	НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Минерализация	pH	Тип воды
I	500,3	683,1	27,7	330,7	33,4	58,2	1708,1	7,4	ГСК
II	500,3	641,9	29,8	330,7	24,3	93,3	1643,3	7,3	ГСК
III	506,5	644,0	24,7	300,6	30,4	118,4	1636,9	7,6	ГСНК
IV	488,2	674,4	25,6	360,7	39,6	35,9	1637,4	7,3	ГСК
V	532,5	488,3	23,7	320,6	30,4	32,2	1455,4	7,1	ГСК
VI	472,9	705,7	36,3	315,6	33,4	114,8	1699,8	7,4	ГСНК
VII	492,2	537,7	29,3	320,6	33,1	29,6	1460,0	7,4	ГСК
VIII	500,3	594,6	25,2	335,7	27,3	52,4	1150,0	7,3	ГСК
IX	402,7	621,4	23,4	325,6	36,5	25,4	1457,6	7,3	ГСК
X	500,4	674,9	26,5	350,7	27,3	80,8	1688,8	7,3	ГСК
XI	496,3	630,9	30,4	350,7	18,2	76,7	1627,7	7,3	ГСК
XII	500,4	646,1	30,7	360,7	36,5	42,2	1661,0	7,4	ГСК
Среднее	508,4	570,5	24,9	308,7	37,5	60,8	1423,5	7,3	ГСК

вскрывают разрез отложений первой надпойменной террасы р. Сылвы. По ним данные бурения не сохранились, но расположенные рядом скважины ВерхнекамГИСИЗа дают следующий разрез: 0,0—1,50 м — насыпной грунт; 1,50—11,10 м — щебнистый грунт с дрсвой известняка и ангидрита, заполнитель — суглинок; 11,10—12,00 м — известняк серый, доломитизированный; вода появилась примерно с глубины 5 м. Сведения об обсадке скважин и коэффициентах фильтрации аллювиальных отложений отсутствуют.

От подножия Ледяной горы к р. Сылве минерализация воды в скважинах снижается от 1585 до 931 мг/дм<sup>3</sup>; в эту же сторону уменьшается содержание ионов Ca<sup>2+</sup> (от 333 до 182 мг/дм<sup>3</sup>) и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (от 630 до 230 мг/дм<sup>3</sup>) и повышается — Mg<sup>2+</sup> (от 30,7 до 46,8 мг/дм<sup>3</sup>) и Cl<sup>-</sup> (от 28,2 до 86,2 мг/дм<sup>3</sup>), а состав воды меняется от ГСК до ГСМК. Остальные компоненты минерализации меняются незначительно и незакономерно.

К сожалению, для режимной обработки пригодны только анализы из скважины у экскурсбюро. В табл. 11.16 приведены данные о среднемесячных значениях компонентов минерализации за 4 года, а по ним построен график (рис. 11.11), иллюстрирующий изменения химизма аллювиальных вод на протяжении года. Наиболее высокая и устойчивая минерализация аллювиальных вод прослеживается в зимние месяцы (X—III). В мае, в связи с паводком на р. Сылве, наблюдается падение минерализации, в июне — ее подъем (подток вод, заполнивших галереи пещеры и трещинные зоны в гипсах Ледяной горы), причем он происходит тремя волнами (в VI, VIII и X), а затем устанавливается режим холодного периода. В скважине преобладают воды ГСК типа, в марте и июне сменяющиеся на ГСНК.

**Филипповский водоносный горизонт.** К сожалению, данных по горизонту немного. Непосредственно у Кунгурской пещеры в 1979 г. были пробурены три скважины ВерхнекамГИСИЗа. В них отобраны пробы из филипповских известняков на глубине 26, 27 и 40 м. Кроме того, имеет-

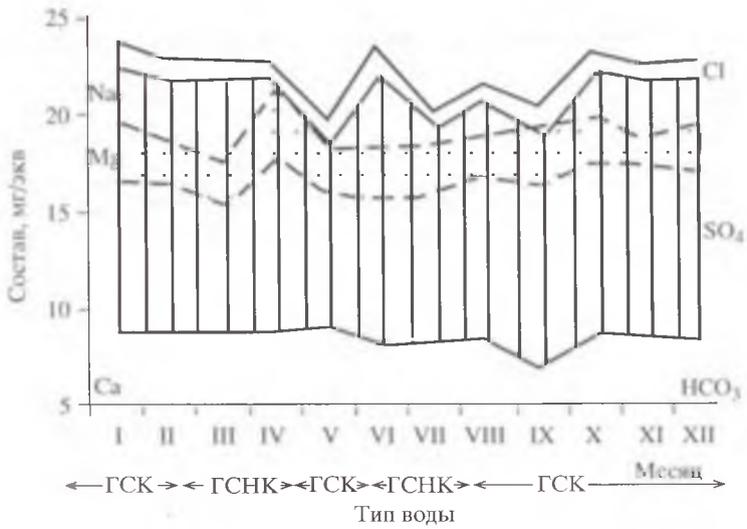


Рис. 11.11. Годовой ход химического состава воды в колодце у экскурсбюро

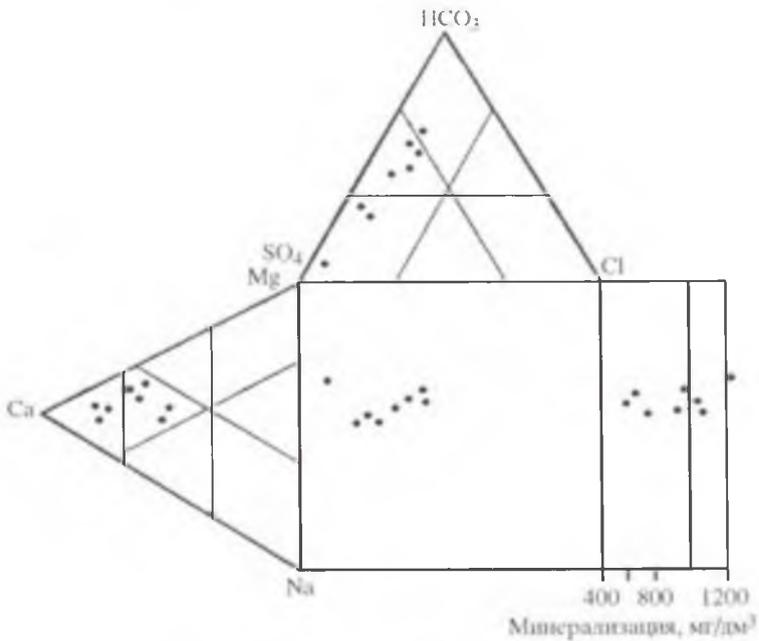


Рис. 11.12. Химический состав воды из филипповского водоносного горизонта у Кунгурской пещеры

Химический состав филипповского водоносного горизонта (по скважинам ВерхнекамГИСИЗа у входа в Кулгурскую пещеру, 12.VII.1979 г.), мг/дм<sup>3</sup>

Таблица 11.17

№ скв.	Глубина, м	НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Сl-	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Минерализация	pH	Тип воды
1	25	402,7	716,8	42,5	290,6	97,3	4,7	1554,6	7,5	ГСМК
	40	390,5	736,6	49,6	270,5	91,2	48,4	1586,8	7,4	ГСМК
3	26	366,1	745,6	49,6	300,6	54,7	78,9	1595,5	7,7	ГСМК
	40	402,7	707,8	42,5	280,6	91,2	24,0	1548,8	7,5	ГСМК
Среднее		397,5	726,7	46,1	285,6	83,6	39,0	1578,5	7,5	

ся еще несколько анализов воды из скважины у школы в с. Филипповское и Плеханово. Сведения об их составе приведены в табл. 11.17 и на рис. 11.12.

### 11.8. ВОДА РЕК СЫЛВЫ И ШАКВЫ

В химической лаборатории стационара за 38 лет (1958—1996 гг.) выполнено 220 анализов воды из р. Сылвы, по годам от 1 (1953, 1954 гг.) по 14 (1978 г.) анализов. Больше всего проб отобрано в июне (10 %), меньше — в июле и ноябре (7 %).

Средняя многолетняя проба воды из р. Сылвы имеет минерализацию 508,1 мг/дм<sup>3</sup>, pH 7,4 и СГМК состав (табл. 11.18). Месячные величины компонентов минерализации характеризуются средними значениями коэффициентов вариации (от 0,24 до 0,40). Наименьшую вариацию имеет ион НСО<sub>3</sub><sup>-</sup> (0,19), наибольшую — Mg<sup>2+</sup> (0,48). Средние месячные значения минерализации варьируют от 300 до 720 мг/дм<sup>3</sup>. Наиболее высокая минерализация характерна для февраля, наиболее низкая — для мая. Как следует из рис. 11.13,

Среднемесячный многолетний химический состав воды в р. Сылве, мг/дм<sup>3</sup>

Таблица 11.18

Месяц	Кол-во проб	НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Сl-	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Минерализация	pH	Тип воды
I	17	259,4	184,5	26,9	107,7	21,2	40,2	639,8	7,4	СГМК
II	19	274,1	211,5	26,5	120,5	24,3	42,1	699,0	7,4	СГМК
III	20	25,5	185,5	27,6	113,6	21,5	38,6	652,7	7,5	СГК
IV	20	161,6	137,0	15,9	72,3	15,7	29,9	432,5	7,5	СГНМК
V	20	126,2	68,6	12,0	48,6	9,6	25,5	290,5	7,5	СГНК
VI	21	193,9	133,2	21,2	72,54	16,7	41,8	479,2	7,6	СГНК
VII	12	189,2	139,4	24,2	79,0	17,3	34,9	484,0	7,6	СГНК
VIII	18	195,3	146,8	25,6	84,2	20,1	32,0	504,0	7,6	СГМК
IX	19	209,0	134,3	21,7	84,4	17,9	33,1	500,4	7,6	СГМК
X	18	183,1	116,0	16,6	72,8	13,7	32,6	434,8	7,7	СГНК
XI	18	223,1	153,5	24,8	93,1	1,81	38,9	551,5	7,6	СГНК
XII	18	243,3	166,1	25,4	102,0	19,3	42,3	598,4	7,5	СГНК
Среднее	220	205,0	148,5	22,1	95,1	17,9	19,5	508,1	7,5	СГМК

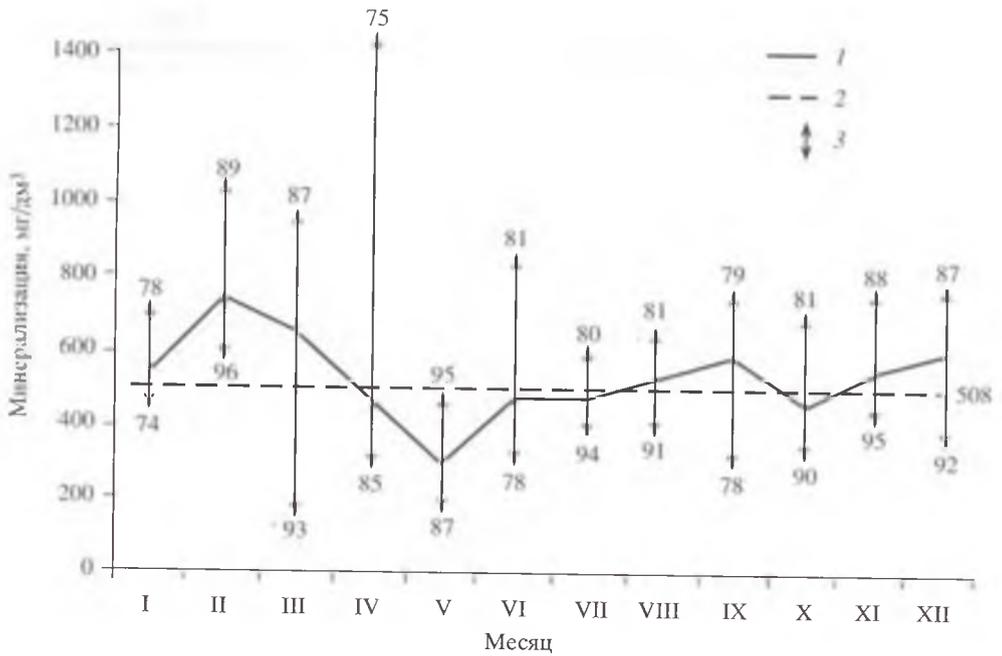


Рис. 11.13. Ход средней многолетней месячной минерализации воды в р. Сылве  
 1 — значения минерализации, мг/дм<sup>3</sup>: 1 — средняя месячная многолетняя, 2 — средняя годовая многолетняя; 3 — амплитуда колебаний (цифры — годы, когда наблюдались максимальные и минимальные значения минерализации)

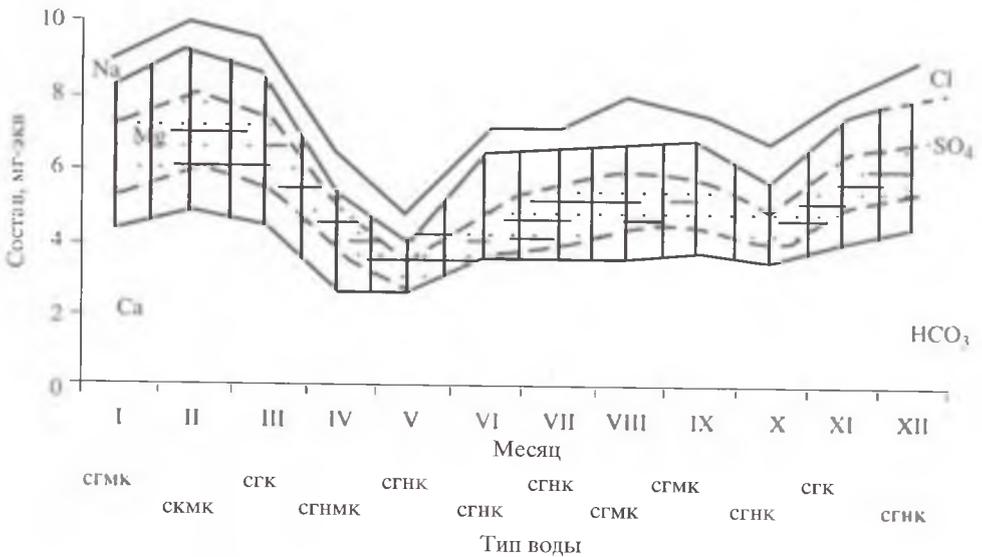


Рис. 11.14. Месячный ход ионного состава воды в р. Сылве

Рис. 11.15. Химический состав воды в реках Сылва и Шаква (среднемесячные многолетние значения).  
Гидрохимические поля: *a* — воды в р. Сылва, *b* — воды в р. Шаква

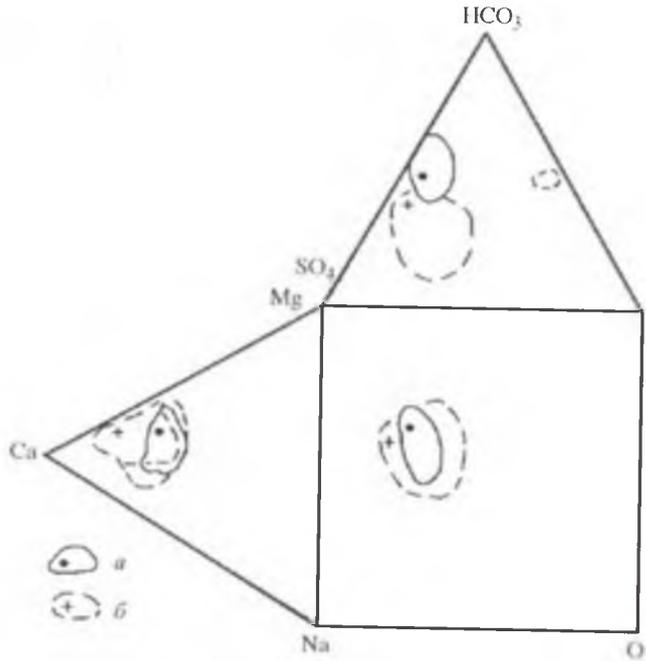
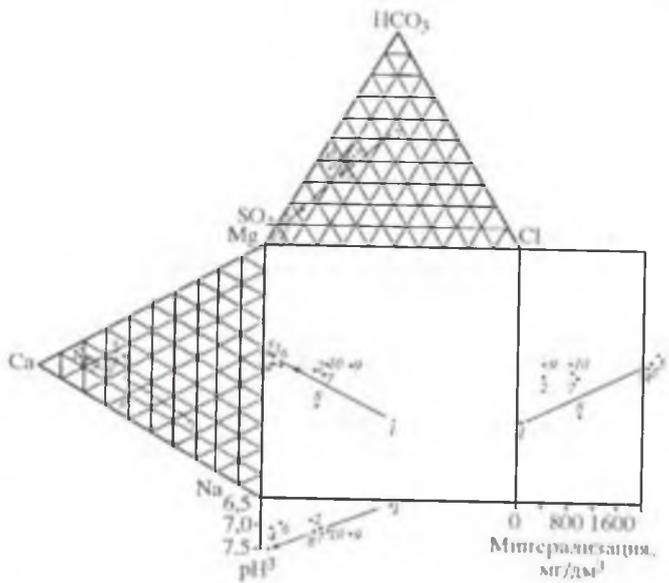


Рис. 11.16. Гидрохимические типы воды района пещеры.

Виды водопроявлений: 1 — снег, 2 — поверхностные воды, 3 — капель, 4 — озера, 5 — скважины и шурфы в пещере, 6 — лед, 7 — аллювиальный водоносный горизонт, 8 — филипповский водоносный горизонт, 9 — р. Сылва, 10 — р. Шаква



максимальные и минимальные значения минерализации воды в р. Сылве наблюдаются в разные годы. Абсолютный максимум (более 1400 мг/дм<sup>3</sup>) отмечен в апреле 1975 г., абсолютный минимум (около 100 мг/дм<sup>3</sup>) — в марте 1993 г.

Профиль Бродского, построенный по среднемесячным данным (рис. 11.14) и график Дурова (рис. 11.15) свидетельствуют об устойчивом СГК химическом составе воды р. Сылвы. По анионному составу все анализы образуют поле со средним содержанием гидрокарбонатов 50 % и сульфатов — 41 %; по катионному составу — поле со средним содержанием кальция 59 % и магния — 20 %. Небольшие вариации соотношения ионов вызывают появление вод СГМК (I, II) и СГНК (V—VII, X—XI) состава. Наиболее сложный пятикомпонентный СГНМК состав воды в р. Сылве отмечен в июне.

Минерализация воды в р. Сылве связана с ее уровнями (коэффициент корреляции  $0,40 \pm 0,10$ ). Несмотря на невысокое значение, уровень с вероятностью 95 % находится в доверительных пределах для числа членов от 50 до 100 [192]. Связь между уровнями и химическими типами воды в р. Сылве отсутствует. Четкие закономерности в изменениях гидрохимического типа воды по месяцам и годам также не прослеживаются.

Сведений о химическом составе воды в р. Шакве немного. В 1954—1971 гг. в районе Ледяной горы было отобрано всего 8 проб (март, май, июль, август). Средняя многолетняя проба воды имеет расчетную минерализацию 913,7 мг/дм<sup>3</sup>, что почти в два раза выше, чем в р. Сылве; среднее содержание ионов  $\text{HCO}_3^-$  — 273,2 (0,23),  $\text{SO}_4^{2-}$  — 353,9 (0,14),  $\text{Cl}^-$  — 32,0 (0,49),  $\text{Ca}^{2+}$  — 172,8 (0,14),  $\text{Mg}^{2+}$  — 35,7 (0,28),  $\text{Na}^+$  — 27,4 мг/дм<sup>3</sup> (в скобках приведены коэффициенты вариации); рН 7,2 и ГСМК состав, меняющийся в разные годы и месяцы от ГСМ до ГСНКМ.

Ход метабенеза вод района Кунгурской пещеры (график Дурова) обнаруживает (рис. 11.16) четкую закономерность: от атмосферных осадков к капели, воде озер и скважин происходит увеличение минерализации, рН и изменение типа воды от СНК до СК.

## 11.9. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНЕ ПЕЩЕРЫ

Ледяная гора с Кунгурской пещерой являются великолепным модельным объектом для изучения формирования загрязнения карстовых вод под влиянием природных и антропогенных факторов. Кунгурский стационар, городская санэпидстанция и другие организации Пермской области неоднократно использовали пещеру для этих целей.

В 1955—1996 гг. в Кунгурской пещере проводился массовый отбор проб воды на химический анализ, при котором наряду с основными компонентами определялись и некоторые загрязнители. Этот материал никогда целенаправленно не обрабатывался. В табл. 11.19 приведены данные по загрязнению, содержащиеся более чем в 400 химических анализах. Они сгруппированы по видам водопроявлений. Так как данных недостаточно для осреднения по месяцам, ниже приводятся средние многолетние данные. Видно, что из всех водных объектов наиболее загрязнены озера и лед. Из-за низкой минерализации и специфики образования сублимационный лед может считаться чутким индикатором загрязнения атмосферы пещеры.

Таблица 11.19

**Загрязнение подземных вод района Кунгурской пещеры (превышение ПДК оценено по максимальным содержаниям загрязняющих компонентов, раз)**

Загрязняющие компоненты	ПДК [366]	Водный объект							
		атмосф. осадки	поверхностные воды	капель	лед	озера в пещере	скважины и шурфы	колодцы и скважины	р. Сылва
Минерализация	Не более 1000	—	2,4	2,3	2,0	2,4	2,4	2,4	—
Хлориды	350	—	—	—	—	—	—	—	—
Сульфаты	500	—	3,0	3,4	2,9	5,8	3,7	3,1	—
NH <sub>4</sub>	2,0	—	—	1,1	1,5	2,2	—	—	1,2
SiO <sub>2</sub>	10,0	—	1,4	1,2	1,6	8	—	8	1,4
NO <sub>3</sub>	45,0	—	4,6	—	—	1,3	—	—	—
NO <sub>2</sub>	3,3	—	—	—	8,8	—	—	—	7,0
Fe <sub>общ</sub>	0,5	2,6	—	1,1	—	9,0	—	1,4	2,4
Нефтепродукты	0,3	—	—	—	—	—	—	—	—
pH	Не более 6.5—8.5	—	—	—	+	—	—	—	—
К-во компонентов с превышением		1	4	5	6	6	2	4	4

“—” — превышения нет, “+” — незначительное превышение.

Таблица 11.20

**Изменения микробиологических характеристик подземных вод Кунгурской пещеры под влиянием инфильтрационных вод (капель) и вод р. Сылвы (18.V.1998 г.)**

Показатели состава вод	Река Сылва ниже Кунгура	Грот и расстояние от реки, м			
		Эфирный, 460	Дружбы Народов, 380	Коллизей, 370	Вышка, 200
		Капель	Озера		
Температура, °C	5,5	5,1	4,6—5,1	3,6—4,2	2,2—5,1
pH	7,4	8,3	7,6—8,1	8,1—8,2	7,5—7,6
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	10—57	1420	1320	1380	119
Растворенный O <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	8,8—9,6	11,2	9,0—9,2	10,0—10,8	8,2—10,3
Фосфор общий, мг/дм <sup>3</sup>	0,30—0,74	0,07	0,03—0,48	0,03—0,05	0,04—0,22
Железо общее, мг/дм <sup>3</sup>	0,36—0,70	1,4	0,60—0,96	0,60—1,00	0,40—0,73
Количество бактерий в 1 мл	9,9—13,3	6,20	0,34—8,25	0,52—0,53	0,18—0,91

В Кунгурской пещере неоднократно проводились и специальные эксперименты по загрязнению карстовых вод. В январе 1948 г. в карстовую воронку, связанную с одной из органых труб пещеры было загружено нескольких бочек нечистот, что установлено опытным путем в результате окрашивания флюоресцеином. Наблюдения за каплей проводились ежемесячно в течение одного года. Загрязнение начало сказываться на составе капли в начале снеготаяния, а в апреле отмечено резкое увеличение содержания ионов Cl, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, которое сохранялось до августа—сентября, а затем начало постепенно снижаться.

## Глава 12

# МИКРОКЛИМАТ

### 12.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Микроклиматический режим Кунгурской пещеры определяется общими закономерностями формирования микроклимата карстовых полостей, расположенных под междуречными пространствами [220]. Зона вертикальной циркуляции карстовых вод в гипсоангидритовых породах Ледяной горы характеризуется интенсивным воздухообменом с атмосферой. Этому способствуют ее значительная мощность (до 80 м), наличие в ней взаимосвязанных систем трещин и полостей, разность температур (плотностей) воздуха в гротах пещеры и на поверхности земли.

В зимнее время потоки теплого воздуха поднимаются по вертикальным каналам из гротов на поверхность земли, а холодный и более плотный атмосферный воздух подсасывается в них по системам горизонтальных галерей. В летнее время направление воздушного потока изменяется на противоположное: более холодный воздух вытекает из каналов в бортах Ледяной горы, а с ее поверхности в гроты подсасывается более теплый воздух.

Зимнему воздухообмену сквозь трещины в массиве Ледяной горы препятствует наличие зоны сезонно-промерзающих пород, мощность которой составляет в среднем 0,8 м. В отдельные годы глубина промерзания грунта достигает 129 см. На закарстованных участках, где снежный покров распределен неравномерно, глубина промерзания колеблется от 0,0 до 0,5 м. В это время движение воздуха осуществляется лишь по отдельным пещерным каналам. Наличие промерзшего грунта предположительно определяет прохождение и особенности зимней конденсации.

Анализ геотермических материалов свидетельствует о том, что в Пермском Прикамье "нейтральный" слой с температурой 4,5—5,0 °С залегает на глубине 20—25 м. Тепловое поле формируется при сложном взаимодействии структурно-тектонического, литологического и гидрогеологического факторов. В палеозойских отложениях района Кунгура, где поверхность кристаллического фундамента залегает на глубине 2—4 км, геотермический градиент составляет 1,4—1,6 °С на 100 м [158].

Первые измерения температуры воздуха на поверхности и в пещере произвел в 1733 г. профессор Петербургской академии наук И. Г. Гмелин [447]. В 1848 г. профессор Казанского университета М. Я. Киттары наблюдал в Бриллиантовом гроте сросшиеся ледяные кристаллы, растущие при температуре ниже -7 °С [184]. В 1934 г. карстовая группа Ленгидростройпроекта оборудовала в пещере метеорологические посты для

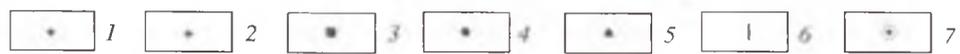
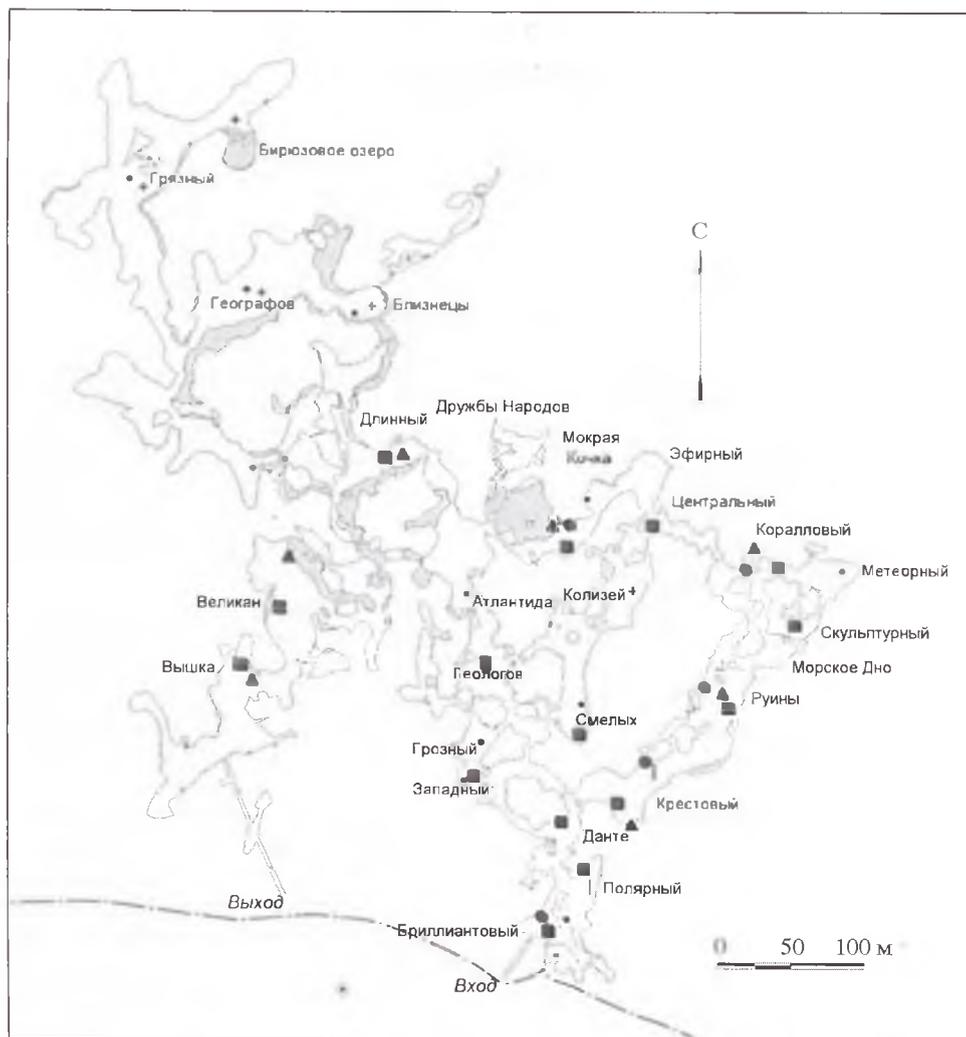


Рис. 12.1. Размещение постов температурных наблюдений в Кунгурской пещере. Разовые замеры: 1 — воздух, 2 — вода; режимные замеры: 3 — воздух, 4 — порода, 5 — вода, 6 — наблюдения по самописцам, 7 — пост на поверхности

регулярных наблюдений, однако эти материалы сохранились частично. В гроте Бриллиантовый температура менялась от  $-3,5^{\circ}$  до  $-2,0^{\circ}$  C, в гроте Титанический — от  $4,8^{\circ}$  до  $5,2^{\circ}$  C, в гроте Колизей — от  $4,5^{\circ}$  до  $4,8^{\circ}$  C. В 1949 г. метеорологические наблюдения в пещере стал проводить Кунгурский стационар на постоянных и временных постах (рис. 12.1). Изучали температуру воздуха на поверхности, горных пород, воды в подземных озерах и воздуха в пещере. На трех постах (гроты Бриллиантовый, Полярный и Крестовый) были установлены самописцы-термографы.

Для определения связей между температурными изменениями на поверхности и под землей в 1960—1991 гг. в дни режимных наблюдений (15 числа каждого месяца) производились замеры температуры воздуха у Старого входа в пещеру. Сведения о них не были систематизированы и сохранились только в журнале Е. П. Дорофеева.

Синхронными замерах было обеспечено всего 40 % всех наблюдений под землей. В большинстве случаев замеры делались только один раз — при заходе в пещеру, при возвращении на поверхность они не производились. В 1985 г. был оборудован пост “Кунгурская пещера”, состоящий из двух метеобудок, установленных у здания стационара. Для наблюдений за температурой и влажностью воздуха были установлены термограф и гигрограф. Эти данные, к сожалению, не сохранились. Имеются также данные о суточных температурах в холодный период 1969, 1970, 1985—1987 гг., которые при проведении специальных наблюдений за льдом обработал Б. Р. Мавлюдов (Институт географии АН СССР, Москва).

## 12.2. ТЕМПЕРАТУРА ГОРНЫХ ПОРОД

Измерения проводились в 1974—1986 гг. один раз в месяц (13—17 числа) с помощью почвенных электротермометров АМ-2М (точность отсчета 0,1 °С). В горизонтальные и вертикальные шпурь на глубину 0,1 и 2,0 м парно были заложены 8 датчиков: в стене грота Бриллиантовый шпурь пройдены в гипсах (№ 343, глубина 0,1 м; № 320, 2 м), в стене грота Руины — в ангидритах (№ 988, 0,1 м; № 386, 2 м), в полу грота Бриллиантовый — в глыбово-глинистых мерзлых отложениях (№ 209, 0,0 м; № 368, 0,1 м; № 287, 1,5 м), в гроте Бриллиантовый — в многолетнем льду (№ 229, 0,1 м; № 403, 2,0 м). Всего выполнено около 1,3 тыс. замеров. Анализ материалов показал, что статистически значимых различий между температурой на поверхности и на глубине 0,1 м нет ( $H$ -критерий меньше 1,96), поэтому эти данные осреднены, а все остальные материалы сведены к 4 кривым (рис. 12.2, 12.3).

*Грот Бриллиантовый.* Годовой ход температуры пород на глубине 0,1 и 2,0 м повторяет ход температуры воздуха на поверхности, причем на глубине 2,0 м она на 1—1,5 °С выше, чем на глубине 0,1 м. Особенно четко это видно в 1971—1981 гг., пока не сказалось влияние сооруженного в 1972 г. выходного тоннеля. Коэффициент корреляции между ними составляет  $0,54 \pm 0,20$ . После 1981 г. синхронность хода температур нарушилась. Таким образом, шпурь, пробуренные в 30 м от основания склона Ледяной горы, не несут существенной информации о температуре ее пород, отражая колебания температуры воздуха на поверхности.

*Грот Руины.* Расположен в пещере на удалении 200 м от основания склона. Годовой ход температур сказывается лишь на глубине 0,1 м, на глубине 2,0 м он почти не ощущается, однако до 1981 г. температура пород была выше температуры воздуха, а с 1981 г. — несколько ниже (сказывается “зарядка” пещеры наружным холодным воздухом).

Таким образом, из-за неудачного расположения электротермометров полученные данные не дают полного представления об изменениях температуры горных пород Ледяной горы.

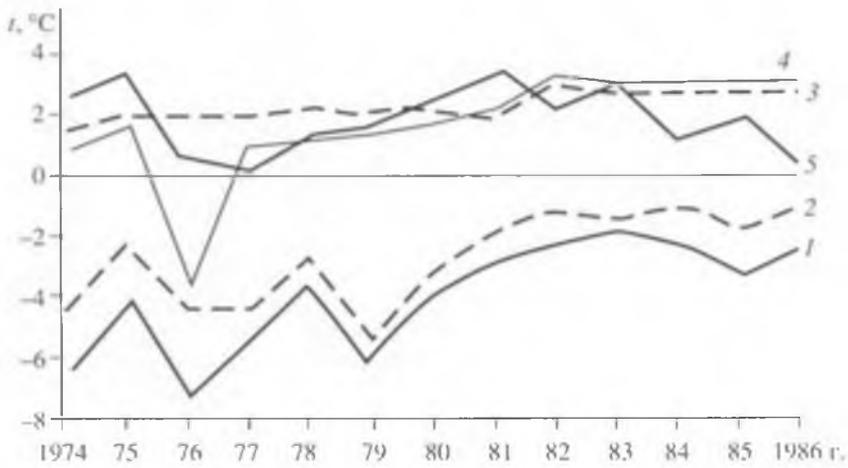


Рис. 12.2. Многолетний ход температуры горных пород Кунгурской пещеры. Грот Бриллиантовый: 1 — на глубине 0,1 м (гипсы, глина со щебенкой); 2 — 2 м (гипсы); грот Руины (ангидриты): 3 — 0,1 м; 4 — 2 м; 5 — температура воздуха на поверхности

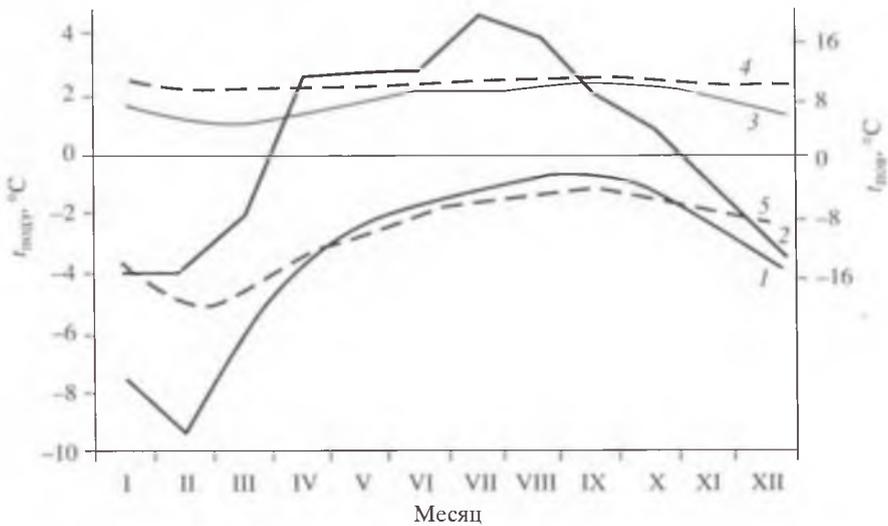


Рис. 12.3. Средняя месячная температура горных пород Кунгурской пещеры ( $t_{\text{подп}}$ ). Грот Бриллиантовый: 1 — на глубине 0,1 м (гипсы, глина со щебенкой, лед), 2 — 2 м (гипсы); грот Руины (ангидриты): 3 — 0,1 м, 4 — 2 м; 5 — температура воздуха на поверхности ( $t_{\text{пов}}$ )

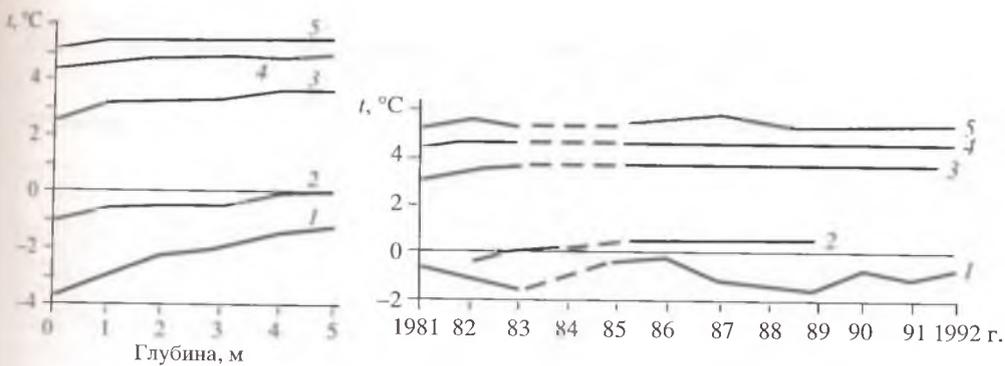


Рис. 12.4. Средняя многолетняя температура в шпурах Кунгурской пещеры на разной глубине.

Гроты: 1 — Бриллиантовый, 2 — Крестовый, 3 — Руины, 4 — Коралловый, 5 — Дружбы Народов

Рис. 12.5. Многолетний ход температуры в шпурах Кунгурской пещеры на глубине 5 м.

Гроты: 1 — Бриллиантовый, 2 — Крестовый, 3 — Руины, 4 — Коралловый, 5 — Дружбы Народов

С 1981 г. параллельно производились замеры ртутными вытяжными термометрами ТЛЧ-Б и КШ 14/23 (цена деления 0,1 °С). Для их установки в стенах гротов Бриллиантовый, Крестовый, Руины, Коралловый, Дружбы Народов пробурили 5-метровые горизонтальные шпуры. Интервал заложения термометров составил 1 м, вытаскивали их с помощью капроновых лесок. Некоторые шпуры были не строго горизонтальными и в их дальней части скапливалась вода, которая в холодный период замерзала. Это искажало отдельные показания, что не всегда фиксировалось. Резервуары термометров были заленивлены ватными тампонами, а отсчет производился с помощью лупы.

Представление о местах установки термометров дает рис. 12.1. Из 3,8 тыс. замеров больше всего приходится на 1987 (35 %) и 1986 (23 %) гг., меньше — 1989 (12,5 %), 1984, 1990 и 1991 гг. (7,5—8,0 %). В остальные годы число замеров было незначительным (0,7—3,2 %). В ходе обработки полученных данных были рассчитаны средние многолетние месячные и годовые значения температуры породы в отдельных гротах, построены графики хода годовых и месячных температур (рис. 12.4—12.6).

Изменения средней многолетней температуры в шпурах свидетельствуют об ее возрастании с глубиной от  $-3,8$  °С (грот Бриллиантовый) до  $5,2$  °С (грот Дружбы Народов) с градиентом внутри скважин от 0,56 до 0,02 °С/м, уменьшающимся с удалением от

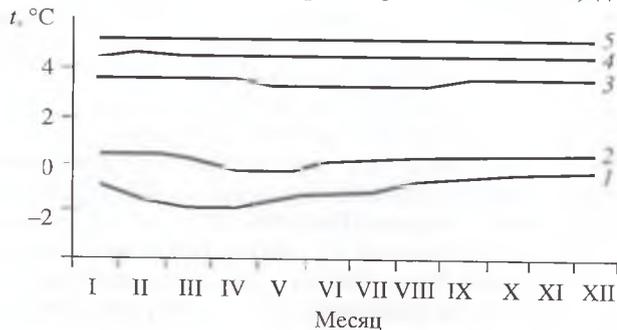


Рис. 12.6. Месячный ход температуры в шпурах Кунгурской пещеры на глубине 5 м. Гроты: 1 — Бриллиантовый, 2 — Крестовый, 3 — Руины, 4 — Коралловый, 5 — Дружбы Народов

Таблица 12.1

**Многолетняя температура породы в шпурах Кунгурской пещеры, °С**

Грот	Расстояние от основания склона, м	Расстояние от устья шпура, м						Градиент, °С/м
		0	1	2	3	4	5	
Бриллиантовый	20	-3,8	-3,0	-2,2	-2,0	-1,5	-1,0	0,56
Крестовый	150	-0,9	-0,5	-0,4	-0,2	0,0	0,1	0,20
Руины	200	2,4	2,9	3,2	3,3	3,5	3,7	0,26
Коралловый	300	4,5	4,6	4,6	4,6	4,7	4,7	0,04
Дружбы Народов	300	5,1	5,1	5,2	5,2	5,2	5,2	0,02

входа в пещеру (табл. 12.1). Температура в шпурах на глубине 0—4 м колеблется в соответствии с изменениями температуры воздуха на поверхности, а на глубине 5 м приближается к температуре нейтрального слоя, которая для Кунгура составляет 5,4 °С [407]. Многолетний ход температуры в шпуре грота Бриллиантовый повторяет ход температуры воздуха на поверхности, а в гротах, расположенных дальше от основания склона Ледяной горы, эта зависимость постепенно затухает. В гротах Бриллиантовом и Крестовом ощущается связь с ходом температур на поверхности с запаздыванием на 1—2 мес (минимум отмечается в марте—апреле и апреле—мае). Внутригодовая вариация температур горных пород максимальна ( $CV = 0,53—1,37$ ) в ближних гротах и минимальна ( $CV = 0,01—0,02$ ) — в дальних.

### 12.3. ТЕМПЕРАТУРА ВОДЫ

Отдельные замеры температуры воды в озерах Кунгурской пещеры выполнялись с середины XIX в., а регулярные измерения были начаты в 1949 г. Однако записи наблюдений содержат лишь номера гротов, идентифицировать которые с имеющимися на то время схемами пещеры удастся не всегда. Систематические измерения температуры воды в Кунгурской пещере начались в 1957 г. и производились ртутными термометрами ТЛЧ-Б и КШ 14/23 с ценой деления шкалы 0,1 °С. Термометры плавали в воде и лишь на время отсчета извлекались с помощью капроновых лесок. Ртутные резервуары были заленивлены ватными тампонами. Наблюдения проводились ежемесячно (15 числа), а в период паводка — еженедельно.

Посты располагались на 11 озерах и в 3 скважинах (см. рис. 12.1). За 62 года (1935—1996 гг.) выполнено 2,3 тыс. замеров, которые распределялись по гротам и десятилетиям неравномерно: 60 % наблюдений выполнено в 3 гротах — Дружбы Народов (38 %), Данте и Коралловый (по 11 %); 24 % — в 4 гротах (Колизей, Геологов, Руины и Вышка, 5—7 %); в других озерах выполнялись единичные замеры. По времени замеры также распределяются неравномерно: наиболее длинные ряды имеются для озер в гротах Дружбы Народов (23 года) и Длинный (18 лет), более короткие — для озер в гротах Руины, Коралловый, Геологов, Вышка (10—14 лет). Больше всего замеров выполнено в 80-е—90-е гг., когда для отдельных гротов непрерывные ряды составляли 8 и 9 лет, однако и в них есть значительные перерывы.

Таблица 12.2

## Средние, минимальные и максимальные температуры воды в озерах Кунгурской пещеры

Грот	Кол-во лет	Средняя температура, °С	CV	Максимум		Минимум		Амплитуда		
				t, °С	дата	t, °С	дата	макс.	мин	средняя
<i>Восточная ветвь</i>										
Крестовый	4	1,1	0,11	2,2	I.1955	0,2	IV.1983	1,3	0,0	0,4
Руины	14	3,3	0,08	3,8	IX.1996	1,9	III.1987	1,6	0,5	0,8
Скульптурный	3	3,3	0,10	3,8	III.1951	1,7	II.1951	1,4	0,4	0,6
Коралловый	11	4,6	0,02	4,9	X.1986	4,3	II.1996	0,5	0,2	0,3
Колизей	4	3,9	0,03	4,4	VI.1950	3,2	II.1950	0,8	0,2	0,3
Мокрая Кочка	6	4,6	0,04	4,9	VIII.1951	3,3	II.1956	1,4	0,0	0,6
Дружбы Народов	20	5,2	0,03	5,5	VI.1950	4,6	II.1978	0,8	0,4	0,6
<i>Западная ветвь</i>										
Вышка	7	2,4	0,17	3,6	XI.1971	1,6	II.1977	1,9	0,2	0,9
Грозный	4	2,6	0,14	4,0	VIII.1955	1,0	II.1956	2,6	0,0	1,2
Геологов	7	3,2	0,13	4,2	IV.1983	1,1	I.1969	2,3	0,4	0,9
Атлантида	4	3,5	0,08	4,6	VIII.1953	2,6	I.1950	1,4	0,2	0,6
Великан	5	4,2	0,11	4,8	VI.1950	1,0	I.1977	3,8	0,0	0,7
Длинный	17	3,7	0,05	4,1	IV.1990	3,1	II.1997	0,7	0,3	0,6
Близнецы	5	4,9	0,02	5,2	I.1970	4,8	VIII.1949	0,2	0,0	0,1

При обработке материалов все фактические данные были сведены в таблицы: разовые замеры, выполненные в случайном месте в случайные сроки, декадные и месячные замеры. После статистической обработки данных составлены итоговые таблицы, характеризующие многолетний ход температуры воды в отдельных озерах и амплитуду температур (табл. 12.2). По этим данным были построены графики многолетнего и месячного хода температур воды в озерах, причем гроты объединили в западную и восточную ветви, тяготеющие к старому и новому входам (рис. 12.7, 12.8).

Средняя многолетняя температура воды в озерах пещеры составила 3,6 °С, минимальная — в озере грота Крестовый (1,0 °С), максимальная — в озере грота Дружбы Народов (5,2 °С), коэффициент вариации среднегодовых температур 0,31; абсолютный минимум отмечен в озере грота Крестовый (0,2 °С, IV.1983 г.)<sup>6</sup>, абсолютный максимум — в озере грота Дружбы Народов (5,5 °С, VI.1950 г.).

Годовые колебания температуры воды невелики и четких тенденций в изменениях не обнаруживают (см. рис. 12.7). Месячные колебания температуры в гротах, расположенных ближе ко входу в пещеру, обнаруживают слабый сезонный ход: минимумы наблюдаются в холодный, максимумы — в теплый сезоны; сроки наступления экстремальных температур для разных озер не совпадают (более четко прослеживаются минимумы, которые в 70 % случаев наступают в январе—феврале).

Температура воды в озерах гротов Кунгурской пещеры возрастает от бровки склона в глубину пещеры от 1 до 5 °С, коэффициенты вариации ее снижаются в этом же направлении от 0,15 до 0,05.

<sup>6</sup> Некоторые озера холодной части пещеры при сильных морозах замерзают.

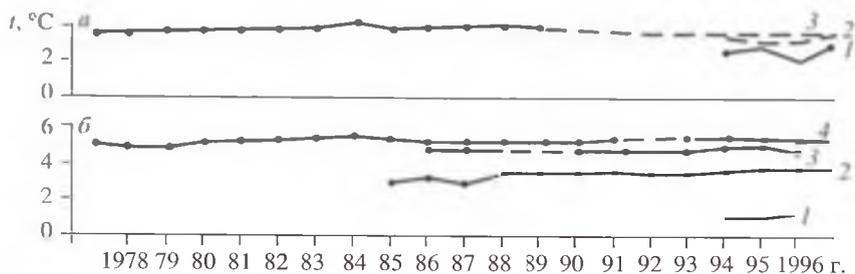


Рис. 12.7. Годовой ход температуры воды в озерах Кунгурской пещеры. *a* — западная ветвь гротов: 1 — Вышка, 2 — Геологов, 3 — Длинный; *b* — восточная ветвь гротов: 1 — Крестовый, 2 — Руины, 3 — Коралловый, 4 — Дружбы Народов

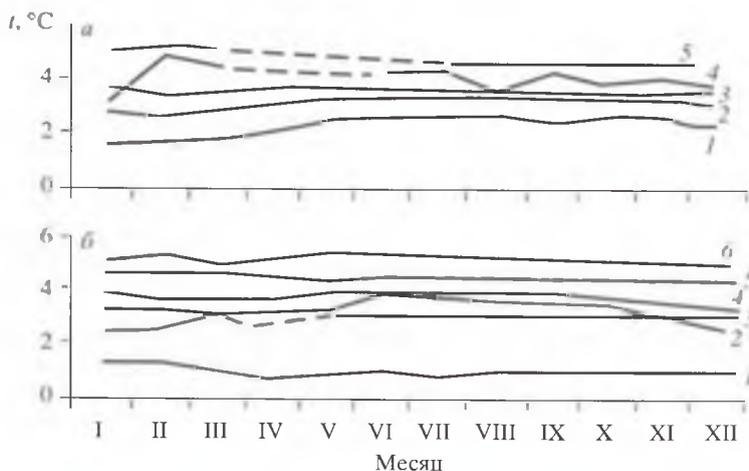


Рис. 12.8. Месячный ход температур воды в озерах Кунгурской пещеры: *a* — западная ветвь гротов: 1 — Вышка, 2 — Геологов, 3 — Длинный, 4 — Великан, 5 — Близнецы; *b* — восточная ветвь гротов: 1 — Крестовый, 2 — Скульптурный, 3 — Руины, 4 — Коралловый, 5 — Колизей, 6 — Дружбы Народов

## 12.4. ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА

Первые стационарные наблюдения начались в ноябре 1934 г. и продолжались до сентября 1935 г. Замеры производили по термометру барометра и психрометру Ассмана. С 1951 г. в пещере начались регулярные замеры. В 1982—1984 гг. в ней было оборудовано 10 метеопостов (см. рис. 12.1), которые представляли собой металлические будки с сетчатой дверью, установленные на высоте 1 м на стойках из уголкового железа. Посты снабдили лабораторными термометрами ТЛ-4 (цена деления 0,1 °С) и ТЛ-7а (растянутая шкала, цена деления 0,2 °С). В гротах Бриллиантовый и Полярный установили недельные термографы. Смена лент производилась один раз в неделю, в дальней части пещеры — один раз в месяц (15 числа). При смене лент производился контрольный отсчет по ртутному термометру. В летний период, когда колебания температуры в пещере были невелики, непрерывная запись сменялась еженедельным отсчетом по контрольным термометрам. В ряде

Среднегодовая многолетняя температура воздуха в Кунгурской пещере, °С Таблица 12.3

Грот	Месяц					
	I	II	III	IV	V	VI
Бриллиантовый						
низ	-9.7	-10.4	-5.7	-2.8	-1.9	-1.1
верх	-5.3	-5.6	-3.9	-2.9	-2.0	-1.0
Великан	2.0	1.7	1.7	1.9	2.4	2.7
Вышка	-2.2	-3.2	-1.6	-0.3	0.3	0.5
Геологов	2.6	2.3	2.8	3.3	3.6	3.8
Данте	-5.3	-6.5	-4.4	-2.5	-1.3	-0.6
Длинный	3.5	3.4	3.4	3.6	3.8	3.9
Дружбы Народов	4.9	4.8	4.8	5.0	5.0	5.1
Коралловый	3.4	3.2	3.3	3.7	4.0	4.0
Крестовый	-1.6	-2.4	-1.7	-0.7	-0.2	0.2
Руины	1.2	0.7	0.8	1.3	1.8	2.2
Скульптурный	2.1	1.8	2.0	2.7	3.2	3.6
Смелых	1.4	0.9	1.1	1.4	1.7	2.0
Центральный	4.1	3.7	4.1	4.2	4.5	4.5
Среднее	0.1	-0.4	0.5	1.3	1.8	2.1
CV	2.11	1.96	1.72	1.56	1.30	1.00

Грот	Месяц						Средняя
	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Бриллиантовый							
низ	-0.5	-0.4	-0.7	-1.2	-2.9	-5.4	-3.7
верх	-0.3	-0.3	-1.5	-0.6	-1.9	-2.6	-2.1
Великан	2.8	3.0	3.0	2.9	2.8	2.4	2.4
Вышка	0.7	0.8	0.9	0.7	-0.3	-0.3	-0.3
Геологов	3.7	4.0	3.8	3.8	3.6	3.2	3.5
Данте	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-1.4	-2.7	-2.0
Длинный	4.1	4.1	4.1	4.1	3.9	3.2	3.8
Дружбы Народов	5.1	5.1	5.1	5.1	5.0	5.0	5.0
Коралловый	4.2	4.3	4.2	4.1	3.9	3.7	3.8
Крестовый	0.6	0.7	0.6	0.4	-0.1	-0.8	-0.3
Руины	2.5	2.7	2.5	2.4	1.9	1.6	1.8
Скульптурный	3.9	3.9	3.9	3.7	3.1	2.7	3.1
Смелых	2.2	2.4	2.4	2.4	2.0	1.9	1.9
Центральный	4.5	4.6	4.5	4.5	4.5	4.4	4.3
Среднее	2.3	2.5	2.2	2.3	1.7	1.2	1.5
CV	0.89	1.98	0.98	0.91	1.52	2.56	1.80

гrotов (0,1 % от их общего количества) в разные сроки выполнялись разовые наблюдения (от 1 до 40 замеров). Всего выполнено 15,5 тыс. замеров. Так как их распределение в разных гротах и в разные годы не совпадает, выбрать репрезентативные объекты для анализа очень трудно.

Данные о среднегодовой многолетней температуре воздуха в отдельных гротах приведены в таблице 12.3. В гротах восточной ветви она увеличивается от входа (-3,7 °С) до грота Дружбы Народов (+5,0 °С), а в западной — от выхода (-0,3 °С) до грота Длинный (+3,8 °С). Коэффициенты ее вариации

Таблица 12.4

## Параметры температур воздуха в гротах Кунгурской пещеры

Грот	Кол-во лет	Средняя температура, °С	CV	Максимальная			
				t, °С	дата		
Западная ветвь							
Вышка	19	-0,3	4,42	4,8	VII.87		
Великан	18	2,4	0,15	3,8	VIII.98		
Геологов	5	3,5	0,16	4,8	IX.77		
Длинный	17	3,8	0,09	4,4	VIII.88		
Смелых	8	1,9	0,60	3,1	VII.52		
Восточная ветвь							
Бриллиантовый	28	-3,7	0,98	0,1	VIII.84		
Данте	22	-2,0	1,06	0,0	VIII.35		
Крестовый	28	-0,3	2,58	1,8	IV.90		
Руины	21	1,8	0,40	3,2	VIII.84		
Скульптурный	29	3,1	0,90	4,4	IX.87		
Коралловый	18	3,8	0,10	5,2	VI.84		
Центральный	7	4,3	0,06	5,1	IX.76		
Дружбы Народов	25	5,0	0,02	5,4	IX.85		
Грот	Минимальная		Амплитуда				
	t, °С	дата	макс.	год	мин.	год	средняя
Западная ветвь							
Вышка	-17,7	XI.76	17,9	1976	1,6	1994	5,1
Великан	0,2	II.77	2,4	1977	0,9	1994	1,5
Геологов	1,9	II.77	2,9	1977	0,8	1953, 1954	1,4
Длинный	1,8	III.56	2,2	1976	0,6	1983	1,1
Смелых	-1,4	IV.56	2,7	1966	0,4	1956	1,5
Восточная ветвь							
Бриллиантовый	-23,9	II.80	23,5	1977	2,6	1956	13,4
Данте	-18,1	II.79	17,6	1979	3,2	1956	7,7
Крестовый	-5,5	II.77	5,6	1976	1,8	1966	3,6
Руины	-0,6	II.77	2,5	1991	1,7	1985	2,0
Скульптурный	0,0	II.77	3,7	1953	1,1	1958	2,3
Коралловый	1,6	II.77	1,8	1974	0,6	1975	1,3
Центральный	2,7	II.56	1,3	1956	0,3	1959	0,9
Дружбы Народов	4,2	III.56	0,9	1966	0,1	1993—1994	0,4

убывают в глубину пещеры (от 4,42 до 0,02). Максимальные температуры, равные температуре нейтрального слоя, отмечены в гроте Дружбы Народов (5,4 °С), а минимальные — в привходовых гротах Бриллиантовый (-23,9 °С) и Вышка (-17,7 °С). Сроки их наступления в разных гротах приходятся на разные месяцы и годы: максимальные — на август (8 гротов) и июль (5 гротов), минимальные — на февраль (10 гротов), а в отдельных гротах — на январь, март и апрель 1956, 1977, 1979 и 1980 гг. (табл. 12.4). Максимальные и минимальные амплитуды колебаний температур убывают от подошвы Ледяной горы (23,7 и 2,6 °С) в ее глубину (0,9 и 0,1 °С).

Средняя многолетняя температура воздуха в гротах Кунгурской пещеры составила (рис. 12.9, а) 1,5 °С, минимальная — в гроте Бриллиантовый

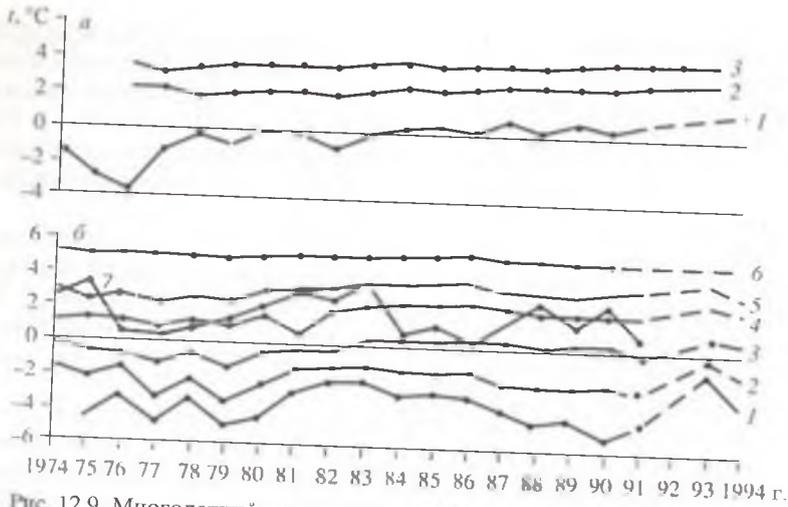


Рис. 12.9. Многолетний ход среднегодовых температур воздуха в гротах Кунгурской пещеры. *a* — западная ветвь гротов: 1 — Вышка, 2 — Великая, 3 — Длинная; *б* — восточная ветвь гротов: 1 — Бриллиантовый, 2 — Данте, 3 — Крестовый, 4 — Руины, 5 — Скульптурный, 6 — Дружбы Народов, 7 — на поверхности

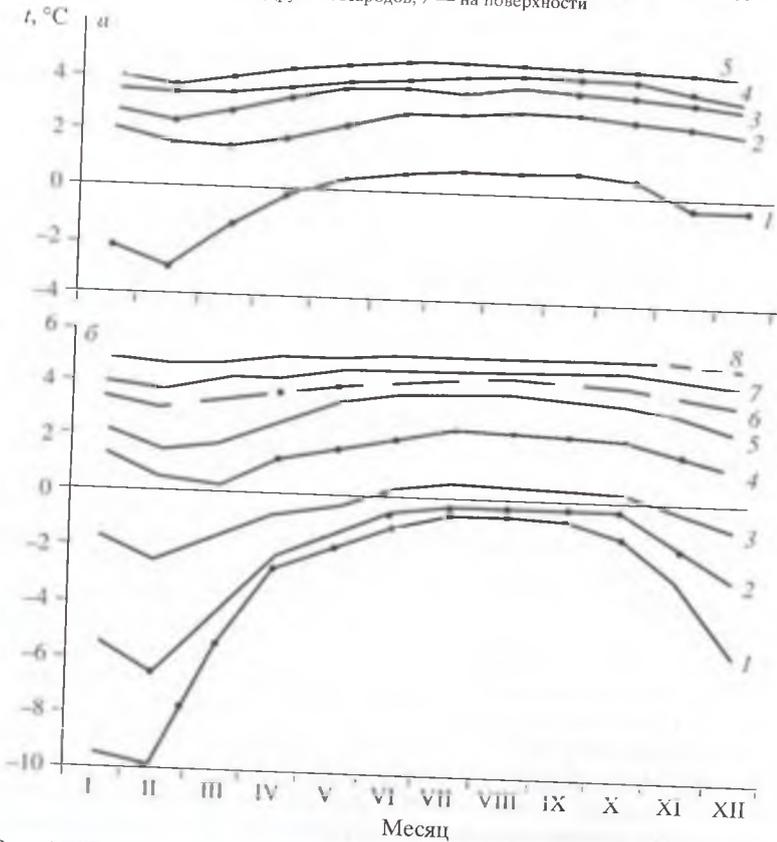


Рис. 12.10. Ход среднемесячных температур воздуха в гротах Кунгурской пещеры. *a* — западная ветвь гротов: 1 — Вышка, 2 — Великая, 3 — Геологов, 4 — Длинный, 5 — Смелых; *б* — восточная ветвь гротов: 1 — Бриллиантовый, 2 — Данте, 3 — Крестовый, 4 — Руины, 5 — Скульптурный, 6 — Коралловый, 7 — Центральный, 8 — Дружбы Народов

( $-3,7^{\circ}\text{C}$ ), максимальная — в гроте Дружбы Народов ( $5,0^{\circ}\text{C}$ ); коэффициент вариации среднегодовых температур — 1,80. Абсолютный минимум отмечен в гроте Бриллиантовый ( $-32,0^{\circ}\text{C}$ , 23.I.69 г.), абсолютный максимум — в гроте Дружбы Народов ( $5,4^{\circ}\text{C}$ , VIII—IX.85 г., VII—VIII.86 г.). Годовой ход средних температур воздуха в ближних к поверхности гротах испытывает четкое влияние изменения температур на поверхности, которое по мере углубления в массив ослабевает.

Многолетний месячный ход температур во всех гротах одинаков — минимумы температуры приходятся на зимние (абсолютный минимум в феврале), а максимумы — на летние месяцы (абсолютный максимум в августе). Как следует из рис. 12.10, эта закономерность более четко прослеживается в гротах восточной ветви, что связано с относительно недавним (1972 г.) ее вскрытием тоннелем.

В самых дальних гротах (Дружбы Народов, Длинный) годовой ход температур почти не отмечается. К сожалению, сведений о температуре воздуха в гротах Заповедной части пещеры почти нет. Отдельные замеры в гротах Географов и Грязном (21.III.55 г.) свидетельствуют о том, что температура в них близка к температуре нейтрального слоя ( $5,4$  и  $5,3^{\circ}\text{C}$ ).

Приведенные выше данные характеризуют температуру воздуха в нижней части гротов Кунгурской пещеры — по замерам на уровне пола или в  $1$ — $1,5$  м над ним (рост наблюдателя). В 1950—1958 гг. замеры на разных уровнях выполнялись в Бриллиантовом и Полярном гротах (12 пар замеров). Между ними обнаружена корреляция ( $r = 0,85 \pm 0,16$ ), а уравнение связи имеет вид:

$$y = 0,6x - 0,2, \quad (12.1)$$

где  $x$  — температура на уровне пола,  $^{\circ}\text{C}$ , а  $y$  — на высоте 2 м,  $^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура на уровне пола составляла  $-2,0^{\circ}\text{C}$ , а на высоте 2 м —  $1,0^{\circ}\text{C}$ .

В 1960 и 1966 гг. аналогичные маршрутные замеры, выполненные обычными метеорологическими термометрами (цена деления  $0,2^{\circ}\text{C}$ ) были проведены по всей пещере. Средний градиент повышения температуры составил  $0,5^{\circ}\text{C}$  на 1 м высоты. В разных гротах его значения различались (от  $0,01^{\circ}$  в гроте Дружбы Народов и Эфирном до  $2,3^{\circ}$  — в гроте Полярном). Коэффициент вариации градиента по пещере составил 1,18.

В 1969—1970 гг. проведены опытные замеры высокочувствительным термографом (цена деления  $0,002^{\circ}\text{C}$ ), а в 1976—1992 гг. — метастатическим термометром (цена деления  $0,01^{\circ}\text{C}$ ). Результаты наблюдений с использованием термографа опубликованы [375]. Термограф был установлен в гроте Геологов, в 350 м от входа в пещеру и в 40 м от основного потока воздуха в гроте. Пульт управления и механизм регистрации размещались в 6 м от датчика, что исключало влияние оператора. Регистрацию температуры производили на фотобумаге, скорость протяжки которой ( $20$  мм/ч) обеспечивала выявление температурных колебаний даже в пределах одного часа. Наблюдения продолжались один год — с июля 1969 г. по июль 1970 г. (рис. 12.11).

В целом ход температур по замерам термографом и стандартным метеотермометром совпадает (коэффициент корреляции  $0,78 \pm 0,06$ ). Однако термограф выявил более тонкую структуру хода температуры, которая определяется рядом причин. В октябре—марте отмечено резкое сезонное понижение температуры воздуха, связанное с “зарядкой” Кунгур-

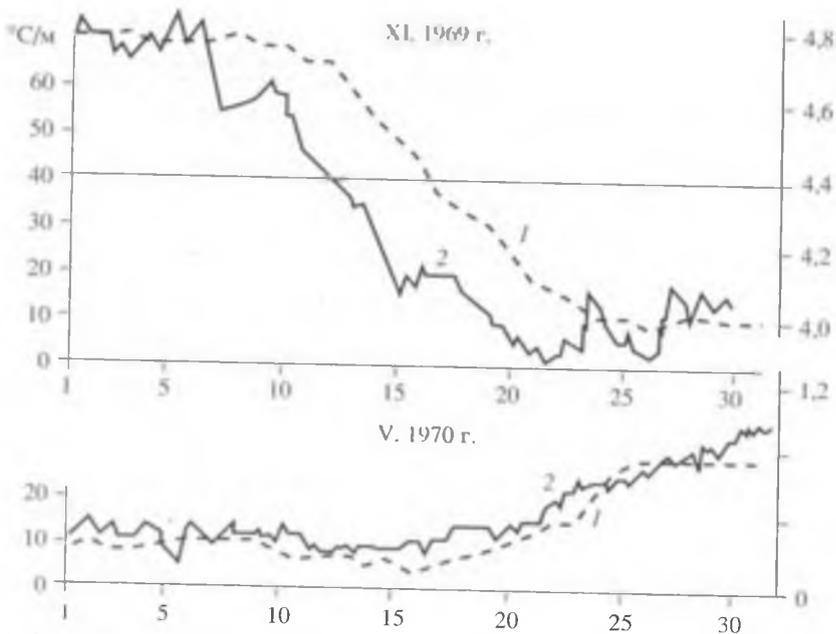


Рис. 12.11. Суточные изменения температуры в гроте Геологов, зарегистрированные ртутным термометром (1) и высокочувствительным термографом (2)

ской пещеры зимним холодом вследствие открытия дверей. Суточные колебания температуры ( $0,05—0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в зимний период происходят с отставанием от внешних температур на 1—5 сут, причем величина отставания зависит от разности температур наружного и пещерного воздуха в осенний и весенний периоды. Часовые колебания температур ( $0,010—0,015\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) отмечены во второй половине суток (отставание 6—8 ч). Летом незначительное изменение температуры ( $0,003—0,005\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) отмечается лишь в отдельные дни [375].

Резкие изменения температуры в пределах суток связаны с посещением Кунгурской пещеры туристами и работой осветительных приборов. При

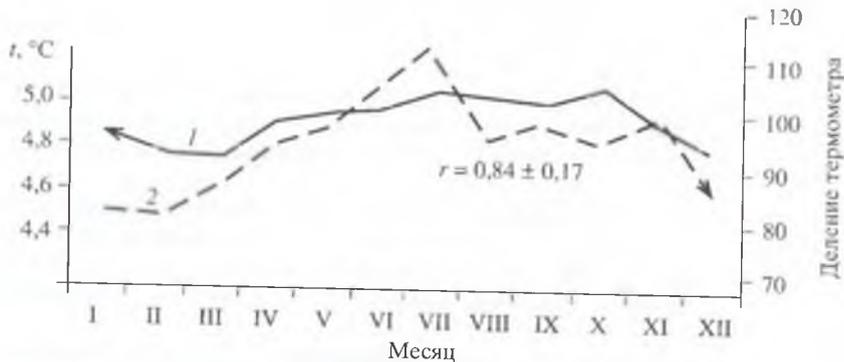


Рис. 12.12. Годовой ход температуры воздуха в гроте Дружбы Народов. Замеры выполнены обычным ртутным термометром (1) и метастатическим термометром (2)

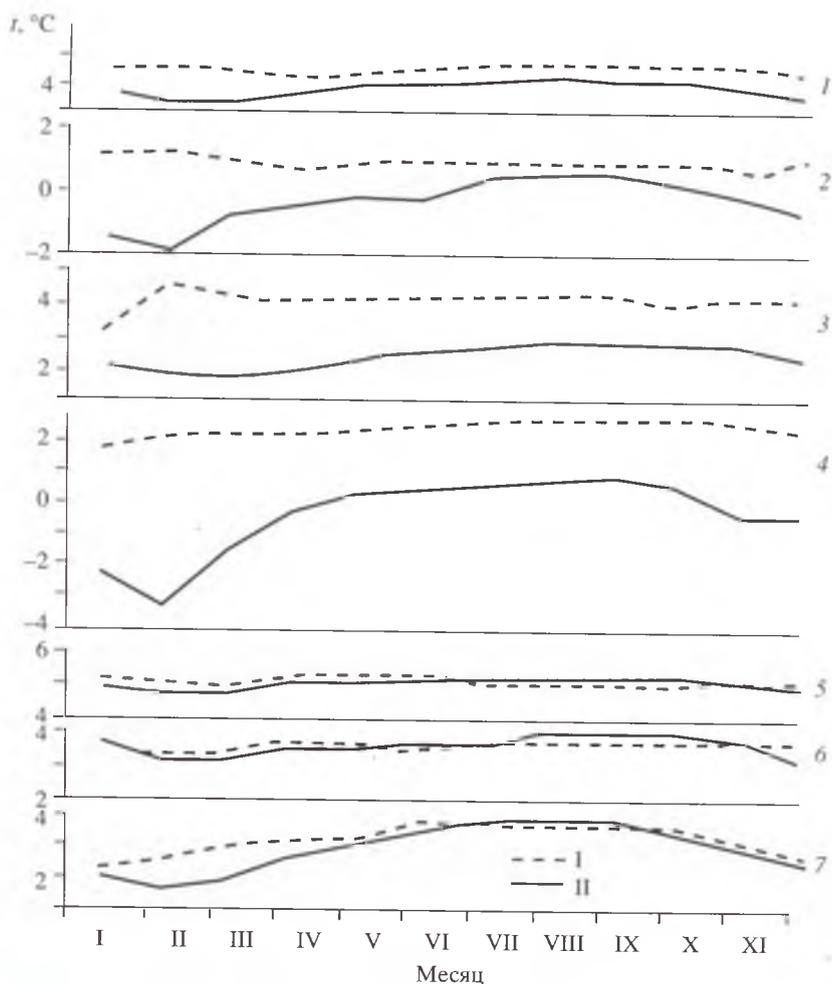


Рис. 12.13. Многолетний среднемесячный ход температуры воды (I) и воздуха (II) в гротах Кунгурской пещеры.

1 — Коралловый, 2 — Крестовый, 3 — Великан, 4 — Вышка, 5 — Дружбы Народов, 6 — Длинный, 7 — Скульптурный

этом происходит скачкообразное повышение температуры на  $0,3\text{--}0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ее медленное понижение, продолжающееся 3—6 ч. Причины мелких возмущений температуры с периодом 1—2 ч, наблюдающиеся на протяжении всего года, не установлены.

Ежемесячные наблюдения по метастатическим термометрам проводились в 1976—1992 г. в гротах Бриллиантовый (134 замера), Данте (160 замеров) и Дружбы Народов (190 замеров). Полный ряд наблюдений получен только в гроте Дружбы Народов (рис. 12.12). Материалы наблюдений обработаны авторами впервые.

К сожалению, замеры по метастатическому термометру не приведены к абсолютной шкале и поэтому можно проводить только качественные сопоставления. Среднегодовой ход температур по нему совпадает с ходом

температур по ртутному термометру, но имеет более тонкую структуру. Между ними имеется корреляция ( $r = 0,84 \pm 0,17$ ).

Распределения полей температур в разрезе отдельных гротов пещеры имеют довольно сложный характер. Качественно они исследованы Е. П. Дорофесвым и В. Н. Андрейчуком [22]. Холодный, более плотный воздух движется от входов по дну пещеры, а над ним формируется пласт более теплого воздуха. Граница раздела имеет сложную конфигурацию, которую часто фиксируют ледяные сталагмиты. В куполах теплый воздух застаивается, образуя “теплые шапки”. В холодной и переходной зонах пещеры летом и зимой положение границы раздела меняется.

В соотношении температур воды ( $t_{\text{вод}}$ ) и воздуха ( $t_{\text{возд}}$ ) в пещере не обнаружено однозначной связи. В озерах гротов, расположенных ближе к бровке (Крестовый, Коралловый, Вышка, Великан), весь год  $t_{\text{возд}} > t_{\text{вод}}$ , а в озерах дальних гротов (Скульптурный, Дружбы Народов, Длинный) в холодный сезон  $t_{\text{вод}} > t_{\text{возд}}$ , а в теплый —  $t_{\text{вод}} \leq t_{\text{возд}}$  (рис. 12.13).

## 12.5. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Одним из важнейших параметров микроклимата, определяющим процессы конденсации, существования живых организмов и образования различных минералов в пещерах, является влажность воздуха. Принято определять абсолютную и относительную влажность [356]. Многолетние данные об абсолютной влажности воздуха на поверхности в районе Кунгурской пещеры отсутствуют, поэтому приходится использовать данные по м/с Кунгур.

**Абсолютная влажность.** Замеры абсолютной влажности в Кунгурской пещере с помощью психрометра начали проводиться с 1934 г. Всего в 1934—1990 гг. было выполнено 4,9 тыс. замеров. В 1999 г. все замеры сухим и смоченным термометрами были пересчитаны с использованием новых психрометрических таблиц [358].

Замеры абсолютной влажности выполнялись нерегулярно. По пятилетиям больше всего замеров выполнено в 1930—1935 (35,6 %), 1981—1985 (29,9 %) и 1951—1955 гг. (19,3 %); в 1936—1944, 1961—1975 гг. замеров не было; на 1946—1950, 1956—1960, 1976—1980 и 1986—1990 гг. приходится 0,3—7,6 %. Больше всего замеров приходится на гроты Бриллиантовый (39,2 %), Данте (13,0 %) и Полярный (11,6 %); на остальные 11 гротов — 0,2—9,0 %; в 8 гротах производились лишь разовые замеры. Почти полный цикл суточных замеров (пропуск 1—20 дней) имеется только для грота Бриллиантовый (1982—1984 гг.). Это не позволяет рассчитать средние месячные и годовые значения абсолютной влажности для разных частей пещеры.

Осредненная по всем метеопостам пещеры средняя многолетняя абсолютная влажность воздуха в пещере составляет 5,6 мб (на поверхности — 7,1 мб). Однако сопоставлять среднегодовые данные нельзя, так как процессы испарения-конденсации в пещере имеют четкий сезонный ход. На рис. 12.14 показаны изменения абсолютной влажности и направления движения воздуха в пещере в холодный и теплый периоды.

В холодный период средняя абсолютная влажность по всем метеопостам составляла 5,1 мб, наибольшая средняя отмечается в гроте Друж-



Рис. 12.14. Абсолютная влажность воздуха в Кунгурской пещере (цифры у кривых — мб) в холодный (а) и теплый (б) периоды; стрелками показаны направления движения воздуха

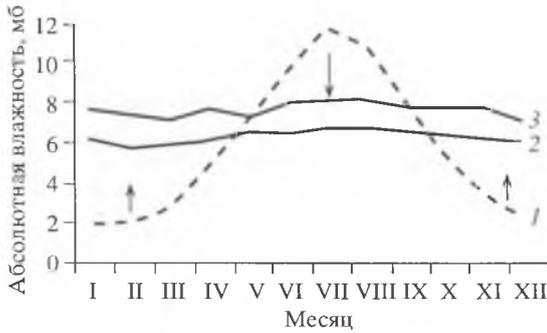


Рис. 12.15. Месячный ход абсолютной влажности воздуха в Кунгурской пещере.

1 — на поверхности, 2 — в ближних гротах; 3 — в дальних гротах; стрелками показано направление переноса влаги

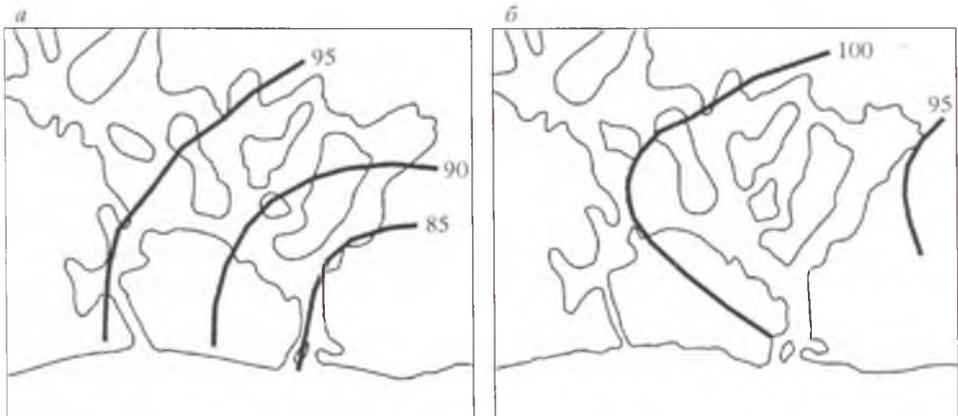


Рис. 12.16. Относительная влажность воздуха (%) в Кунгурской пещере в холодный (а) и теплый (б) периоды

Абсолютная влажность в гротах Кунгурской пещеры, мб

Грот	Кол-во замеров	Холодный период				
		средн.	CV	max	min	ампл.
Бриллиантовый	38	3,7	0,29	5,9	1,9	4,0
Данте	19	4,3	0,24	5,9	2,4	3,5
Дружбы Народов	10	8,3	0,03	8,7	8,0	0,7
Полярный	12	4,8	0,15	5,9	3,6	2,3
Скульптурный	9	6,8	0,06	7,3	6,3	1,1
Смелых	9	7,1	0,05	7,5	6,7	0,8
<b>Среднее</b>	<b>97</b>	<b>5,1</b>	<b>0,19</b>	<b>8,7</b>	<b>1,9</b>	<b>6,8</b>
Грот	Кол-во замеров	Теплый период				
		средн.	CV	max	min	ампл.
Бриллиантовый	36	5,2	0,12	6,1	3,9	2,3
Данте	11	5,7	0,09	6,3	4,8	1,5
Дружбы Народов	9	8,5	0,03	8,7	8,0	0,7
Полярный	12	5,3	0,08	5,9	4,9	0,9
Скульптурный	10	7,2	0,07	7,5	6,3	1,5
Смелых	12	7,3	0,03	7,6	6,8	0,8
<b>Среднее</b>	<b>90</b>	<b>6,1</b>	<b>0,08</b>	<b>8,7</b>	<b>3,9</b>	<b>4,8</b>

бы Народов (8,3 мб), наименьшая — в Бриллиантовом (3,7), на поверхности — 1,5 мб. Таким образом, поток влаги направлен из пещеры, в которой активно проходят процессы испарения с поверхности воды подземных озер и влаги со стенок пещеры. Максимальная влажность составляет 8,7 мб (Дружбы Народов), а минимальная — 1,9 мб (Бриллиантовый); амплитуда ее колебаний максимальна в гроте Бриллиантовый (4,0) и минимальна — в гроте Дружбы Народов (0,7).

В теплый период средняя абсолютная влажность в пещере по всем постам составляет 6,1 мб; наибольшая средняя отмечается в гроте Дружбы Народов (8,5 мб), наименьшая — в Бриллиантовом (5,2 мб), на поверхности — 8 мб (табл. 12.5). Следовательно, поток влаги направлен в пещеру, где проходят процессы конденсации, особенно активные в охлажденных залах. При сублимации водяного пара образуются ледяные кристаллы. Максимальная влажность в районе образования сублимационных кристаллов — 7,6 мб (грот Смелых), а минимальная — 3,9 мб (грот Бриллиантовый). Амплитуда колебаний в летний период достигает 2,3 мб (Бриллиантовый), а минимальная — 0,7 мб (Дружбы Народов); здесь же отмечается минимальный коэффициент вариации влажности (0,03).

Представление о месячном ходе влажности дает рис. 12.15. В холодные месяцы парциальное давление водяных паров в дальних гротах пещеры больше, чем в ближних и на поверхности. Следовательно, поток влаги направлен из пещеры, в которой активно проходят процессы испарения с поверхности воды подземных озер и влаги со стенок. Испаряющаяся влага частично выносится на поверхность Ледяной горы, частично формирует “малый круговорот” зимней конденсации. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Таблица 12.6  
Относительная влажность воздуха в гротах Кунгурской пещеры, %

Грот	Кол-во замеров, %	Холодный период					Теплый период				
		ср.	CV	макс.	мин.	ампл.	ср.	CV	макс.	мин.	ампл.
Атлантида	0,8	97	0,02	100	92	8	97	0,07	98	81	17
Бриллиантовый	28,0	85	0,11	100	72	28	98	0,02	100	89	11
Великан	1,2	98	0,03	98	91	9	99	0,01	100	98	2
Геологов	30,7	92	0,05	98	87	11	96	0,02	99	95	4
Данте	1,8	87	0,11	100	74	26	98	0,04	100	98	2
Дружбы Народов	18,4	95	0,02	100	72	28	99	0,03	99	92	7
Крестовый	1,3	85	0,10	93	73	20	96	0,02	96	92	4
Метеорный	1,2	91	0,03	94	90	3	97	0,03	99	97	2
Полярный	6,9	85	0,10	98	77	21	88	0,13	100	78	22
Руины	4,0	89	0,10	98	78	20	87	0,12	100	70	30
Скульптурный	0,2	92	0,04	98	87	11	95	0,05	96	84	12
Смелых	4,5	91	0,02	100	92	8	98	0,03	100	92	8
Центральный	1,0	92	0,02	96	90	6	97	0,02	98	94	6

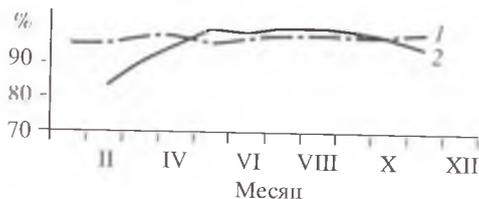
Сведений о распределении абсолютной влажности по разрезу пещеры почти нет. Только в гроте Полярный проводился неполный годовой цикл наблюдений. На протяжении всего года влажность у свода остается более высокой, чем у пола. Средняя годовая влажность у пола составляет 5,1 мб ( $CV = 0,16$ ), а у свода — 5,6 мб ( $CV = 0,05$ ).

**Относительная влажность.** Замеры относительной влажности производились в те же сроки, что и абсолютной. В ее величине наблюдаются некоторые различия, связанные с методикой получения исходных данных (первые замеры получены по волосным гигрометрам; для ряда точек наблюдений имеются замеры по гигрографу, но нет данных по термографам).

Асирационные психрометры при температуре 0—5° и влажности 60—100 % имеют погрешность 4—9 %. Погрешность замеров относительной влажности гигрографами в диапазоне 30—99 % составляет 15 %, а в точке 100 % — 5 %. Обработку лент самописцев выполняли с помощью палетки под микроскопом МБС-2 с точностью отсчета 2 %. Всего выполнено 9,4 тыс. замеров под землей и 0,6 тыс. — на поверхности. Количество замеров в разных гротах различается: Руины — 8, Бриллиантовый — 2,5 тыс. (табл. 12.6). Средняя многолетняя относительная влажность воздуха в Кунгурской пещере составляет 93 % ( $CV = 0,05$ ).

В холодный период средняя относительная влажность составила 89 % ( $CV = 0,05$ ), наибольшая — в гротах Атлантида и Великан (97 и 98 %), наименьшая — в гротах Бриллиантовый, Полярный и Крестовый (85 %). Во многих гротах (Бриллиантовый, Данте, Атлантида, Смелых, Дружбы Народов) отмечена максимальная влажность (100 %), а в гротах Бриллиантовый, Крестовый, Дружбы Народов — минимальная (72—73 %). Амплитуда ее колебаний имеет максимальные значения (25—28 %) в гротах Бриллиантовый, Крестовый и Дружбы Народов (последнее, вероятно, объясняется антропогенным влиянием). Максимальная вариация влажности отмечена в гротах Бриллиантовый и Данте ( $CV = 0,11$ ), минимальная —

Рис. 12.17. Многолетний ход месячной относительной влажности воздуха в Кунгурской пещере.  
Гроты: 1 — Дружбы Народов, Геологов и Атлантида, 2 — Данте, Бриллиантовый



в гротах Атлантида, Великан, Дружбы Народов, Метеорный, Смелых и Центральный ( $CV = 0,02—0,03$ ).

В теплый период средняя относительная влажность в Кунгурской пещере значительно выше (97 %); наибольшая средняя отмечается в гротах Великан и Дружбы Народов (99 %), наименьшая — в Полярном и Руины (87—88 %). Максимальная влажность во многих гротах (Бриллиантовый, Данте, Полярный, Руины, Смелых) достигает 100 %, а минимальная — снижается до 70—78 % (Полярный, Руины). Амплитуда ее колебаний составляет 30 % (Руины), хотя в гротах Данте и Метеорный она всего 2 %; наибольшая вариация относительной влажности отмечена в гротах Полярный и Руины ( $CV = 0,12—0,13$ ), наименьшая — Бриллиантовый, Крестовый и Центральный ( $CV = 0,02$ ).

Ближние и дальние гроты образуют статистически неразличимые совокупности, поэтому данные по ним объединены. На рис. 12.16 показан многолетний ход месячной относительной влажности воздуха в Кунгурской пещере. В холодные месяцы (XI—III) она более низкая (80—95 %), в теплые (IV—X) приближается к 100 % (95—100 %). На рис. 12.17 приведен многолетний ход месячной относительной влажности по отдельным гротам.

Таким образом, имеющиеся в литературе сведения о том, что влажность в Кунгурской пещере повсеместно близка к 100 % ([418] и др.), не подтверждаются. По фактическим замерам она только в 65 % случаев равна 100 %. Обычными методами (особенно при неполной информации) установить закономерности ее формирования невозможно.

## 12.6. ДВИЖЕНИЕ ВОЗДУХА

Кунгурская Ледяная пещера представляет собой эталонную систему “печной тяги” воздуха. Наличие нескольких входов на склоне Ледяной горы и существование недоступных для человека трещинных выходов на ее платообразной поверхности определили движение воздуха в пещере, которое происходит за счет нарушения равенства

$$H\gamma_1 = H\gamma_2, \quad (12.2)$$

где  $H$  — расстояние между входом и выходом по вертикали, м;  $\gamma_1$  — объемный вес наружного воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\gamma_2$  — объемный вес пещерного воздуха,  $\text{кг/м}^3$ . В холодный период  $H\gamma_1 > H\gamma_2$ , и воздух находится в восходящем движении, в теплый —  $H\gamma_1 < H\gamma_2$ , и воздух находится в нисходящем движении. Эта общая закономерность была выявлена еще М. В. Ломоносовым [197].

Наличие периодического движения воздуха в Кунгурской пещере отмечали уже ее первые исследователи. Данные о воздушном режиме пещеры, полученные на основании спорадических наблюдений в теплый период, имеются в работах Е. С. Федорова [402] и В. Я. Альтберга [9, 10], а на про-

тяжении всего года — И. М. Переслегина и Н. И. Бириловой [39], хотя материал И. М. Переслегина обработан не полностью [219]. Замеры, на которых основаны выводы в этих работах, проводились различными приборами, имеющими невысокую точность; места наблюдений выбраны случайно, замеры выполнялись на разной высоте (у пола, с камней и т. д.); площади сечения воздушного потока не определялись, а изменения его микроклиматических характеристик за счет влияния наблюдателя не учитывались.

Данные первых наблюдений в Кунгурской пещере не сохранились, о них имеются только упоминания в разных отчетах и публикациях. Так, Н. И. Бирилова [39] указывала, что в 1919—1928 гг. максимальная тяга в пещере устанавливалась в январе и июне, а в первой половине апреля и в начале октября наступали моменты равновесия. За 10 лет наблюдений весной они смещались на 40 дней (03.IV—13.V), а осенью — на 28 дней (02—30.X), что связывалось с изменениями погодных условий на поверхности. Она отмечала также, что движение воздуха наблюдается в многочисленных отверстиях на склоне Ледяной горы, учесть которые невозможно.

В 1935 г. в периоды максимальной сезонной циркуляции были проведены 2 цикла замеров в Старом ходе: в январе (тяга в пещеру) и июле (тяга из пещеры). Замеры внизу и вверху хода разнятся незначительно (0,1—0,2 м/с,  $CV = 0,23—0,25$ ). Максимальные скорости наблюдаются зимой (средняя — 3,1 м/с, максимальная — 4,5 м/с), минимальные — летом (средняя — 1,3 м/с, минимальная — 0,9 м/с). Амплитуда колебаний скоростей движения воздуха составляет летом 2,9—3,2 м/с, зимой — 0,9—1,0 м/с. При площади Старого хода  $0,8 \text{ м}^2$  через него летом проходит в среднем 90 тыс.  $\text{м}^3$  воздуха, а зимой — 214. Таким образом, зимний воздухообмен в 2,4 раза больше летнего.

После создания Кунгурского стационара начались систематические наблюдения. К этому времени условия формирования воздушных потоков в Кунгурской пещере осложнились, так как в 1937 г. рядом со Старым входом был сооружен входной тоннель. Большое внимание было уделено унификации методики наблюдений, учету направлений и скорости ветра на поверхности и пр. За шесть лет выполнено около 150 замеров направления и скорости движения воздуха в Старом ходе и Телячьем ходке. Статистически достоверные связи между скоростями движения воздуха на поверхности и под землей не установлены.

В августе 1951 г. В. С. Лукин провел десятидневные наблюдения за температурой воздуха у входа в пещеру, температурой и скоростью движения воздуха, вытекающего из Старого входа, однако записи наблюдений не сохранились. Авторы монографии обработали сохранившийся фотоснимок графика и выявили наличие зависимости скорости движения воздушной струи от температуры воздуха на поверхности. Коэффициент корреляции между ними для теплого периода составил  $0,90 \pm 0,01$ , а холодного —  $0,82 \pm 0,10$ .

В ноябре—марте 1953—1954 гг. были проведены замеры скорости движения воздуха, выходящего из щелей на склонах Ледяной горы. Благодаря образованию морозного тумана они отчетливо заметны в холодную погоду. В местах, где выходит теплый воздух, имеются трещины с влажными стенками или малозаметные отверстия среди глыб. Вокруг них образуют-

ся проталины или пустоты под снегом. Температура воздушных струй неодинакова даже в соседних выходах, повышаясь в морозную погоду. Края проталин при этом пропитываются водой. В теплую погоду движение воздуха ослабевает, температура его понижается, и стенки проталин покрываются инеем.

В полосе шириной 0,1 км вдоль обрыва Ледяной горы найдено и опробовано около 20 выходов теплого воздуха. При средней температуре воздуха на поверхности  $-14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $CV = 0,06$ ) средняя температура восходящих струй воздуха составила  $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $CV = 0,33$ ); средняя скорость —  $1,8\text{ м/с}$  ( $CV = 0,56$ ), абсолютная влажность —  $6,5\text{ мм рт. ст.}$  ( $CV = 0,36$ ), относительная влажность —  $70\%$  ( $CV = 0,34$ ). Ближе к водоразделу обнаружены лишь единичные восходящие струи на дне и в бортах карстовых воронок. Так как замер площади “дующих” отверстий не проводился, то определить расход воздушных струй невозможно. Поэтому все эти данные имеют качественный характер. В 1962 г. В. С. Лукин опубликовал основные результаты своих наблюдений [220], которые в дальнейшем были дополнены Е. П. Дорофеевым (рис. 12.18).

Зимняя (восходящая) циркуляция возникает осенью при температуре несколько ниже  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а летняя (нисходящая) — несколько выше  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Весной и осенью, при температуре около  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , происходит частая смена направлений движения воздуха — “пещерное дыхание”. Кратковременная смена направлений воздушных потоков наблюдается также в холодные летние ночи, когда температура на поверхности земли опускается ниже  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в декабре и феврале — во время зимних оттепелей. В районе г. Кунгура переход температуры воздуха через  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , происходит в среднем 24.IV и 3.X [188]. Таким образом, длительность зимней циркуляции воздуха в Кунгурской пещере в среднем составляет 205 дней, а летней — 160.

Внутри гротов струя воздуха движется по кратчайшему пути, обтекая возвышения пола. В верхней части гротов наблюдаются завихрения — встречные воздушные потоки с более высокой температурой. В летний период воздух внутри гротов перемещается в одном направлении (в сторону обрыва Ледяной горы), с более или менее одинаковой скоростью, и лишь в ближних к входу гротах прослеживается встречная струя менее холодного воздуха.

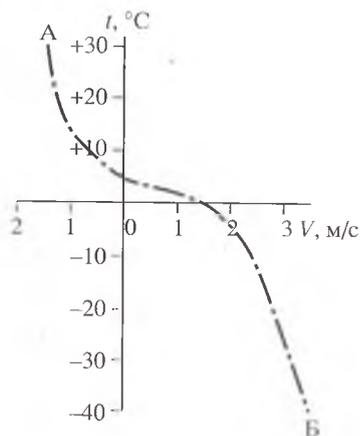
Объединив замеры теплого и холодного сезонов, В. С. Лукин [220] предложил интегральный график (рис. 12.19), который показывает, что зимние скорости циркуляции воздуха в пещере почти в два раза превышают летние. Этот факт можно объяснить тем, что разница между температурой атмосферного воздуха и воздуха, заполняющего вертикальные каналы и трещины Ледяной горы, в зимнее время больше (в январе в среднем около  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), чем в летний период (в июне около  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Высокие скорости движения воздуха (до  $5\text{ м/с}$ ), замеренные В. Я. Альтбергом в летнее время у входа в Кунгурскую пещеру, очевидно, объясняются сужением входного отверстия при намерзании льда.

Внутри пещеры скорость движения воздуха определяли по движению холодного дыма между двумя наблюдателями, один из которых был снабжен секундомером. В различных местах пещеры она составляла десятые и сотые доли м/с. Опыт с дымовыми шашками в зимнее время показал, что расстояние  $0,15\text{ км}$  от входа в пещеру до грота Крестовый поток воздуха



Рис. 12.19. Зависимость направления и скорости воздушного потока у входа в Кунгурскую пещеру от температуры поверхностного воздуха по В. С. Лукину [220].

А — летняя тяга воздуха (из пещеры); Б — зимняя тяга воздуха (внутри пещеры)



проходит за 6 мин (0,4 м/с). В летнее время в гроте Эфирный наблюдалась нисходящая тяга воздуха со скоростью 0,1—0,2 м/с. Так как площадь сечений, где проводились замеры, не измерялась, эти данные имеют качественный характер.

В 1969—1984 гг. разовые определения направления движения воздуха, замеры скорости и расчеты расхода воздуха выполнил Е. П. Дорофеев. Они обработаны нами для разных периодов.

**Холодный период.** При открытой двери скорость воздушного потока во входном тоннеле 4,4 м/с, а в Старом ходе — 3,3 (25.01.1969 г.). Суточный объем воздуха, поступающего в пещеру через тоннель, — 380,2 тыс. м<sup>3</sup>, через Старый ход — 114,0 тыс. м<sup>3</sup>. За сутки в пещеру поступает более 0,5 млн м<sup>3</sup> холодного воздуха. При морозе -31 °С отмечены выходы теплого воздуха из расщелины над входом (температура +4,4 °С, давление — 8,1 мм рт. ст, влажность — 97 %), из трещины в 20 м к западу ( $t = 3$  °С), из расщелины над трансформатором ( $t = 2$  °С, давление — 5,2 мм рт. ст, влажность — 73 %), в воронке с проталиной в логу, в 200 м к западу от выхода ( $t = 0,2$  °С), из трещины в 150 м к западу от выхода ( $t = 1,5—2,5$  °С), над гротом Мокрая Кочка ( $t = 0,0$  °С), над гротом Эфирный ( $t = 2,3$  °С). Кроме того, отмечен ряд выходов у городища и близ березовой рощи (02.III.1983 г.).

Температура воздуха в гроте Бриллиантовый при температуре на поверхности -40 °С и закрытой двери тоннеля составила -25 °С, при открытой -32 °С; температура струй воздуха из трещин на поверхности Ледяной горы — от -2 до +4...0 °С (19.II.1984 г.).

**Теплый период.** Выходной тоннель влияет на микроклимат пещеры — потепление наступает раньше обычного. Тяга через новый тоннель сильнее, чем через старый, почти вдвое (VII.1972 г.). При устойчивой жаркой погоде и экскурсиях с открытием обеих дверей наиболее сильный поток воздуха наблюдается во входном тоннеле. В пещере поток к выходу обнаруживается лишь в сужениях. В низких узких ходах (Колизей — Смелых, Горе Толстяков — Смелых, Геологов — Длинный) внизу возникает противоток воздуха, направленный внутрь пещеры (30.VI.1981 г.).

В 1986—1988 гг. Свердловский горный институт проводил на протяжении года ежемесячно, на одних наблюдательных пунктах замеры скоростей воздушной струи и определение количества входящего (выходящего) воздуха. В результате была получена микроклиматическая характеристика Кунгурской пещеры в условиях антропогенного воздействия.

Условия эксплуатации пещеры предусматривают возможность поддержания четырех режимов проветривания.

**Холодный период.** Общее представление о движении воздуха в пещере в этот период, размещении притечек и утечек в ней дает рис. 12.20. В ве-

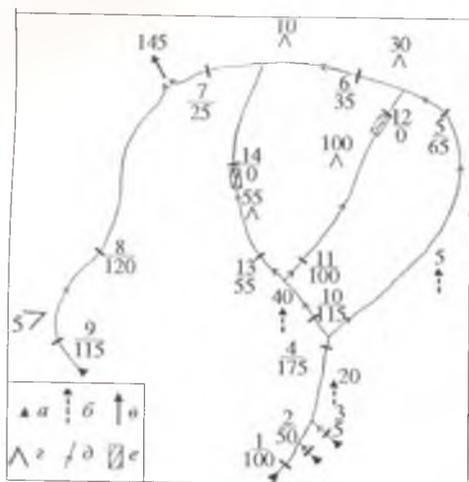


Рис. 12.20. Движение воздуха в Кунгурской пещере в холодный период. (числитель — номер

точки, знаменатель — расход воздуха, м<sup>3</sup>/мин).

Точки замеров: 1 — входная галерея, 2 — Старый вход, 3 — Телячий ходок, 4 — грот Данте, 5 — вход в грот Центральный, 6 — грот Эфирный, 7 — вход в грот Длинный, 8 — вход в грот Вышка, 9 — выходная галерея, 10 — выход из грота Крестовый, 11 — вход в грот Смелых, 12 — выход из грота Колизей, 13 — грот Геологов, 14 — вход в грот Хлебниковых

Воздухоприток: *a* — основная струя, *b* — через трещины бортового отпора на склоне Ледяной горы.

Воздухоотток: *v* — через ходы заповедной части, *z* — через органные трубы; *d* — направления движения воздуха, *e* — участки застойного режима

гротом Данте струя воздуха раздваивается: примерно 60—70 % воздуха идет по большому кольцу к гроту Эфирный (т. 6), остальная часть воздуха уходит к гроту Западный (т. 10). Между точками 4 и 6 по основному маршруту установлены утечки воздуха через старые органные трубы и трещины (в гротах Крестовый, Руины, Метеорный), которые составляют более половины воздуха, поступающего на основной маршрут.

I режим (во входной и выходной штольнях шлюзовые двери закрыты). Это обычное состояние пещеры в вечернее и ночное время. Когда температура атмосферного воздуха ниже 0 °С, холодный воздух поступает внутрь пещеры. При температуре -27...-30 °С через шлюзовые двери просачивается до 40 м<sup>3</sup> воздуха в минуту. Далее по основному маршруту до грота Данте (т. 4) наблюдаются приточки воздуха: через Старый вход (18—20 м<sup>3</sup>/мин), Телячий лаз (0—15 м<sup>3</sup>/мин), трещины в массиве в гроте Полярном (до 140 м<sup>3</sup>/мин). Чем меньше подсос воздуха через шлюзовые двери входной штольни, тем больше приточки.

От грота Центральный (т. 5) воздух движется по основному маршруту к гроту Эфирный (т. 6). Воздух, прошедший из грота Западный (т. 10) через гроты Смелых (т. 11) и Колизей (т. 12), полностью уходит через органные трубы гротов Смелых и Колизей. На основном маршруте между гротами Центральный и Эфирный также отмечены утечки воздуха. Оставшаяся часть воздуха по основному маршруту движется к гроту Романтиков (т. 7). Часть воздуха на этом участке теряется в гроте Дружбы Народов и далее в гроте Хлебникова (т. 14). В последнем в эту струю воздуха вливается воздух, идущий от входа через грот Геологов (т. 13). Воздух, проходящий через грот Геологов, полностью выходит на поверхность через органные трубы, и в гроте Хлебниковых его движение не наблюдается.

Воздух, подошедший к гроту Длинный (т. 7), проходит в заповедную часть и через трещины выходит на поверхность. В конце грота Длинного зафиксировано восточное движение воздуха со стороны выходной штольни. Через шлюзовые двери просачивается внутрь пещеры от 10 до 25 м<sup>3</sup>/мин. Однако в грот Вышка (т. 8) проходит примерно в 3—5 раз больше воздуха, чем его поступает по выходной штольне. Через трещины в массиве пород грот имеет аэродинамическую связь с дневной поверхнос-

тью. Воздух из грота Вышка проходит через грот Великан и попадает в грот Длинный, где сливается со встречным потоком. Поток воздуха в гроте Длинном уходит в заповедную часть пещеры, где через пустоты и трещины в массиве Ледяной горы выходит на дневную поверхность.

При закрытых шлюзовых дверях в обеих штольнях основная часть воздуха попадает в пещеру через трещины и пустоты в гротах Бриллиантовый и Вышка, имеющие аэродинамическую связь с поверхностью. Чем ниже температура на поверхности, тем больше притечки в этих гротах. В марте они снижаются за счет подтаивания и уплотнения снега на склонах Ледяной горы. Суммарное количество воздуха, поступающего в пещеру при закрытых дверях, составляет 180—260 м<sup>3</sup>/мин. По главному и запасному маршрутам количество воздуха, движущегося внутрь пещеры, постепенно уменьшается, так как по пути имеется шесть основных утечек воздуха.

II режим (во входной и выходной штольнях шлюзовые двери открыты). Холодный воздух большими потоками попадает внутрь пещеры. Воздух, поступающий к гроту Данте (т. 4), при поступлении в пещеру в количестве более 200 м<sup>3</sup>/мин полностью расходуется на утечки. В гротах Эфирный и Романтиков (т. 6, 7), Колизей и Хлебниковых (т. 12, 14) движение воздуха не отмечено. При 0—10 °С, когда поступление воздуха через каждую штольню составляет не более 100—200 м<sup>3</sup>/мин, между гротами Эфирный (т. 6) и Романтиков (т. 7) возникают утечки.

При поступлении через выходную штольню до 100 м<sup>3</sup>/мин воздуха в гроте Вышка отмечены притечки. при большом количестве — его утечки. Воздух, прошедший грот Вышка, через грот Великан попадает в грот Длинный и заповедную часть пещеры и через трещины в потолке уходит в атмосферу.

III режим (во входной штольне шлюзовые двери открыты, в выходной — закрыты). Холодный воздух по штольне свободно попадает внутрь пещеры. Его количество зависит от температуры на поверхности: при -10,2 °С — 244 м<sup>3</sup>/мин, а при -27 °С — 347 м<sup>3</sup>/мин; через Старый вход в пещеру поступает 13—20 м<sup>3</sup>/мин. Притечки воздуха в грот Полярный сравнительно небольшие и составляют 20—60 м<sup>3</sup>/мин, через Телячий лаз в грот Полярный — 3—5 м<sup>3</sup>/мин. Мощный поток воздуха, составленный из переносимых притоков, проходит грот Данте (т. 4) и разделяется на два направления: 75—80 % уходит к гроту Центральный (т. 5), остальная часть идет по запасному маршруту и разделяется примерно на равные доли, которые проходят гроты Геологов (т. 13) и Смелых (т. 11). В гротах Хлебниковых (т. 14) и Колизей (т. 12) движение воздуха не наблюдается. Основной поток воздуха проходит гроты Центральный (т. 5), Эфирный (т. 6) и расходится на утечки через их органические трубы. В гроте Длинном (т. 7) оставшаяся часть соединяется с потоком воздуха, идущего от выходной штольни, и расходится на утечки в заповедной части пещеры. В гроте Вышка (т. 8) 20 % воздуха просачивается через закрытые шлюзовые двери выходной штольни, а 80 % составляют притечки. Общее количество воздуха, поступающего в пещеру, составляет до 550 м<sup>3</sup>/мин. Весь воздух уходит на поверхность через утечки.

IV режим (во входной штольне шлюзовые двери закрыты, в выходной — открыты). Значительная часть воздуха поступает по выходной штольне, проходит грот Вышка (т. 8) и в гроте Длинном форми-

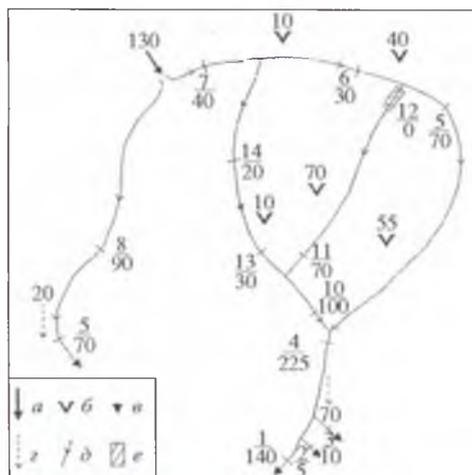


Рис. 12.21. Движение воздуха в Кунгурской пещере в теплый период. (числитель — номер точки, знаменатель — расход воздуха, м<sup>3</sup>/мин)

Точки замеров: 1 — входная галерея, 2 — Старый вход, 3 — Телячий ходок, 4 — грот Данте, 5 — вход в грот Центральный, 6 — грот Эфирный, 7 — вход в грот Длинный, 8 — вход в грот Вышка, 9 — выходная галерея, 10 — выход из грота Крестовый, 11 — вход в грот Смелых, 12 — выход из грота Колизей, 13 — грот Геологов, 14 — вход в грот Хлебниковых.

Воздухоприток: *a* — через ходы заповедной части, *b* — через органичные трубы.

Воздухоотток: *в* — основная струя, *г* — через трещины бортового отпора на склоне Ледяной Горы;

*д* — направления движения воздуха, *е* — участки застойного режима

рует утечку в заповедную часть пещеры (т. 8, 7). Небольшое количество воздуха, проникшее в пещеру через входную штольню, Старый ход и Телячий лаз, формирует

утечки по главному и запасному маршрутам.

**Теплый период.** В теплый период в пещере устанавливается режим проветривания, противоположный холодному. Более холодный воздух, заполняющий пещеру, устремляется в сторону входной и выходной штолен и по ним, а также через трещины в гротах Бриллиантовый и Вышка уходит в атмосферу. Образующееся разрежение восстанавливается за счет подсоса воздуха через трещины и органичные трубы. Там, где в зимний период были притечки, в летний период происходят утечки воздуха. Утечки зимнего периода в летнее время, напротив, становятся источником поступления в пещеру свежего воздуха. Общая картина движения воздуха в теплый период показана на рис. 12.21.

**I режим** (во входной и выходной штольнях шлюзовые двери закрыты). Притечки между гротами Центральный — Эфирный (т. 5, 6) с количеством воздуха до 100 м<sup>3</sup>/мин, попадая в пещеру через органичные трубы и трещины, устремляются по главному маршруту к гроту Данте (т. 4). На поверхность через трещины грота Бриллиантовый выходит 50 % воздуха, а еще 50 % — через Старый вход и входную штольню. Притечки между гротами Вышка — Длинный (т. 7, 8) составляют до 50 м<sup>3</sup>/мин. Воздух движется к выходной штольне, до 80 % его уходит на поверхность через трещины в своде. На участках между гротами Эфирный — Романтиков, Геологов — Хлебниковых, Колизей — Смелых движение воздуха не наблюдается.

**II режим** (во входной и выходной штольнях шлюзовые двери открыты). Притечки в объеме до 72 м<sup>3</sup>/мин попадают в грот Длинный и разделяются на два потока. Большой поток (43 м<sup>3</sup>/мин) движется к гроту Романтиков (т. 7), а затем разделяется на два потока: один движется по основному маршруту к гроту Эфирный (т. 6), второй поворачивает на запасной маршрут к гроту Хлебниковых (т. 14). Оба потока пополняются притечками (в гротах Геологов, Центральный) и движутся к гроту Данте (т. 4). Отсюда основная его часть (224 м<sup>3</sup>/мин) выходит на поверхность через входную штольню, 41 м<sup>3</sup>/мин просачивается через трещины грота Бриллиантовый, а остальной воздух уходит на поверхность через Старый ход и Телячий лаз. Второй поток воздуха (29 м<sup>3</sup>/мин) направляется к гроту Вышка (т. 8) и вме-

сте с притечками в его сводах через выходную штольню выходит на поверхность.

III режим (во входной штольне шлюзовые двери открыты, в выходной — закрыты). Поступление воздуха в пещерные полости происходит везде, где имеется аэродинамическая связь гротов с поверхностью. Притечки в районе грота Длинный (112 м<sup>3</sup>/мин) разделяются на два потока: до 80 % воздуха уходят по главному маршруту в сторону грота Романтиков (т. 7), остальная часть движется к гроту Вышка (т. 8) и к выходной штольне. В гроте Великан часть воздуха уходит в атмосферу через трещины, а остаток этого потока выходит на поверхность через выходную штольню.

Основной поток воздуха в гроте Хлебникова соединяется с притечками со сводов и разделяется на два потока. До 65 % воздуха движется по главному маршруту к гроту Эфирный (т. 6), здесь в него поступают притечки через органную трубу, и общий поток направляется к гроту Центральный (т. 5). В гротах Метеорный, Руины к основному потоку воздуха добавляются притечки из трещин, и воздух движется к гроту Данте (т. 4). При открытых шлюзовых дверях во входной штольне поток значителен и достигает 240 м<sup>3</sup>/мин. В гроте Данте он объединяется с потоком воздуха из запасного маршрута, который формируют притечки в гротах Коллизей и Смелых (т. 11, 12), в гроте Геологов (т. 13), а также с потоком воздуха, отделившимся от основного потока в гроте Хлебниковых (т. 14). Суммарный расход потока достигает 420 м<sup>3</sup>/мин. Входная штольня с открытыми шлюзовыми дверями пропускает в атмосферу 285 м<sup>3</sup>/мин, остальной воздух выходит на поверхность через трещины грота Бриллиантовый.

IV режим (во входной штольне шлюзовые двери закрыты, в выходной — открыты). Притечки на запасных маршрутах не зафиксированы. Притечки из трещин над гротом Данте выходят в атмосферу через неплотности шлюзовых дверей входной штольни, Старый ход, Телячий лаз и грот Полярный. Воздух, поступающий из трещин в сводах гротов Крестовый и Метеорный, движется по главному маршруту к гротам Эфирный и Романтиков (т. 7), затем он соединяется с притечками из дальней части пещеры и общим потоком в количестве 132 м<sup>3</sup>/мин следует к гроту Вышка (т. 8), где пополняется притечками из трещин в сводах. Отсюда воздух по выходной штольне выходит в атмосферу.

Рассмотренные режимы проветривания Кунгурской пещеры характерны для контрастных времен года и базируются на исследованиях, проведенных в зимнее время при температуре на дневной поверхности ниже -20 °С, а в летнее время выше +20 °С. При температурах атмосферного воздуха в пределах от -20 °С до +20 °С изменение вентиляции пещеры при всех режимах происходит в сторону уменьшения или увеличения количества воздуха, поступающего в пещеру или выходящего из нее. Критической температурой, при которой прекращается движение воздуха в пещерных полостях, следует считать температуру +5 °С (при более высокой температуре воздух движется ко входной и выходной штольням, при более низкой по штольням поступает внутрь пещеры).

Проведенные исследования позволяют составить графики изменения количества воздуха, поступающего или выходящего по штольням, в зависимости от температуры атмосферного воздуха (рис. 12.22).

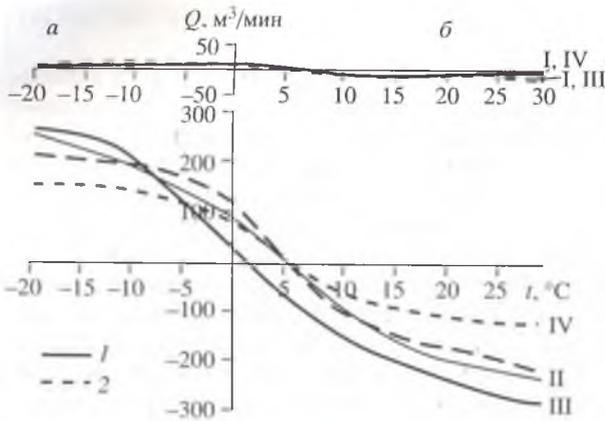


Рис. 12.22. Особенности проветривания Кунгурской пещеры. I—IV — режимы проветривания; направление движения воздуха: а — из пещеры (холодный период), б — в пещеру (теплый период); движение воздуха: 1 — через входную штольню, 2 — через выходную штольню

При I режиме проветривания зимой в пещеру через обе штольни поступает 15—30 м³/мин воздуха, причем через выходную штольню на 5—10 м³/мин больше, чем через входную. По мере по-

вышения температуры количество поступающего воздуха снижается, а при температуре 4—5 °С прекращается. При более высоких температурах происходит опрокидывание струи, и воздух начинает двигаться в обратном направлении — из пещеры. По графику можно определить, какое количество воздуха проходит по штольням в любое время года в зависимости от окружающей температуры.

Меньше всего воздуха (до 20 м³/мин) проходит через штольни при закрытых шлюзовых дверях обеих штолен (I режим), открытой входной и закрытой выходной дверях (III режим, выходная штольня), закрытой входной и открытой выходной дверях (IV режим, входная штольня). При этом графики расхода воздушных потоков во входной и выходной штольнях почти совпадают (см. рис. 12.22).

Больше всего воздуха поступает в пещеру при открытых дверях обеих штолен (II режим, до 300 м³/мин в холодный и 200 м³/мин в теплый периоды), открытой двери входной и закрытой — выходной (III режим, входная штольня, до 220 м³/мин в холодный и до 300 м³/мин в теплый периоды) и при закрытой входной и открытой выходной (IV режим, выходная штольня, до 120 м³/мин во входной и выходной штольнях) штольнях. Графики расхода воздушных потоков во входной и выходной штольнях довольно сильно расходятся.

Проветривание пещеры через входную штольню в холодный период необходимо осуществлять при температуре ниже +1,5...+2,0 °С. Опрокидывание воздушной струи происходит при температуре около +5 °С. В это время поступление воздуха в пещеру прекращается, а с повышением температуры происходит смена зимнего направления движения воздуха в пещере на летнее. Следовательно, закрытие шлюзовых дверей во входной штольне снижает количество поступающего или выходящего из пещеры воздуха.

Проведенные исследования вентиляционного режима Кунгурской пещеры позволили установить, что режим проветривания пещеры можно изменить путем открытия и закрытия шлюзовых дверей во входной и выходной штольнях. При закрытых шлюзовых дверях в обеих штольнях сокращается поступление воздуха по штольням, однако увеличиваются приточки и утечки воздуха через трещины и органичные трубы. Направление движения воздуха внутри пещерных полостей и его количество зависят от разности температур на дневной поверхности и внутри пещеры.

Закономерным является перемещение воздуха в сторону более высокой температуры: в зимнее время — с поверхности в пещеру, в летнее время — из пещеры на дневную поверхность. Количество воздуха, поступающего в пещеру или выходящего из нее, зависит от разности температур на поверхности и внутри пещеры, наличия притечек и утечек воздуха. Опрокидывание воздушной струи при всех режимах ее проветривания происходит при выравнивании температур на поверхности и внутри пещеры и находится в пределах  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этой температуре в пещерных полостях устанавливается нейтральное проветривание, при котором перемещение воздуха в каком-либо направлении отсутствует.

## 12.7. АЭРОЗОЛИ В ВОЗДУХЕ

Аэрозоль — дисперсная система, состоящая из газообразной дисперсной среды (газ, воздух) и твердой или жидкой дисперсной фаз (твердых или жидких частичек). Сами частички называют аэрозольными или просто аэрозолями. Аэрозольные частицы образуются путем дробления крупных тел (диспергация) или объединения отдельных молекул (конденсация), часто при одновременном протекании этих процессов. Источниками аэрозольных частиц являются естественные (извержения вулканов, лесные пожары, пыльные бури, волнение моря, фотохимические реакции, поступление космической пыли и др.) и антропогенные (в основном сжигание разного топлива) процессы. Над застроенными территориями обычны антропогенные аэрозоли (туман, смог). В их составе преобладают сернистый газ, сажа, диоксид свинца, оксиды азота.

Размеры аэрозольных частиц меняются в широком диапазоне — от нескольких ангстрем до долей миллиметра, а количество молекул в частице — от 1 до  $10^{18}$ . В массе аэрозолей обособляются две генерации частиц: мелкие частицы ( $0,1\text{—}1\text{ мкм}$ ) образуются в основном в результате химических процессов и обладают кислотными свойствами; крупные ( $1\text{—}100\text{ мкм}$ ) — при механическом разрушении почвы или горных пород и кислотными свойствами не обладают [21]. Аэрозоли пещер изучены слабо. Они могут быть автохтонными и аллохтонными.

*Автохтонные аэрозоли* пещер образуются при падении камней, поступлении пылеватого материала из рыхлых перекрывающих отложений; разбрызгивании воды, падении в озера обломков пород; ветровом или звуковом поднятии пылеватых частиц; эманации с поверхности и из недр различных газов; конденсировании влаги из воздуха. Автохтонные аэрозоли антропогенного происхождения образуются при горении факелов, ацетиленовых ламп, сухого спирта, запылении воздуха за счет механических действий и т. д. При горении выделяются частицы углерода (сажа, сложные органические молекулы), сернистого газа, ацетилена, диоксида свинца, оксида азота и др., при механических воздействиях пещерный воздух загрязняется пылеватыми и глинистыми частицами. Образование аэрозольных частиц в пещерах происходит непрерывно, но локализованно и очень неравномерно по интенсивности.

*Аллохтонные аэрозоли* попадают в пещеру с потоками наружного воздуха. Их характер и количество зависят от природных и антропогенных процессов в данной местности. В воздухе пещер обычно преобладают ал-

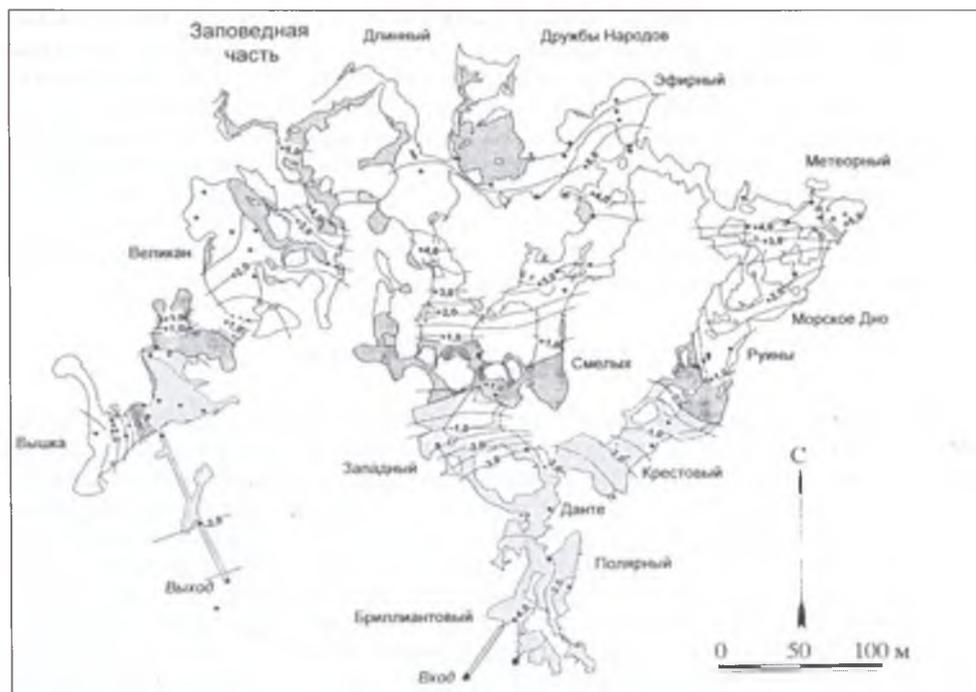


Рис. 12.23. Наблюдения за аэрозолями в воздухе Кунгурской пещеры.

1 — коренные стены; 2 — озера; 3 — изотермы, °С; 4 — точки замеров; 5 — границы микроклиматических зон: 6 — холодной, 7 — переходной, 8 — теплой

лохтонные частицы антропогенного происхождения. По абсолютной величине содержание частиц колеблется в пределах 6 порядков (от единиц до сотен тысяч в литре воздуха).

Представления об аэрозольных характеристиках пещерной атмосферы базируются в основном на теоретических построениях и расчетах. Редкие экспериментальные работы обычно дают возможность судить об аэрозолях лишь по другим параметрам (изменение оптических свойств подземной атмосферы, содержание аэроионов, минерализация конденсационной влаги и др.).

В 90-е гг. XX в. сотрудники Института минералогии и петрографии СО РАН и Кунгурского стационара провели экспериментальные исследования аэрозольных частиц непосредственно в Кунгурской пещере [337—339, 443]. Отбор частиц для дальнейшего изучения под электронным микроскопом проводился на специальные электронномикроскопические подложки. Концентрацию частиц разных размеров определяли при помощи фотоэлектрического счетчика АЗ-6 (7 диапазонов) и приставки АЧ-32 (до 65 диапазонов).

При изучении распределений аэрозолей в Кунгурской пещере была получена довольно сложная картина (рис. 12.23). От грота Колизей к гроту Дружбы Народов постепенно нарастают температура (от +3,5 до +5,4 °С) и

относительная влажность воздуха (92—99 %). С удалением от склона Ледяной горы происходит увеличение содержания частиц крупных фракций (более 2—3 мкм), что трудно объяснить их поступлением с поверхности<sup>7</sup>. Возможно, это связано с процессами конденсации аэрозольных частиц, которые после адсорбции воды переходят из диапазона 1—2 мкм в диапазон 2,5—3 мкм.

В теплый период в пещеру через органичные трубы, каналы, трещины и микротрещины поступает более чистый воздух с поверхности Ледяной горы. С использованием аэрозольной аппаратуры и генераторов аэрозолей были проведены эксперименты по определению фильтрующих характеристик некоторых участков Ледяной горы. В октябре 1990 г. осуществлен эксперимент над Полярным гротом. Измерения проводили в трещине бортового отпора, расположенной на 40 м выше входного тоннеля. Спектры распределения частиц по размерам для атмосферного аэрозоля и воздуха в глубине щели (в 1,5 м от поверхности) (рис. 12.24) подобны, однако абсолютное содержание аэрозоля в щели меньше атмосферного в 5 раз. Анализ экспериментальных данных показал, что в щелях с такими параметрами на глубине 1,5 м атмосферный аэрозоль очищается на 80 %.

Для определения общей фильтрующей характеристики пород Ледяной горы в октябре 1990 г. был проведен модельный эксперимент. В гроте Полярный под исследуемой щелью был сожжен резиновый шланг, который при горении образует аэрозоль, по фрактальным свойствам близкий к аэрозолю Кунгурской пещеры, поступающему в нее при сжигании угля в котельных. Концентрация аэрозоля в гротах Полярный, Данте, Бриллиантовый и у Старого входа возросла до  $10^4$  част/см<sup>3</sup>, однако концентрация и дисперсный состав аэрозоля в щели не изменились. Аналогичный эксперимент в другой щели в летнее время подтвердил эти результаты, что свидетельствует о хороших фильтрационных свойствах 30-метрового слоя породы над пещерой (рис. 12.25).

В холодный период главным источником аэрозолей является загрязненный наружный воздух. Среди аэрозолей преобладают частички сажи (выбросы котельных) разного размера (преобладает диапазон 0,3—1,0 мкм). С потоками холодного воздуха они двигаются в глубь пещеры, загрязняя подземный воздух. Под землей уже с первых метров начинается их осаждение. По мере движения воздуха через 40-метровый входной тоннель концентрация крупных частиц (1 мкм и более) резко снижается за счет их гравитационного “выпадения” из ламинарного потока и оседания на поверхности стен и сводов. В пещере с извилистыми проходами роль оседания существенно выше. Выпадению частиц из воздуха способствует снижение скорости потоков, прогревание воздуха, его насыщение водяными парами.

Один из возможных механизмов появления частиц диаметром 2—3 мкм в дальней части пещеры — отрыв мелких частиц породы от потолка и стен, особенно с отрицательным уклоном. Верхняя оценка их количества, полученная с помощью вакуумного отборника, показывает, что количест-

<sup>7</sup> Так как скорость воздушных потоков в галереях и гротах Кунгурской пещеры по данным прямых замеров в этот период не превышала 0,1 м/с [114], а скорость седиментации частиц диаметром 2 мкм — 1 ч (рис. 12.25), вероятность привноса частиц таких размеров от входной штольни на расстояние более 300 м мала.

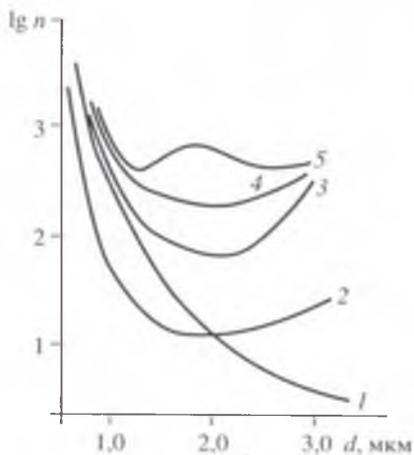


Рис. 12.24. Распределение аэрозольных частиц по диаметру:  
 1 — во внешней атмосфере; в гротах: 2 — Колизей, 3 — Центральный, 4 — Эфирный, 5 — Дружбы Народов

Рис. 12.25. Дифференциальное распределение аэрозольных частиц в атмосферном воздухе (1) и внутри щели (2)

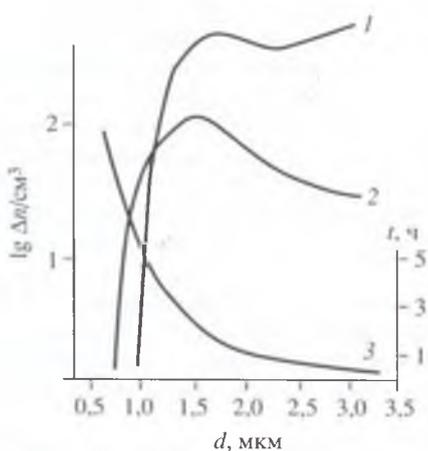
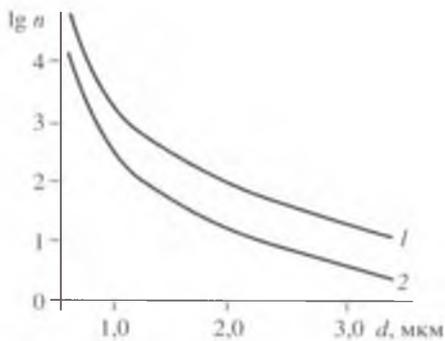


Рис. 12.26. Количество частиц, появившихся в воздухе после вибрационного возбуждения.  
 1 — блок, под которым находился счетчик; 2 — соседние скальные блоки; 3 — время, за которое оседает аэрозоль данного диаметра с высоты 1 м (в спокойной атмосфере)

во естественных пещерных аэрозолей размером более 1—2 мкм составляет  $10^{-1}$ — $10^{-2}$  част/см<sup>3</sup> воздуха. Однако она завышена, так как прибором одновременно отбираются и аэрозоли, привнесенные извне.

Для более точной оценки использованы седиментационные ловушки со сверхчистыми кремниевыми фильтрами и искусственная вибрация. Фотоэлектрический счетчик устанавливался под ангидритовым блоком в гроте Длинный. Микросейсмические колебания вызывались ударами металлической сваи (частота 1 Гц) по краю блока, под которым находился счетчик, и по соседним блокам, что приводило к появлению в воздухе значительного числа частиц размером более 1 мкм при отсутствии более мелких частиц (рис. 12.26). Концентрация частиц данного диапазона на несколько порядков превышает фоновую. Судя по электронномикроскопическим снимкам, частицы “потолочного” аэрозоля имеют резкие края и однородную плотность. Видимо, “крошение” мелких частиц происходит при изменениях относительной влажности, что приводит к капиллярному растворению и растрескиванию породы.

При скорости оседания таких частиц 0,05 см/с и плотности 2 г/см<sup>3</sup> толщина слоя седиментации составляет около 2 А/год, или всего 0,2 мкм за 1000 лет [339]. Их доля среди пещерных отложений ничтожна даже при резком увеличении потока микрочастиц (например, при землетрясении, обрушении сводов и т. д.).

Значительный интерес представляет распределение аэрозолей по высоте. Его детальные исследования были проведены в гроте Вышка на глыбо-щебнистой осыпи высотой 18 м (рис. 12.27).

В холодный период охлажденный воздух поступает в грот через выходной тоннель и движется в глубь пещеры. В марте 1989 г. температура воздуха составляла  $-2,0$  °С. По мере поднятия вверх по осыпи она повышалась, достигая на вершине осыпи  $2,5$  °С (градиент  $0,3$  °С/м). Над осыпью в пределах купольного свода возникла своеобразная “теплая шапка”, которая по концентрации аэрозолей (в основном частичек сажи) является “чистой шапкой” — количество аэрозольных частиц в ней составляло 3—5 на 1 см<sup>3</sup>, что в 3—30 раз меньше, чем в других частях грота. Это явление типично для холодной и переходной частей пещеры.

В условиях интенсивного воздухообмена время от времени возможны прорывы холодного воздуха сквозь инверсионный слой и поступление аэрозолей в нижнюю часть “теплой шапки”. С этим связана пульсация концентраций в точке 2 (до 20 %). Однако значительный градиент температуры обеспечивает локализацию таких прорывов, и на высоте 10 м флуктуация концентраций составляет всего 7 %.

Изменение концентрации и распределение частиц по размерам в точках 3—5 обусловлены другими факторами. Основная особенность распределения спектров аэрозолей — постепенное увеличение концентрации частиц больших размеров. Для т. 3 такое увеличение начинается при диаметре 3 мкм, т. 4 — 1,5 мкм, т. 5 — 0,8 мкм. Суммарная концентрация частиц диаметром 0,3 мкм и более уменьшается с высотой. По данным электронной микроскопии, аэрозольные частицы верхней части осыпи являются активными адсорбентами влаги. Доля обводненных частиц размером 0,3 мкм и более в данном случае превышает 70 %: кривые 1 и 2 характеризуют пористые фрактальные частицы, а 3—5 — пористые структуры, наполненные адсорбированной водой.

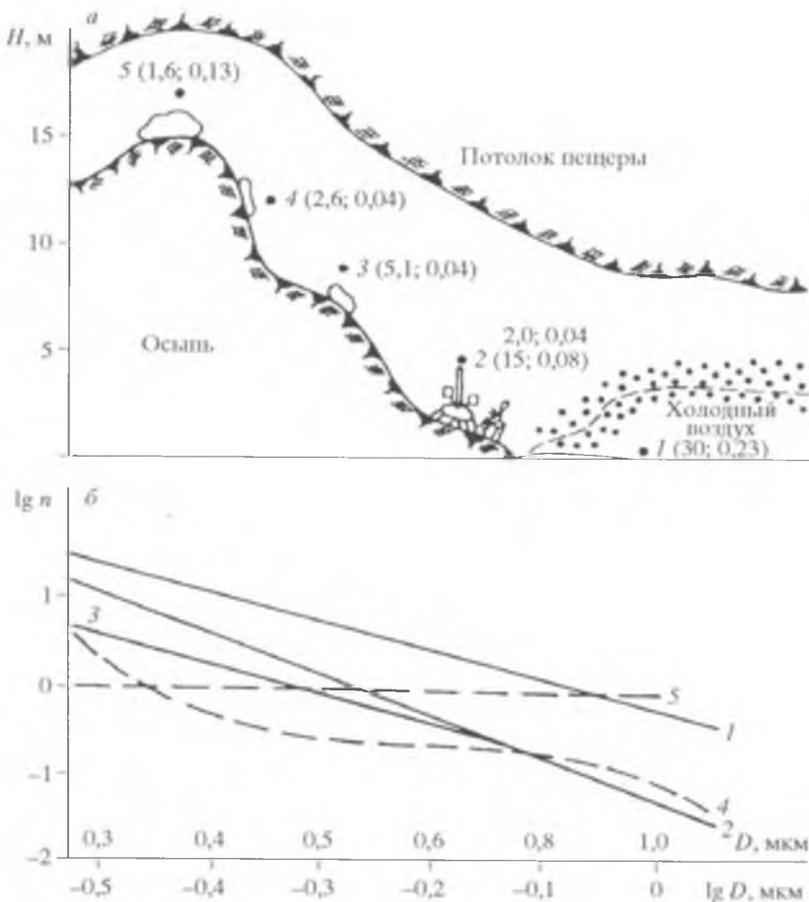


Рис. 12.27. Схематический разрез осыпи в гроте Вышка (а) и интегральная концентрация аэрозоля в зависимости от его размеров (б).

1—5 — точки отбора (в скобках первая цифра — концентрация частиц на  $1 \text{ см}^3$  размером 0,3 мкм, вторая — 0,8 мкм)

Таким образом, холодной части пещеры свойственны высокие концентрации аэрозолей и значительная их пульсация (40 %), которая частично связана с экскурсиями, когда в течение 1—2 мин через гроты проходит до 100 человек. Концентрация частиц диаметром 0,3 мкм на расстоянии до 5 м от тропы при этом возрастает в 2—3 раза, а через 5—10 мин она восстанавливается до фоновой. Теплой части пещеры свойственны “фоновые” концентрации ( $10^{-3}$  част./ $\text{см}^3$ ). Влияние экскурсий на аэрозольное загрязнение пещеры в ее теплой части необходимо оценить отдельно.

Наличие аэрозолей в пещерной среде приводит к возникновению ряда эффектов, часто находящихся в диалектическом единстве [2, 442].

*Фильтрационно-седиментационный эффект* заключается в том, что, лишаясь выпадающих аэрозольных частиц, пещерный воздух очищается от механических примесей. Всасывая загрязненный наружный воздух и отдавая очищенный, пещеры действуют как фильтры. Фильтрационный эффект наиболее выражен в крупных лабиринтовых пещерах [229]. Очищение наружного возду-

ха в пещерах может быть значительным — более чем на порядок. Например, в марте 1989 г. у входа в Кунгурскую пещеру в каждом литре воздуха содержалось 130—160 тыс. частиц разного диаметра, в то время как в пещере оно варьировало от 3 до 100 тыс. Осаждение аэрозольных частиц приводит к образованию на стенах и сводах порошкообразных, сажистых и пылеватых покрытий. По предварительным расчетам, количество механической взвеси, накапливающейся за год в пещерах региона, может измеряться тоннами.

*Коррозионно-кристаллизационный эффект.* Образующиеся при конденсации влаги на стенах и сводах полостей в результате химических процессов и коагуляции мелкие частицы (0,1—1 мкм) обладают кислотными свойствами и способны растворять горную породу. Наличие в конденсационной влаге ионов (например,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) может привести к образованию минеральных агрегатов.

*Геохимический эффект.* Ионы растворенных веществ, носителями которых в пещерном воздухе являются аэрозольные частицы, заряжены положительно или отрицательно, что способствует их накоплению на соответствующих барьерах. В воздухе подземных полостей отрицательных ионов гораздо больше, чем на поверхности. Это может быть важной составляющей общего эффекта, достигаемого при лечении больных в спелеолечебницах [50].

*Радиологический эффект.* Аэрозольные частицы могут быть носителями радиации [340], хотя их роль в этом качестве пока изучена слабо.

Применение аэрозольных методов открывает новые возможности для решения задач по фильтрации через зону аэрации в естественных условиях и воздухообмену в пещере. Следует перейти к исследованию миграции аэрозоля в трещинах и микротрещинах, используя капиллярные заборники воздуха.

## 12.8. ГАЗОВЫЙ СОСТАВ ВОЗДУХА

**Газовый состав воздуха.** Воздух и вода в пещерах обычно содержат повышенное количество углекислого газа [136, 461 и др.], продуцируемого почвой, выделяющегося из трещин и при разложении органического материала, а также из воды при ее замерзании. Сероводород в сульфатных породах образуется главным образом в результате деятельности сульфатредуцирующих бактерий (его запах часто отмечается при бурении скважин в гипсах и ангидритах [219]). На газовый состав воздуха в Кунгурской пещере влияют природные газовые выделения, а также загрязнение подземной атмосферы, связанное с пребыванием людей (до 200 тыс. в год), и загрязнение воздуха, обусловленное близостью города. В атмосферном воздухе города содержатся сернистый газ и оксиды азота. На воздух Ледяной горы могут оказывать влияние выделения и продукты горения расположенной рядом свалки. Березовая роща над пещерой почти уничтожена в 1950-е гг. браконьерами, добывающими березовый сок и топливо, а свежие посадки соснового леса, начатые в конце 1970-х гг., еще не успели оказать своего положительного очищающего влияния.

В 1980-е гг. периодическое обследование газового состава воздуха в Кунгурской пещере осуществляли кафедра коммунальной гигиены Пермского мединститута и Кунгурский стационар. Пробы отбирали на расстоянии до 0,8 км от входа, в гротах Геологов, Дружбы Народов, Полярный,

Таблица 12.7

## Газовый состав воздуха в Кунгурской пещере (данные Н. Яблоковой, А. Климчука, ИГН АН УССР), %

Точка отбора	Дата	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> + Ar	CO <sub>2</sub>
Бриллиантовый	11.87	78,85	21,01	0,14
	03.91	78,80	20,85	0,35
Крестовый	11.87	79,15	20,81	0,04
	11.87	78,65	21,06	0,29
Великан	03.91	78,94	20,75	0,31
	11.87	78,40	21,48	0,12
Вышка (низ)	11.87	78,71	21,22	0,07
Вышка (верх)	01.91	78,54	20,99	0,47
Вышка (у озера)	01.91	80,52	16,20	3,28
Длинный (у озера)	01.91	78,59	19,34	2,07
Дружбы Народов	01.91	78,38	20,47	1,15
	11.87	78,95	20,87	0,19
Метеорный	03.91	78,94	20,87	0,35
	01.91	78,56	20,41	1,03
Руины	01.91	78,91	19,91	1,18
Центральный	01.91	78,85	19,75	1,40
	03.91	78,73	20,90	0,37

Скульптурный и Центральный. Результаты анализов не сохранились и приходится пользоваться ссылками на них из отчетов и публикаций [52].

В холодный период содержание CO<sub>2</sub> возрастает в глубь пещеры до 0,09 об.%. На газовый состав пещерного воздуха оказывает влияние близость города. В атмосферном воздухе города основными загрязнителями являются сернистый газ (источник — котельные и домовые топки) и оксиды азота (источник — автомобильный транспорт). При юго-западных и южных ветрах эти загрязнения могут попадать в пещеру. У входа в гроте Полярный обнаружены минимальные концентрации сернистого газа и оксидов азота (0,009—0,018 мг/м<sup>3</sup>), что в 6 раз ниже ПДК.

По данным 17 замеров, выполненных Н. Л. Яблоковой и А. Б. Климчуком (ИГН АН УССР) в ноябре 1987 г. и марте 1991 г., среднее содержание в воздухе пещеры составило: N<sub>2</sub> — 78,84 % (CV = 0,006), O<sub>2</sub> + Ar — 20,37 % (CV = 0,060), CO<sub>2</sub> — 0,71 % (CV = 1,20). Наиболее высокие содержания CO<sub>2</sub> (3,28 %) зафиксированы в январе 1991 г. в гроте Вышка, наиболее низкие (0,04 %) — в ноябре 1987 г. в гроте Крестовый (табл. 12.7).

В теплый период в пробах воздуха, отобранных в глубинной части пещеры, концентрация CO<sub>2</sub> достигала 0,10—0,30 об.%, сероводород и аммиак обнаруживались в минимальных концентрациях. От грота Дружбы Народов к гроту Полярный содержание H<sub>2</sub>S повысилось от 0,03 до 0,163 мг/м<sup>3</sup>, NH<sub>3</sub> — от 0 до 0,313 мг/м<sup>3</sup>; увеличилось содержание непредельных углеводородов; окислы азота и сернистый газ не обнаружены. Это указывает на существенную роль антропогенного загрязнения, связанного с туристским использованием пещеры.

**Гамма-фон.** Первые замеры, выполненные в Кунгурской пещере в 1992 г., зарегистрировали повышенную гамма-активность, в 5—10 раз превышаю-



Минимальная радиоактивность наблюдается у Старого входа (5—10), в гротах Скандинавский (5—7) и Скульптурный (9—12 мкР/ч), а наибольшая (до 70 мкР/ч) — в местах с сильной тягой воздуха, что косвенно свидетельствует о газовой природе излучения. Точки с большими значениями гамма-фона при незначительной тяге воздуха обнаружены в гротах Географов (до 32), Вышка II и Близнецы (до 35), Великан (до 44 мкР/ч).

Гамма-фон существенно возрастает в летний период; его значения варьируют в гротах различного объема, но возрастание вблизи стен гротов не наблюдается. Это позволяет предположить, что причиной повышения фона является гамма-излучение не радионуклидов, входящих в состав горных пород, а присутствующих в виде аэрозолей в воздухе пещеры дочерних продуктов радона — свинца-214 (радий В) и висмута-214 (радий С).

**Радон.** Радон образуется в результате распада радия, источником которого является уран, широко распространенный в породах земной коры. Это бесцветный газ без запаха с атомным номером 86 и атомной массой 222. Плотность радона 0,0097 г/см<sup>3</sup>. Он химически инертен, легко диффундирует из породы в окружающую атмосферу, растворим в воде, хорошо сорбируется на различных поверхностях.

Диффузия радона из породы контролируется атмосферным давлением, возрастая при его понижении и повышении температуры. В результате содержание радона в воздухе испытывает сезонные колебания, причем летние значения обычно вдвое превышают зимние. В открытой атмосфере радон распыляется до низких концентраций, в подземных полостях его содержание может существенно возрастать. Доля выходящего в свободный воздух радона зависит от мощности его источника, пористости и увлажненности грунта. Сухость грунта благоприятствует свободному выделению радона, а повышенная влажность уменьшает его выход, так как радон частично растворяется в воде. Летом вследствие нагревания земли прямыми солнечными лучами диффузия радона ускоряется. При падении атмосферного давления часть воздуха из грунта возвращается в атмосферу, с ним увлекается и радон. Зимой, когда грунт хорошо заморожен или полностью покрыт снегом, масса эманаций радия в нем увеличивается. С наступлением оттепели он быстро депортируется в воздух.

Радон имеет ряд природных изотопов: <sup>219</sup>Rn (актинон), <sup>220</sup>Rn (торон), <sup>222</sup>Rn. Все они — члены естественных радиоактивных рядов (уран-238 — радий-226 — радон-222; торон; уран-235 — актиний — актинон); радон может появляться при распаде дочерних продуктов изотопов радия: радон-222 — продукт распада изотопа радия-226; радон-220 — радия-224; радон-219 — радия-223. В процессе распада радон образует несколько твердых радиоактивных дочерних продуктов в виде частиц очень малых размеров (около 10<sup>-4</sup> мкм). Среди них выделяют группы короткоживущих (период полураспада не более 27 мин) и относительно долгоживущих (<sup>210</sup>Pb и <sup>210</sup>Po) радионуклидов. Изотопы радона оседают на взвешенных в воздухе частицах пыли и воды или на других поверхностях, образуя радиоактивный осадок [337, 339].

Большинство методов количественного определения концентрации радона основано на использовании свойств короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) радона как  $\alpha$ - и  $\gamma$ -излучателей. Эти же радионукли-

ды рассматриваются и как основные дозообразующие, что определило введение понятий “скрытой энергии ДПР” и “эквивалентной равновесной объемной активности ДПР” (ЭРОА).

Определение концентрации радона в воздухе первоначально производилось сцинтилляционными радиометрами РРА-01, РРА-03. Однако при температуре ниже +5 °С и высокой влажности они работают ненадежно. Их можно использовать только при отборе проб воздуха устройством ПОУ-2.

Для измерения концентрации радона в Кунгурской пещере использовались два метода. Непосредственные измерения производились в пробах воздуха, вводимых в эманационную камеру через систему напуска, обеспечивающую очистку от дочерних продуктов распада радона. Выяснилось, что сцинтилляционные радиометры РРА-01 и РРА-03 при низкой температуре и высокой влажности пещерной атмосферы работают некорректно. Поэтому в качестве основного метода определения мгновенной концентрации ДПР использовался метрологически аттестованный прибор РАМОН-01 (4-минутный цикл измерений в 3-канальном спектрометрическом режиме с автоматической обработкой результатов на встроенном микропроцессоре). Для интегральной оценки применялись угольные адсорберы. Среднее значение концентрации радона, измеренной в 18 гротах пещеры угольными адсорберами, составило 7450 Бк/м<sup>3</sup> с минимумом в гроте Крестовый (4777 Бк/м<sup>3</sup>) и максимумом в гроте Бирюзового озера (10 030 Бк/м<sup>3</sup>).

В экскурсионной части Кунгурской пещеры выполнено 20 замеров концентрации радона и дочерних продуктов его распада радиометром РАМОН-01 (рис. 12.29): ЭРОА Rn составила 3000 Бк/м<sup>3</sup> с минимумом в гроте Полярный (1294 Бк/м<sup>3</sup>) и максимумом в гроте Эфирный (4943 Бк/м<sup>3</sup>). В Заповедной части пещеры отобрано пять проб воды из озер. Разброс значений составил от 1,8 (грот Ночь Осенняя) до 10,8 Бк/л (грот Перепутье), что в 3—17 раз ниже ПДК (30 Бк/л).

При средней для пещеры ЭРОА Rn 3000 Бк/м<sup>3</sup> допустимая годовая доза для служащих (15 мЗв) достигается за 250 ч, а для квалифицированных радиационных работников (50 мЗв) — за 840 ч пребывания в пещере в год. Это свидетельствует о необходимости радиационного контроля за режимом работы научных сотрудников и персонала пещеры. В летнее время при 5-дневной рабочей неделе (130 сут) допустимое время пребывания в пещере — 2,2 ч/сут (2 экскурсии). Для экскурсантов посещение пещеры абсолютно безопасно [392].

**Микроорганизмы.** Среда Кунгурской пещеры чрезвычайно бедна микроорганизмами, которые находятся в подземном воздухе в свободном состоянии, на аэрозольных частицах и капельках воды. Их удаление из воздуха происходит при естественном осаждении на стенках трещин и полостей самостоятельно или с частичками пыли и конденсационной влаги. Степень очищения воздуха зависит в основном от морфологии подземных пустот и их размеров, определяющих протяженность воздушных потоков [56].

В зимнее время количество бактерий в 1 м<sup>3</sup> воздуха составило от 135 до 1620. Незначительное количество бактерий и грибов-микробиот найденно в подземных водах, льдах и рыхлых отложениях [216]. Зимой 1981—1982 гг. кафедрой коммунальной гигиены Пермского мединститута было определено общее количество бактерий в пещерном воздухе между гро-

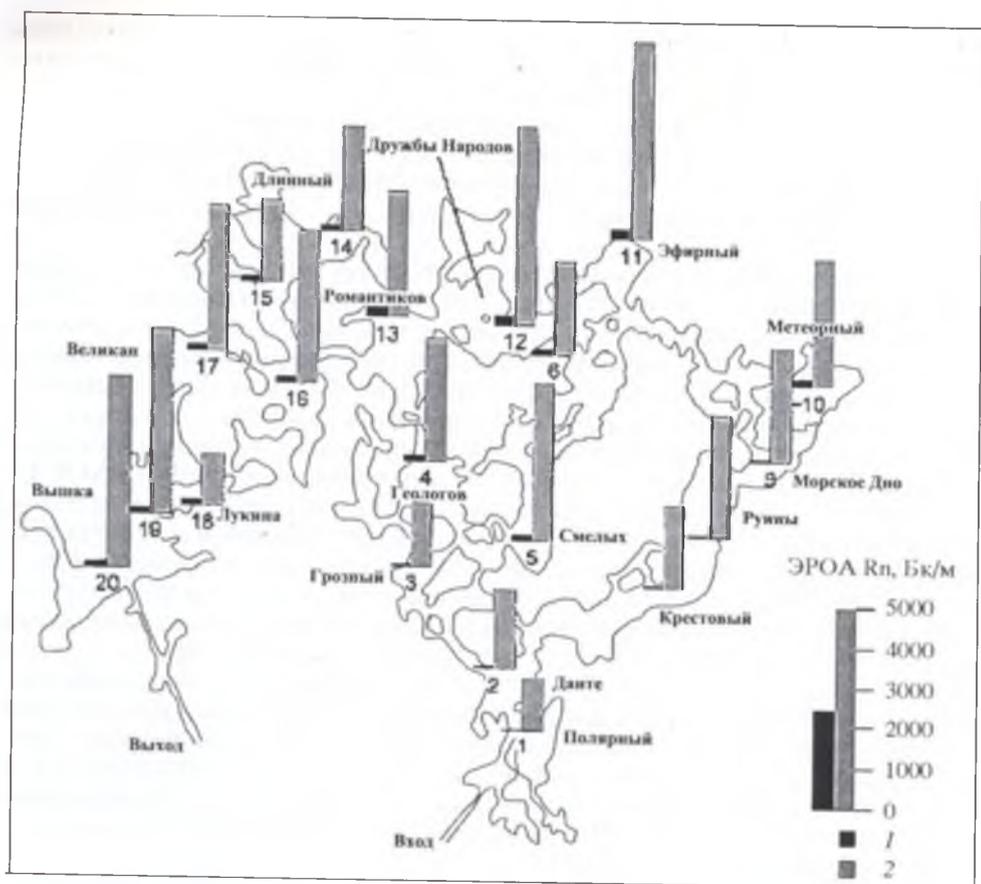


Рис. 12.29. Эквивалентная равновесная объемная активность радона в экскурсионной части Кунгурской пещеры зимой (1) и летом (2)

тами Полярный — Центральный — Дружбы Народов. Установлено, что оно уменьшается от входа в глубину пещеры примерно на 30%. В летний период микроорганизмы на фильтрах едва обнаруживались. Таким образом, даже в условиях массового туризма и близости города воздух в Кунгурской пещере в результате естественного его кондиционирования сохраняет высокую степень чистоты [22, 52]. По ориентировочным подсчетам, в массиве Ледяной горы ежегодно очищается слой воздуха мощностью 0,4 км.

Особенности микроклимата Кунгурской пещеры позволяют вернуться к вопросу об использовании ее отдельных гротов для спелеотерапии. В 1960-е гг. Н. Г. Хорошавин обследовал пещеру в целях выяснения возможности использования ее гротов для лечения бронхиальной астмы, аллергических и некоторых легочных заболеваний и пришел к выводу [274], что низкая температура пещеры, большое количество экскурсантов, трудность доставки и обслуживания больных делают устройство лечебницы невозможным.

Л. А. Верихова [50], подводя итоги развитию спелеотерапии в России, по-новому определяет понятие “лечебная пещера”. В ней не должно быть патогенных факторов: поллютантов, аллергенов, патогенных микроорганизмов, токсически действующих веществ; она должна иметь параметры микроклимата, отличающие его от обычных условий существования человека на поверхности; значения параметров микроклимата должны находиться в гормезисных пределах, обладать достаточной стабильностью на время пребывания человека в подземных условиях, а также способностью к восстановлению вследствие пребывания пациентов. Кунгурская пещера обладает всеми перечисленными качествами, поэтому необходимо ее дальнейшее изучение в спелеотерапевтическом отношении.

## 12.9. КОНДЕНСАЦИЯ И ИСПАРЕНИЕ

О возможности формирования части вод Кунгурской пещеры за счет процессов конденсации упоминали Е. С. Федоров [403], В. Я. Альтберг [9] и М. П. Головков [76, 77]. Первые исследования этого процесса провели в 50—80 гг. XX в. В. С. Лукин [220, 223, 226], Е. П. Дорофеев [114] и Ю. А. Ежов [154]. Качественные наблюдения над конденсацией выполнил в 70—80 гг. Е. П. Дорофеев (см. гл. 15).

Количественные исследования конденсации в Кунгурской пещере провел В. С. Лукин [226]. Наблюдения начались в августе 1951 г. У входа в штольню и в Старом входе были оборудованы временные посты, где в течение десяти суток каждые 6 ч измеряли температуру, влажность, давление, направление и скорость движения воздуха. Для определения влажности использовался психрометр Ассмана; скорость движения воздуха замеряли чашечным анемометром (рис. 12.30).

В течение всего периода наблюдений тяга воздуха была направлена из пещеры, температура атмосферного воздуха колебалась от 8 до 29 °С, его влагосодержание — от 4,5 до 12,8 г/м<sup>3</sup>. Воздух, выходящий из пещеры, имел почти постоянную температуру (−0,9...−0,7 °С) при полном насыщении водяными парами (относительная влажность 100 %) и влагосодержанию 4,3—4,4 г/м<sup>3</sup>. При повышении температуры и влажности на поверхности земли разность содержаний влаги в атмосферном воздухе и выходящем из пещеры возрастала. В жаркую погоду, когда конденсация водяных паров в пещере происходила особенно интенсивно, в холодных гротах нередко наблюдался туман, а в лучах прожекторов возникали оптические явления, напоминающие радуго.

В. С. Лукин рассчитал количество конденсирующихся водяных паров ( $Q$ , г) по формуле

$$Q = aV(e_{\text{пов}} - e_{\text{подз}})T, \quad (12.3)$$

где  $a$  — числовой коэффициент, учитывающий мелкие воздушные струи, выходящие вдоль подножия Ледяной горы (принят равным двум);  $V$  — объем воздуха, протекающий через входное отверстие, м<sup>3</sup>/с;  $(e_{\text{пов}} - e_{\text{подз}})$  — разность влагосодержаний атмосферного воздуха и воздуха, выходящего из пещеры, г/м<sup>3</sup>;  $T$  — время конденсации, с.

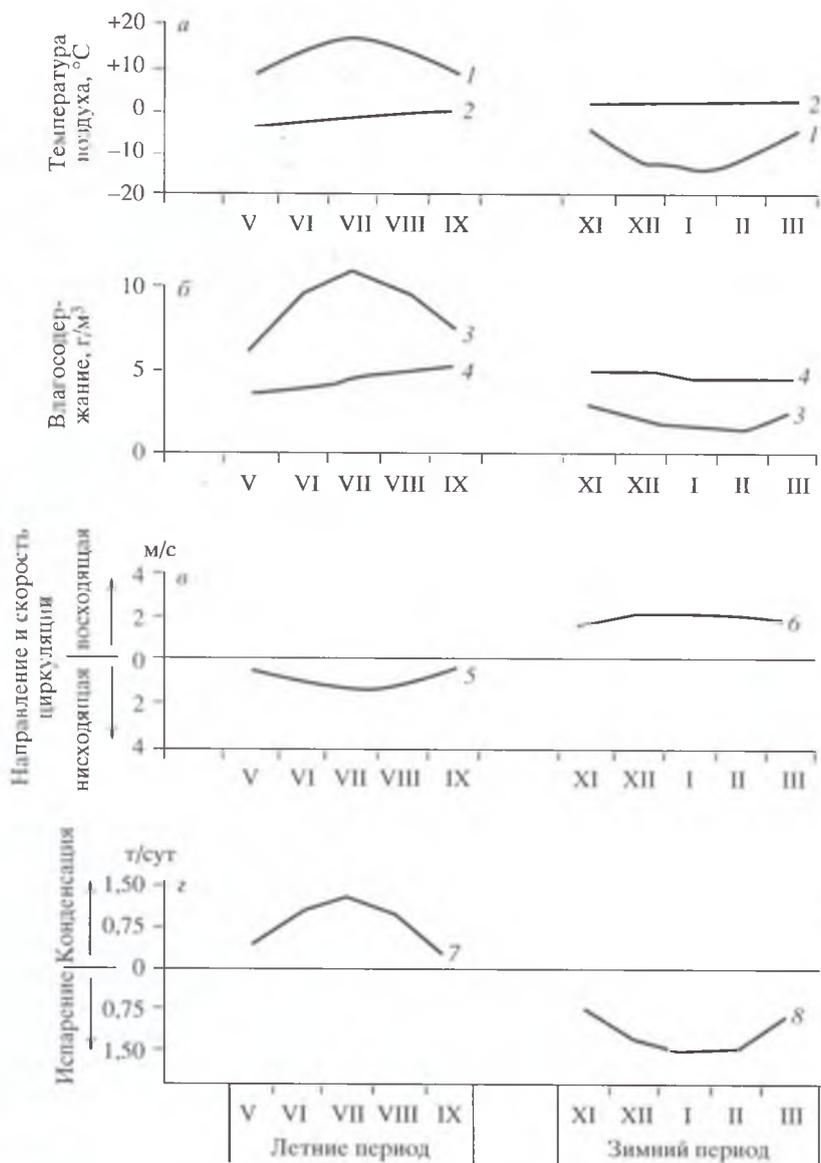


Рис. 12.30. Конденсация и испарение в Кунгурской пещере в летний и зимний периоды (по В. С. Лукину [226]).

*a* — среднемесячная температура: 1 — атмосферного воздуха, 2 — воздуха, выходящего из пещеры; *б* — среднемесячное влагосодержание воздуха: 3 — атмосферного, 4 — выходящего из пещеры; *в* — максимальная скорость движения воздуха на выходе из пещеры: 5 — летняя (нисходящая), 6 — зимняя (восходящая); *г* — количество влаги: 7 — сконденсированной, 8 — испарившейся

Летний период. Для определения количества конденсационной воды, формирующейся в пещере, В. С. Лукин использовал данные Кунгурской метеостанции. Среднее влагосодержание атмосферного воздуха за пять летних месяцев (с V по IX включительно) на станции составляло  $9,0 \text{ г/м}^3$ , а влагосодержание выходящего воздуха  $4,4 \text{ г/м}^3$  (см. рис. 12.29). Объем воздуха, протекающего по пещере, ориентировочно принят равным 200 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ . Таким образом, количество конденсационной воды составляет 920 тыс. г ( $0,92 \text{ т/сут}$ ), а за весь летний период — более 140 т.

Зимний период. Сухой и холодный атмосферный воздух, двигаясь со стороны берегового обрыва внутрь Кунгурской пещеры и далее по органным трубам и трещинам к поверхности Ледяной горы, вследствие теплообмена с горными породами нагревается и обогащается водяным паром. Средняя температура атмосферного воздуха за пять зимних месяцев (с ноября по март включительно) составляет  $-11,6^\circ$ , относительная влажность 84 %, влагосодержание  $2,2 \text{ г/м}^3$ . Однако уже на расстоянии 400 м от входа температура воздуха увеличивается до  $+5^\circ\text{C}$ , а относительная влажность до 95—100 %. Струи теплого воздуха, поднимающиеся из недр Ледяной горы, имеют температуру  $0\dots+8^\circ\text{C}$ , их относительная влажность колеблется от 40 до 100 %, а влагосодержание составляет 2— $6,5 \text{ г/м}^3$ . Среднее для зимнего периода влагосодержание равно  $4,8 \text{ г/м}^3$ , что соответствует полному насыщению воздуха (относительная влажность 100 %) при температуре  $0^\circ\text{C}$ . Величина зимнего испарения составляет  $2,6 \text{ г/м}^3$ .

Так как скорость циркуляции воздуха в зимний период примерно вдвое больше, чем в летний, средний объем воздуха, протекающий по пещере за сутки, также будет вдвое больше (приблизительно 400 тыс.  $\text{м}^3$ ). Таким образом, количество воды, испаряющейся в пещере за сутки, в среднем составляет 1040 тыс. г ( $1,04 \text{ т/сут}$ ), или 157 т за весь зимний период. Поскольку количество испаряющейся влаги на 17 т больше, чем конденсирующейся, В. С. Лукин [226] полагал, что конденсация в массиве Ледяной горы не является приходным элементом ее водного баланса.

Ход конденсации можно проследить по замерам капли со сводов и из органных труб пещеры. Приборные наблюдения над каплей проводились в 1975—1978 гг. (см. гл. 15). Для анализа годового хода капли нами избрана установка № 2 в гроте Геологов, по которой имеется самый полный ряд наблюдений (10 месяцев). Годовой ход капли в гроте Геологов свидетельствует о четких различиях между холодным и теплым периодами (рис. 12.31): в холодный она максимальна (средняя  $22,0 \text{ см}^3/\text{мин}$ ,  $CV = 0,13$ ), в теплый — минимальна (средняя  $18,7$ ,  $CV = 0,06$ ). В холодный период между ходом температуры на поверхности и капли имеется довольно тесная обратная ( $r = -0,66 \pm 0,26$ ), а в теплый — прямая ( $r = 0,77 \pm 0,21$ ) связь; в теплый период отмечена также связь между интенсивностью капли и осадками ( $r = 0,79 \pm 0,20$ ). Следовательно, натурные наблюдения свидетельствуют о конденсационно-инфильтрационном генезисе летней капли и конденсационном — зимней, но не подтверждают вывод В. С. Лукина [226] о том, что наблюдаемая в пещере капля является результатом медленного движения влаги, задержавшейся в рыхлых и коренных породах после весенне-летних атмосферных осадков.

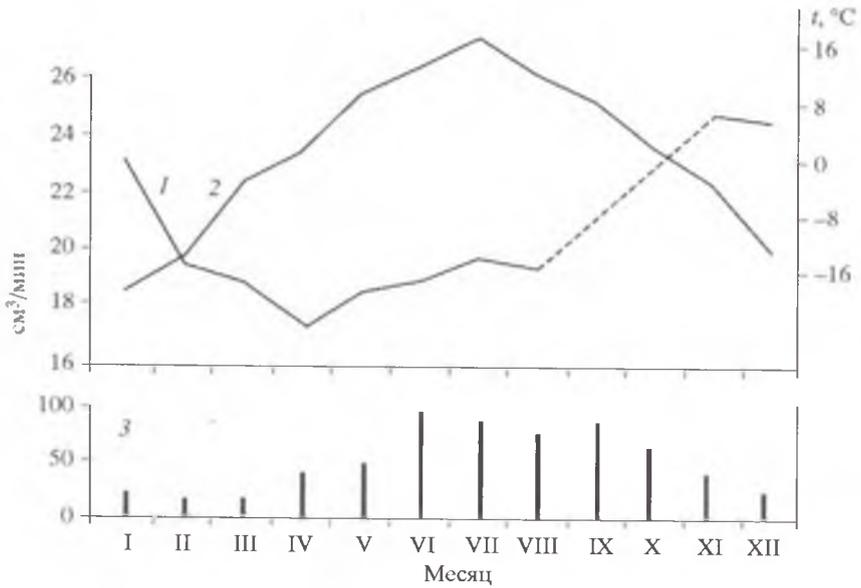


Рис. 12.31. Ход капли в гроте Геологов в 1977—1978 гг.  
 1 — интенсивность капли, см³/мин; 2 — ход температуры воздуха на поверхности, °C; 3 — месячная величина осадков на м/с Кунгур, мм

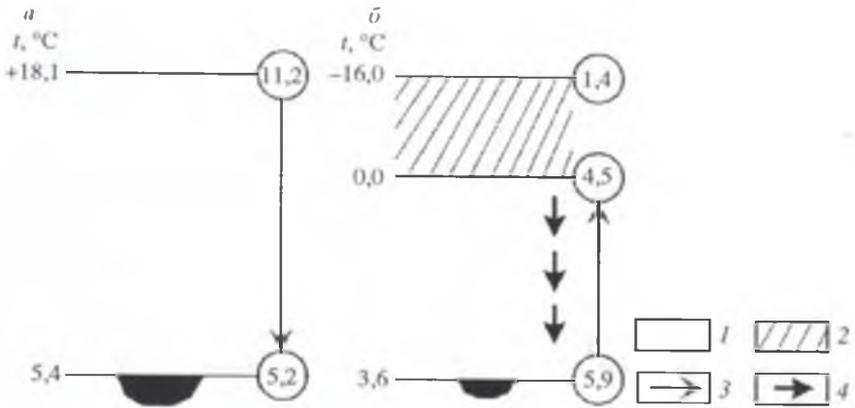


Рис. 12.32. Конденсация влаги в теплый (а, VIII) и холодный (б, I) периоды в Кунгурской пещере.  
 1 — непромерзший грунт, 2 — промерзший грунт; направления движения: 3 — парообразной влаги, 4 — капельно-жидкой влаги; цифры в кружках — парциальное давление водяных паров (мм рт. ст.)

Таблица 12.8  
 Расчет количества летней и зимней конденсации в Кунгурской пещере

Показатель	Летняя конденсация							
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Всего
$V, \text{ м}^3$	$V_{\Sigma} = 430\,000 \text{ м}^3$							
$W, \text{ м}^3/\text{мин}$	160	120	240	320	240	120	160	—
$\Sigma W, \text{ тыс. м}^3$	230,4	172,8	345,6	460,8	345,6	172,8	230,4	1958,6
$e_{\text{пов}} - e_{\text{подз}}$	0,3	1,6	4,2	5,8	4,8	1,8	0,4	—
$T, \text{ сут}$	9	31	30	31	31	30	9	171
$J, \text{ раз/сут}$	1,12	0,84	1,68	2,23	1,68	0,84	1,12	—
$Q, \text{ т}$	1,3	17,9	91,0	172,4	107,5	19,5	1,7	<b>411,3</b>
Показатель	Зимняя конденсация							
	X	XI	XII	I	II	III	IV	Всего
$V, \text{ м}^3$	$V_{\Sigma} = 430\,000 \text{ м}^3$							
$W, \text{ м}^3/\text{мин}$	160	280	410	420	410	380	160	—
$\Sigma W, \text{ тыс. м}^3$	230,4	403,2	590,4	604,8	590,4	547,2	230,4	3196,8
$e_{\text{пов}} - e_{\text{подз}}$	0,4	1,0	2,0	3,2	3,0	1,1	0,3	—
$T, \text{ сут}$	22	30	31	31	28	31	21	194
$J, \text{ раз/сут}$	1,12	1,96	2,86	2,93	2,86	2,65	1,12	—
$Q, \text{ т}$	4,2	25,3	76,2	125,0	103,3	38,9	3,0	<b>375,9</b>

В 1980-е гг. в пещерах Пинего-Кулойского района [279] и Кавказа [146] была выявлена зимняя конденсация<sup>8</sup>. Это заставило нас [136, 442 и др.] произвести уточненный расчет конденсации в Кунгурской пещере (рис. 12.32, табл. 12.8). Многолетние метеорологические данные по Кунгурской пещере свидетельствуют о том, что в ней на протяжении 171 дня наблюдается конденсация ( $e_{\text{пов}} > e_{\text{подз}}$ ), а 194 дней — испарение ( $e_{\text{пов}} < e_{\text{подз}}$ ).

В теплый период конденсация (411,3 т) происходит из атмосферного воздуха за счет перепада его влагосодержания на поверхности и под землей. Летняя капель подпитывается тальми водами и дождевыми осадками, приобретая таким образом конденсационно-инфильтрационный генезис.

В холодный период конденсация (379,5 т) происходит за счет «внутренних» запасов влаги пещеры (испарение с поверхности озер и со стен пещеры). Массив Ледяной горы покрыт снегом, грунт под которым проморожен в среднем на 85 см. Восходящий поток влаги «сбрасывает» ее на нижней границе мерзлого грунта (перепад 5,9—4,5 г/м<sup>3</sup>), где и возникает зимняя конденсационная капель. Это своеобразный «малый кругооборот», не пополняющий запасы воды в водоносном горизонте, но и почти не уменьшающий их<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> В эти же годы о возможности зимней конденсации в Кунгурской пещере в выступлениях на совещаниях и в частных беседах неоднократно упоминали Е. П. Дорофеев и В. С. Лукин.

<sup>9</sup> Утечками водяных паров через открытые органические трубы и трещины, площадь которых по сравнению с площадью пещеры крайне мала, на уровне сегодняшних знаний приходится пренебречь.

Расчетная формула имеет вид [136]

$$Q = V \epsilon (e_{\text{пов}} - e_{\text{под}}) T J, \quad (12.4)$$

где  $V$  — объем блока,  $\text{м}^3$ ;  $\epsilon$  — коэффициент пустотности, %;  $(e_{\text{пов}} - e_{\text{под}})$  — разность влагосодержаний атмосферного воздуха и воздуха, выходящего из пещеры,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  $T$  — продолжительность конденсации и испарения, сут;  $J$  — коэффициент воздухообмена, раз/сут.

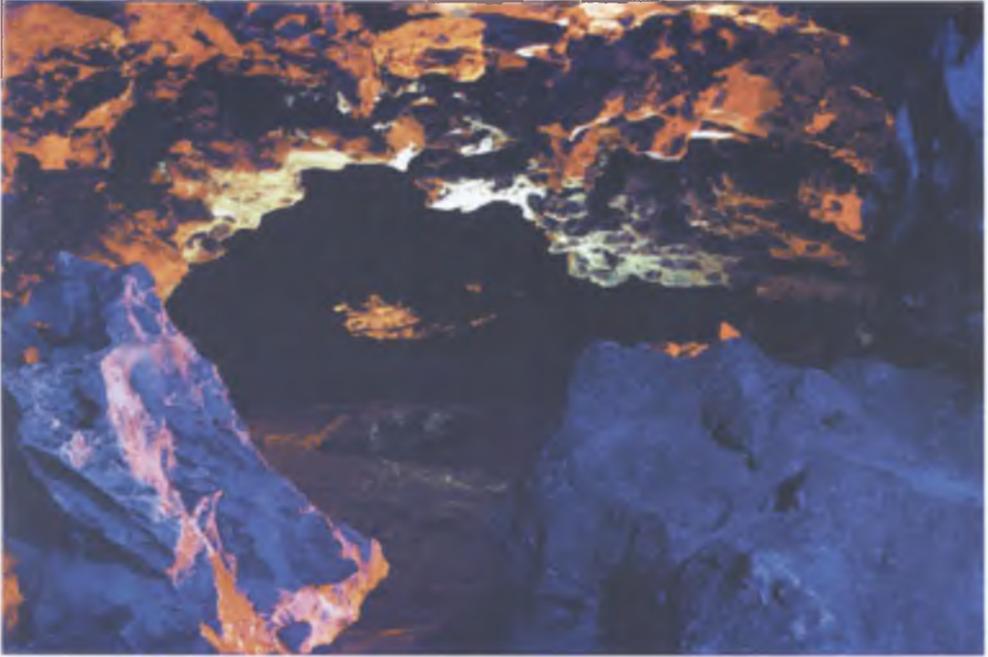
Расчет производился следующим образом: площадь пещеры  $S = 65,0$  тыс.  $\text{м}^2$ ; объем пещеры  $V_{\text{п}} = 206,0$  тыс.  $\text{м}^3$ ; площадь пещерного поля (по выпуклому многоугольнику)  $S_{\text{п}} = 229,4$  тыс.  $\text{м}^2$ ; средняя мощность пород  $67$  м; объем блока  $V_{\text{б}} = 229\,400 \times 67,2 = 14,42$  млн  $\text{м}^3$ ; коэффициент пустотности  $V_{\text{п}}/V_{\text{б}} = 206\,000/14\,420\,000 = 1,4$  % (по полости), для всего блока по аналогии с другими карстовыми массивами мира —  $3$  % [442]; объем пустот  $V_{\text{пус}} = 14,42$  млн  $\text{м}^3 \times 0,03 = 0,43$  млн  $\text{м}^3$ ; разность влагосодержаний — от  $0,3$  до  $5,8$   $\text{г}/\text{м}^3$ ; продолжительность конденсации —  $171$  сут и испарения —  $194$  сут; количество воздуха, проходящее через пещеру в минуту  $W$ ,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ; количество воздуха, проходящее через пещеру за сутки  $\Sigma W$ , тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ ; коэффициент воздухообмена  $(\Sigma W/V_{\text{п}})$  — средние месячные. Отсюда летняя конденсация составляет  $411,3$  т, зимнее испарение —  $375,9$  т, т. е. летняя конденсация в  $1,1$  раза больше зимней.

Выразим полученные данные в единицах, принятых в гидрогеологии. Определим количество конденсата в мм. Так как конденсирующаяся летом вода пресная, эта величина эквивалентна  $411,3$   $\text{м}^3$ . Разделив ее на площадь пещерного поля ( $S_{\text{п}}$ ), получим:  $411,3 \text{ м}^3/229\,400 \text{ м}^2 = 0,0018 \text{ м} \sim 2 \text{ мм}$ . По отношению к годовой сумме осадков ( $470$  мм) это ничтожная величина ( $0,4$  %). Однако конденсация происходит только летом, и по отношению к летним осадкам ( $291$  мм) это уже  $0,7$  %. Но питание подземных вод происходит не за счет осадков, а за счет разности (осадки—испарение), и для района Кунгура она составляет  $291 - 261 = 30$  мм. Таким образом, реальный вклад конденсации в приходную часть водного баланса Ледяной горы довольно высок и составляет примерно  $7$  %.

Сезонный модуль конденсационного стока составляет:  $411\,300 \text{ л}/(171 \text{ сут} \times 86400 \text{ с} \times 0,2294 \text{ км}^2) = 0,12 \text{ л}/(\text{с км}^2)$ . В сравнении с естественными ресурсами подземных вод на территории Урала ( $1,51 \text{ л}/\text{с км}^2$ , [71]) это существенная величина. Л. А. и И. А. Шимановские [425] оценивают модуль эксплуатационных ресурсов кунгурского водоносного комплекса в  $1,00 \text{ л}/\text{с км}^2$ . Конденсационное питание составляет  $12$  % от этой величины.



Припещерный комплекс



Грот Коралловый



Озеро в гроте Длинном



Грот Метеорный



Фреатический канал



“Ледяной дождь”. Сталактиты и сталагмиты в гроте Рушны



Сталагмиты в гроте Крестовом



Штопорные сталагмиты в гроте Крестовом



Сталагмит

Грот Крестовый



Каменная черепаха в гроте Руины



Кораллитовые сталагмиты в гроте Руины



Грот Вышка



Ледяной сталагнат, описанный  
М. Я. Китарры в 1848 г.



Кристаллы на своде выходного тоннеля



Органная труба в гроте Эфирном

Многолетний лед в гроте Полярном



Сублимационные кристаллы в гроте Полярном

## Глава 13

# ОТЛОЖЕНИЯ

### 13.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕЩЕРНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

В карстовых полостях встречаются различные отложения, четкие определения которых в литературе отсутствуют [393]. И. И. Гинзбург [72] определяет их как различные образования, выполняющие поверхностные и подземные карстовые формы; “Геологический словарь” [66] — как отложения, накапливающиеся в карстовых образованиях при растворении и перемещении материала горных пород; Г. А. Максимович [260] — как древние и современные осадки разного генезиса, формирующиеся в карстовых полостях; в зарубежной литературе используются такие же общие определения [461]. Общепринятая классификация отложений карстовых полостей к настоящему времени не разработана.

В отечественной литературе первую классификацию отложений пещер предложил А. А. Крубер [201], который выделил продукты разрушения и осыпания пород, пещерные глины, натечные массы, продукты животного и растительного происхождения, снег и лед. Д. В. Наливкин [310] в серии “карстовая пещера” выделил химические, обломочные и органогенные отложения, но от их дальнейшего подразделения воздержался. Д. С. Соколов [374] предложил схематическую генетическую классификацию отложений карстовых полостей, разделив их на образования, сформированные выше и ниже уровня подземных вод. Г. А. Максимович [260] разделил отложения пещер на автохтонные (остаточные, обвальные, водные механические и хемогенные, кристаллы автохтонных минералов, лед, органогенные) и аллохтонные (водные механические, снег, гидротермальные и антропогенные). Эта классификация на протяжении сорока лет использовалась отечественными исследователями, которые только вносили в нее небольшие изменения [136].

Г. Ф. Лунгерсгаузен [238] предложил выделять особый генетический тип материковых образований — инфлювий. Приведя латинское значение термина (*influvio* — проникаю, втекаю, вкрадываюсь), он выделил ряд образований, не соответствующих ему (обвалы и осыпи, кластические и химические осадки). По размещению и зональности им выделены также фации пещерных отложений: обвалы и осыпи (у стен), тонкозернистые озерные отложения (в осевой части). Активные исследования карстовых полостей в конце 50-х гг. XX в. поставили эту схему под сомнение (например, обвалы и озера могут занимать любое положение на дне пещер).

Р. А. Цыкин [413] при изучении полезных ископаемых карстовой фациальной области выделил ряд генетических типов отложений пещерной

обстановки: инфлювий, элювий, коллювий, аллювий, делювий, пролювий, метасоматиты; эоловые, вулканогенные, кольматационные, озерные образования; натечные, ледяные, моренные, биогенные, антропогенные отложения и их комбинации (например, аллювиально-инфлювиальные или аллювиально-делювиально-кольматационные). Использовать эту классификацию на практике трудно, так как ее отдельные элементы входят в состав разных пещерных образований. Например, в провально-осыпном конусе может встречаться материал элювиального, аллювиального, делювиального, коллювиального, биогенного и спелеогенного генезиса.

Л. И. Маруашвили [282] вслед за Г. А. Максимовичем подразделил пещерные отложения на автохтонные и аллохтонные, выделив среди них хемогенные, гидромеханические, гравитационные, остаточные, зоогенные и антропогенные образования.

В. Н. Андрейчук [18] отметил, что имеющиеся классификации пещерных отложений отличаются отсутствием классификационного каркаса и строгих определений разных отложений. Он предложил подразделить их на *группы* (естественные и искусственные), *классы* (гидрогенные, гляциогенные, гравитогенные, биогенные и антропогенные), *подклассы* (водно-денудационные и водно-аккумуляционные, гляцио-денудационные и гляцио-аккумуляционные и пр.). Для некоторых подклассов он выделил также *типы* и *подтипы*. Эта классификация представляет значительный интерес, но во многом спорна. Вряд ли стоит говорить об искусственных отложениях как об отдельной группе, представленной одним классом; надуманно выглядит выделение денудационного подкласса (отложения — всегда продукт аккумуляции); ее использование затруднено наличием многочисленных пояснений.

К. А. Горбунова с соавт. [93] отметили, что пещерные системы представляют собой особые фациальные обстановки. Эволюция пещер приводит к распаду первоначально однородной обстановки на мезо- и микрофации. Для каждой фациальной обстановки характерен ведущий геологический процесс (физическое, гравитационное и химическое выветривание, растворение, экзогенное минералообразование). К сожалению, вопрос о выделении пещерных мезо- и микрофаций ими лишь поставлен.

В отечественной литературе известны и более детальные классификации отдельных групп пещерных отложений [36, 246, 406 и др.].

При попытках создания классификации отложений карстовых полостей применяются разные подходы. Проиллюстрируем это несколькими примерами.

Остаточные отложения пещер выделил Г. А. Максимович [260]. Опыт изучения карбонатных, сульфатных и соляных пещер привел к разделению типа остаточных отложений на подтипы глинистых и песчаных ([93] — *литологический подход*). Изучение форм накопления глинистых остаточных отложений позволило выделить вид “глинистые вермикуляции”, а затем подразделить его на подвиды — мелкие пятна, блюдцеподобные, пузырчатые и вытянутые следы, леопардовая и тигровая шкура, иероглифы, дендриты ([452] — *морфологический подход*).

Обвальные отложения пещер выделили Д. С. Соколов [374] и Г. А. Максимович [260]. В. Н. Дублянский [136] подразделил тип грави-

тационных отложений пещер на термо-, обвально-, провально- и сейсмогравитационные подтипы, а А. Г. Филиппов [406] выделил их виды (термо-, мерзлотно-, ледово-, десквамационно-, гидратационно-, кристаллизационно-, коррозионно-, сейсмо-, техногенно-гравитационные — *генетический подход*). Кроме того, он предложил несколько дополняющих классификаций по форме, размеру, составу обломков и типу цемента — *морфологический, морфометрический, минералогический подходы*.

Пещерный лед выделил А. А. Крубер [201], а Г. А. Максимович [260] разделил его на атмогенный, гидрогенный и гетерогенный, Б. Р. Мавлюдов [246] подразделил снежно-ледяные образования по солености, генезису, времени существования, типам скопления, а затем — по составу. При описании пещерных минералов К. Хилл и П. Форти [452] использовали для организации материала сперва форму спелеотем<sup>10</sup> (морфологический подход), а затем их состав (минералогический подход).

Таким образом, при разработке классификаций пещерных отложений применяются генетический, литологический, морфологический, морфометрический, минералогический, временной подходы, причем для выделения одного и того же таксона (группа, класс, подкласс, тип, подтип или вид) в разных случаях используются различные признаки.

Мы полагаем, что создание всеобъемлющей иерархической классификации пещерных отложений в настоящее время вряд ли целесообразно. Следует попытаться создать базовую классификацию, основывающуюся на наиболее важных признаках изучаемого объекта, а затем дополнять ее для каждого выделенного типа отложений частными классификациями, созданными на основе детального изучения наиболее представительных пещер.

При описании отложений Кунгурской пещеры в качестве рабочей нами принята классификация Соколова—Максимовича [260], дополненная В. Н. Дублянским [136] и В. Н. Андрейчуком [17]. Она включает только типы и подтипы отложений (табл. 13.1). Их наличие проанализировано в 46 гротах (33 — в экскурсионной, 13 — в заповедной части). Остаточные отложения распространены повсеместно, водные механические примерно поровну представлены инфлювиальными (33 и 29 %) и озерными (14 и 18 %) накоплениями. Среди водных хемогенных отложений преобладают субкавальные формы (пленки), которых особенно много в заповедной части (90 % гротов). Снежно-ледяные отложения развиты только в экскурсионной части (70 % гротов), а органические и антропогенные в ней преобладают (табл. 13.2).

## 13.2. ОСТАТОЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Остаточные отложения формируются за счет накопления и переотложения нерастворимого остатка карстующихся пород [136, 260]. Они наименее изучены, что обусловлено трудностью их выделения в “чистом” виде.

<sup>10</sup> Под термином “спелеотема” в зарубежной литературе понимается вторичное минеральное образование, сформированное в пещерной среде из первичного материала в результате физико-химических реакций. Это понятие введено в “Минералогическую энциклопедию” [294].

Таблица 13.1

## Классификация отложений Кунгурской пещеры

Тип	Подтип	Тип	Подтип
Остаточные	Пелитовые	Водные химические	Субтерральные
Гравитационные	Псаммитовые		Субаквальные
	Обвальные		Кристаллы автохтонных минералов
Водные механические	Провальные	Снежно-ледяные	Атмогенные
	Инфлювиальные		Гидрогенные
	Речные	Органические	Гетерогенные
	Озерные	Антропогенные	Не выделяются
			Не выделяются

Таблица 13.2

## Распространение различных отложений в Кунгурской пещере, % гротов

Типы и виды отложений	Экскурсионная часть	Заповедная часть	Типы и виды отложений	Экскурсионная часть	Заповедная часть
<i>Остаточные</i>			<i>Водные химические</i>		
Пелитовые	100	100	Субтерральные (натёки)	14	33
Псаммитовые	100	100	Субаквальные (пленки)	32	90
<i>Гравитационные</i>			Кристаллы автохтонных минералов	100	100
Обвальные	23	90	<i>Снежно-ледяные</i>		
Провальные	70	50	Без разделения	70	0
Карбонатный заполнитель органичных труб	25	18	<i>Органические</i>		
Глинисто-щебенчатый заполнитель органичных труб	47	45	Без разделения	45	33
<i>Водные механические</i>			<i>Антропогенные</i>		
Инфлювиальные (галлика, песок, глина красная)	33	29	Без разделения	57	44
Озерные (песок и глина серая)	14	18			

Понятие “остаточный” отражает происхождение самого материала отложений, но не динамическую форму транспортировки и аккумуляции вещества. При образовании карстовой полости высвобождается нерастворимый остаток, оседающий на ее стенах и дне. Оставаясь по генезису остаточным, по форме транспортировки и аккумуляции он соответствует водным механическим отложениям [374]. При растворении стен и потолка конденсационными водами нерастворимый остаток оползает по стенам, по форме транспортировки и аккумуляции являясь солифлюксом [406].

Для большинства древних пещер характерны парагенетические ассоциации остаточных отложений с глинами и суглинками, привнесенными инфльтрационными водами по трещинам и карстовым каналам с поверхности. Их исходным материалом являются почвы, коры выветривания, хемо-

Таблица 13.3  
**Содержание нерастворимого остатка в породах района Кунгурской пещеры**  
 (по материалам Б. Ф. Перевозчикова)

Ярус	Порода	Среднее содержание, %	CV	Средняя плотность*, т/м <sup>3</sup>
P <sub>Iu</sub>	Мергели, известняки, глины, песчаники	18,6	0,50	2,68
P <sub>I</sub> <sup>in</sup>	Ангидриты, гипсы	2,2	0,45	2,61
P <sub>Ik</sub> <sup>ts</sup>	Известняки, доломиты	3,0	0,29	2,73
P <sub>Ik</sub> <sup>dm</sup>	Гипсы, ангидриты	1,6	0,17	2,61
P <sub>Ik</sub> <sup>el</sup>	Доломиты	4,0	0,40	2,64
P <sub>Ik</sub> <sup>sh</sup>	Ангидриты, гипсы	2,3	0,15	2,75
P <sub>Ik</sub> <sup>nev</sup>	Доломиты	3,4	0,67	2,75
P <sub>Ik</sub> <sup>ld</sup>	Ангидриты, гипсы	4,0	0,51	2,61
P <sub>Ik</sub> <sup>ph</sup>	Доломиты, известняки	3,1	0,51	2,73
P <sub>Iag</sub>	Известняки	4,1	0,92	2,70

\* Расчетная плотность, т/м<sup>3</sup>: известняк — 2,70, доломит — 2,75, мергель — 2,70, гипс — 2,32, ангидрит — 2,90, песчаник — 2,66, алевролит — 2,68, глина — 2,66 [190].

Таблица 13.4  
**Гранулометрический состав остаточных и водных механических отложений**  
**Кунгурской пещеры [260], %**

Грот, отложения	Гранулометрический состав, мм					
	> 0,25	0,25—0,05	0,05—0,01	0,010—0,005	0,005—0,001	< 0,001
Смелых, остаточная глина	—	12,0	49,7	21,8	—	16,5
Смелых, иллювиальная глина	0,4	8,9	28,3	56,9	0,3	0,6
Дружбы Народов, озерная глина	0,6	12,7	22,2	46,5	11,1	6,9

генные карбонатные образования (инфильтрационный кальцитовый цемент, различные натёки), обвальные накопления. Высвобожденные компоненты окисляются, гидратируются, выщелачиваются, причем эти преобразования оканчиваются на разных стадиях.

Остаточные отложения Кунгурской пещеры изучены слабо. В зоне контакта коренных пород с отложениями, сформировавшимися в процессе выветривания, в трещинах и нишах у основания стенок гротов накапливаются псаммито-псефитовые осыпи, представляющие собой полиминеральные образования. Они состоят в основном из остаточных продуктов физико-химического выветривания пород, слагающих стены и своды полостей [299—302]. Под органическими трубами возникают парагенетические ассоциации остаточных отложений с иллювиальным суглинистым и глинистым материалом, привнесенным из верхней части разреза, с хомогенными гипсовыми и карбонатными образованиями и обвальными накоплениями. Пещерные глины, имеющие серый цвет, визуально хорошо отличаются от поверхностных красных и коричневых глин.

Общее представление о количестве нерастворимого остатка, образующегося из пород иренского яруса, дают данные, полученные в 1950-е гг. Б. Ф. Перевозчиковым (табл. 13.3). При растворении 1 м<sup>3</sup> ангидритов, гип-

сов и доломитов ледянопещерской и неволинской пачек образуется в среднем 99,5 кг (около 0,04 м<sup>3</sup>) нерастворимого остатка. Объем пещеры составляет около 200 тыс. м<sup>3</sup>. При растворении такого количества горной породы образовалось более 7,4 тыс. м<sup>3</sup> автохтонного нерастворимого остатка. Кроме того, с инфильтрационными водами в пещеру поступают аллохтонные отложения, образованные при растворении пород шалашнинской и елкинской пачек (около 0,03 м<sup>3</sup> с 1 м<sup>3</sup> породы).

В составе остаточных отложений Кунгурской пещеры находится материал псаммитовой, алевроитовой и пелитовой размерностей. Первая входит в состав нерастворимого остатка ангидрита, гипса, доломита, песчаника, вторая и третья — мергеля, алевролита, хотя они есть в составе прослоев в ангидрите, гипсе и доломите.

Сведений о гранулометрическом составе остаточных отложений Кунгурской пещеры немного. Г. А. Максимович [260] приводит всего один анализ пещерной глины из грота Смелых (табл. 13.4), причем нет уверенности, что это именно остаточные отложения.

Пещерные глины отличаются от поверхностных наличием обломков коренных пород и более высокой пористостью (до 58 %), что повышает их фильтрационные свойства [113].

### 13.3. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Гравитационные отложения широко распространены в Кунгурской пещере и упоминаются в ряде работ К. А. Горбуновой, Е. П. Дорофеева, В. С. Лукина и др. При составлении плана пещеры Е. П. Дорофеев выделил участки развития глыбово-щербнистых и глыбово-щербнисто-глинистых осыпей (см. рис. 7.7). По современным представлениям первые являются *обвальным*, а вторые — *провальным* подтипами гравитационных отложений [107, 206].

По сейсмической шкале MSK-64 [174] Кунгурская пещера находится в зоне 7-балльных сотрясений. О возможных связях карста и сейсмичности Пермской области упоминают многие исследователи [195, 208, 228, 263, 424]. Несмотря на это *сейсмический* подтип [136] среди гравитационных отложений Кунгурской пещеры выделить не удалось: совпадения дат землетрясений Пермской области и обвалов в ней не выявлены.

Кроме древних обвалов и обрушений за 75 лет (1926—2000 гг.) в Кунгурской пещере зафиксировано около 120 свежих обвалов, причем 20 из них произошли в присутствии людей. Время остальных с точностью от одного часа до нескольких месяцев определяли по засыпанным тропам, сломанным ограждениям и метеобудкам, разбитым прожекторам, раздавленным электрическим кабелям, скоплениям свежих обломков на полу и свежим сколам на сводах [119]. По десятилетиям обвалы распределяются более или менее равномерно (25—30 %). Наиболее полно учтены обвалы в местах массового посещения и в годы интенсивных работ по благоустройству.

Обвальнй процесс в зоне морозного выветривания особенно интенсивен (табл. 13.5). Максимум обвалов бывает летом (34 %), когда промерзшие породы оттаивают и более активны инфильтрационные процессы; в остальные сезоны они распределяются примерно поровну.

Таблица 13.5

**Распределение обвалов в Кунгурской Ледяной пещере в зависимости от промерзания пород [119]**

Зона	Площадь, м <sup>2</sup>	Количество обвалов	
		всего, шт.	шт/м <sup>2</sup>
Многолетней мерзлоты	2200	0	0,000
Сезонного промерзания пород	9800	59	0,006
Постоянных положительных температур (посещаемая часть)	18 000	55	0,003

В 2003 г. Л. В. Некрасова (Горный институт УрО РАН) по просьбе авторов этой монографии рассмотрела возможную связь обвалов в пещере с фазами Луны. Вопрос о влиянии Луны и Солнца на сейсмическую активность на Земле рассматривается давно. А. Перре еще в 1848 г. установил, что число дней с землетрясениями возрастает при приближении Луны к сизигиям, их частота увеличивается, если в это время Луна близка к перигею; землетрясения чаще происходят в моменты прохождения Луной местного меридиана, чем на ее восходе и заходе. Очевидно, это относится и к деформационным процессам в земной коре.

Вращаясь вокруг Земли, Луна меняет свое положение и относительно звезд. Одно и то же положение по отношению к звездам она занимает через 27,32 сут (сидерический, или звездный, месяц). Полный оборот вокруг Земли она совершает за период времени, равный 29,53 сут (синодический, или лунный, месяц). В зависимости от степени освещенности Луны Солнцем различают четыре фазы ее вращения: новолуние, первая четверть, полнолуние и последняя четверть. Каждая из них составляет примерно семь дней.

Наибольшие приливообразующие силы характерны для перигея лунной орбиты и положения Луны в сизигиях. В перигее, в положении наиболее близкого нахождения Луны к Земле, ее приливообразующая сила на 40 % больше, чем в апогее.

На диаграмму (рис. 13.1) нанесены 60 датированных обрушений, зафиксированных в Кунгурской пещере в 1944—2003 гг.: по вертикальной оси отложено время между событием и прохождением Луны через перигей орбиты, а по горизонтальной — фазы Луны в момент события. Обрушения в пещере сконцентрированы в определенных поясах шириной 7 сут. Большинство обвалов происходит в те моменты, когда синодический и сидерический циклы совпадают по фазе или находятся в противофазе (т. е. в те моменты, когда один из сизигийных приливов усилен за счет перигейного прилива). Промежуточные фазовые ситуации содержат значительно меньшее количество событий.

Расчеты показали, что 35 % всех обрушений произошло в те моменты, когда синодический и сидерический циклы были в пределах одной недели от фазы "новая луна во время перигея", а 38 % — во время противофазного соотношения "полная Луна во время перигея". Только 16 обрушений (27 %) зафиксированы в других фазовых ситуациях. Таким образом, плотность распределения событий в первой группе в 2,7 раза выше, чем во второй. Установленные соотношения могут быть использованы для прогнози-

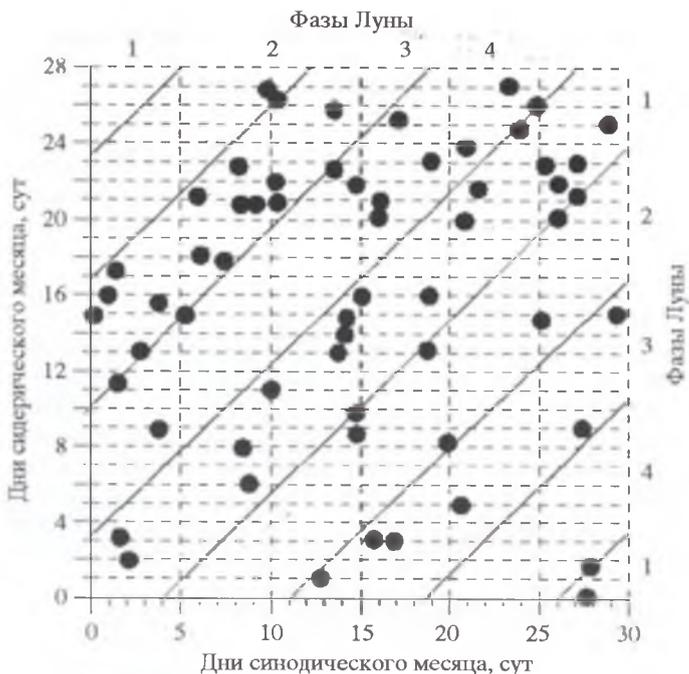


Рис. 13.1. Диаграмма распределения обрушений в Кунгурской пещере в зависимости от фаз Луны и ее положения на орбите (по оси ординат — время от перигея, по оси абсцисс — время от новолуния, сут)

рования временных интервалов повышенной вероятности различных обрушений в пещере.

Обвалы имеют разный характер: 73 % составляют вывалы отслоившихся пластов и выколовшихся по трещинам блоков; 13 % — обрушение рыхлого доломитового щебенисто-

глинистого заполнителя из органных труб; 14 % — разрушение защитных стенок и крепей. Больше всего обвалов отмечено в ближней к входу и выходу части пещеры, где происходит частая сезонная или суточная смена положительных и отрицательных температур. В морозные дни вода, замерзающая в трещинах, разрывает породу со звуком, напоминающим глухие выстрелы. В теплой части пещеры обвалы наиболее часты в гротах с большими пролетами сводов. Наиболее обвалоопасны гроты Вышка (15 %), Великан (10 %), Крестовый (7 %), Дружбы Народов (6 %), Геологов, Колизей и Руины (по 5 %).

Интенсивность обвальных процессов определяется сложением и трещиноватостью пород. Чаше падают обломки со сводов, сложенных комковатыми брекчиевидными гипсами (верхний пласт ледянопещерской пачки). Блоки ангидритов этой же пачки обрушаются реже, причем этому предшествует длительное прогибание свода над полостью. Слоистое строение толщи, чередование в ней сульфатных и карбонатных пород, постепенное увеличение пролетов подземных полостей обуславливают широкое распространение процессов прогибания слоев, деформации сводов пещеры. Представление о распределении свежих обвалов по гротам дает рис. 13.2.

На всей площади пещеры толща надпещерных пород охвачена волнообразными изгибами [260], представляя яркий пример карстовой тектоники. Как показывает структурная карта кровли пещеры, составленная Б. Ф. Перевозчиковым, амплитуда колебаний отметок подошвы неволинской пачки достигает 5 м. В сводах многих гротов залегание пород наклонное.

Обнаружена связь между провалами и карстопроявлениями на поверхности. В границах пещерного поля зафиксировано 136 карстовых воронок,

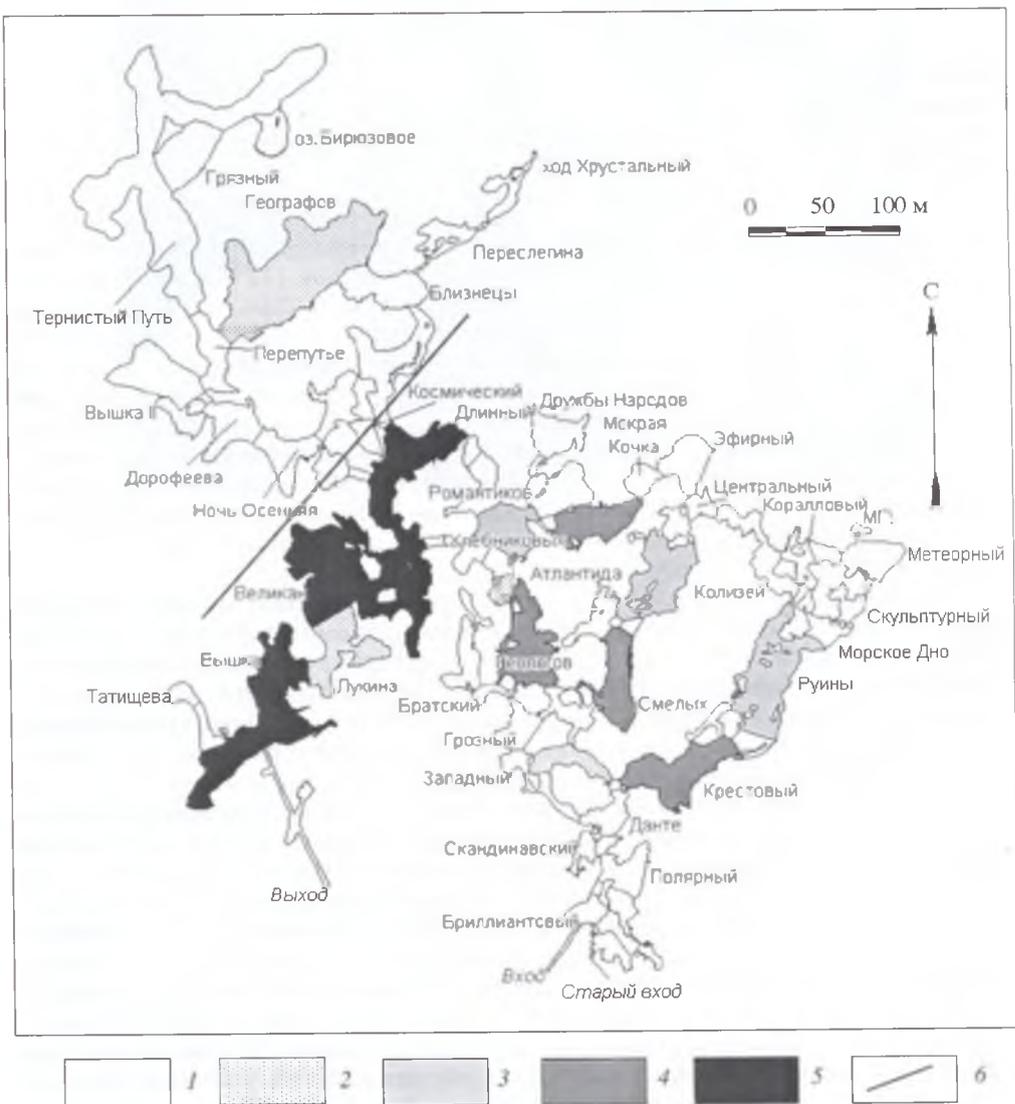


Рис. 13.2. Распределение обвалов в Кунгурской пещере (1926—2000 гг.).  
 Количество обвалов, шт/год: 1 — менее 3; 2 — 3—4; 3 — 5—6; 4 — 7—10; 5 — более 10; 6 — линия нарушений

Таблица 13.6

**Соотношение объемов карстовых воронок и осыпей в некоторых гротах  
Кунгурской пещеры [112]**

Грот	Объем воронки на поверхности ( $V_1$ ), м <sup>3</sup>	Объем осыпи в пещере ( $V_2$ ), м <sup>3</sup>	$V_1 - V_2$	$(V_1 - V_2)/V_2$
Эфирный	670	500	170	0,34
Великан	4210	3520	690	0,20
Смелых	4880	3020	1860	0,61
Западный—Крестовый	13480	10 780	2700	0,25

из которых 34 наиболее крупные (25 %) расположены над конусообразными осыпями в пещере [106]; 16 небольших воронок (12 %), по-видимому, образовались над пустотами в кровле сульфатной толщи, так как под ними нет труб и осыпей; остальные карстовые воронки (63 %) располагаются над засыпанными или еще не обнаруженными ходами пещеры. В пещере имеется 30 осыпных конусов, над которыми карстовых воронок нет. Обвальная процесс здесь не захватил еще самые верхние слои разреза. Сопоставление поверхности Ледяной горы с карстовыми воронками и плана пещеры позволяет заключить, что большинство из них имеет провальное происхождение. Между размерами карстовых воронок на поверхности и объемами осыпных конусов в пещере прослеживается четкая связь (табл. 13.6).

Несмотря на разрыхление породы при обрушении, объемы конусов осыпей под устьями органных труб меньше объемов карстовых воронок. Это объясняется тем, что часть рыхлого материала выполняет органную трубу и полости в верхней части толщи гипсоангидритов. Косвенно это свидетельствует об отсутствии крупных полостей над Кунгурской пещерой: объем осыпного материала, аккумулированного выше нее, составляет около 35 % от объема осыпей в пещере.

С удалением от р. Сылвы мощность покровных отложений увеличивается и взаимосвязь между подземными и поверхностными карстовыми формами становится менее отчетливой — даже такие крупные гроты, как Географов, не отражаются в рельефе земной поверхности. В этих условиях особенно большое значение приобретают геофизические исследования.

Обрушения сводов приводят к накоплению обломков. Непрерывный процесс обрушения обуславливает перемещение полостей пещеры вверх. Многие участки пещеры заполнены обломками пород до свода. Некоторые упавшие блоки достигают 5—10 м в поперечнике. В сводах наиболее крупных галерей формируются купола обрушения, под которыми быстро "вырастают" высокие конусы из обломков. Такие обвальные конусы имеются во всех крупных гротах — Великан, Метеорный, Географов и др. Под устьями органных труб, напротив, накапливается в основном рыхлый глинистый материал с отдельными глыбами пород карбонатных пачек.

Изучение гравитационных отложений позволило уточнить геологическое строение района: на рис. 13.2 хорошо видно нарушение с простиранием СВ 40°, разделяющее экскурсионную и заповедную части пещеры. Вдоль него тянутся гроты Вышка—Великан—Длинный (в юго-восточном блоке) и Космический—Близнецы (в северо-западном блоке);



Рис. 13.3. Обвальные глыбы в гроте Космический

именно у него кончаются гроты Татищева—Великан и находятся мощные обвальные конусы (гроты Татищева, Великан, Космический). В дальнейшем существование этого нарушения было подтверждено геолого-геофизическими данными.

Гравитационные отложения разных типов перекрывают ходы пещеры. Судя по описаниям разных лет, она “живет” — проходы в гроты закрываются обломочным материалом. Используя карты распространения воронок на поверхности Ледяной горы, обвальных отложений в пещере, материалы геофизических исследований, а также изучив архивные данные и изменения в направлении движения воздуха в разные сезоны, Е. П. Дорофеев реконструировал контуры недоступных в настоящее время гротов пещеры (см. рис. 9.11). Их протяженность достигает 3,4 км.

Рассмотрим особенности гравитационных отложений Кунгурской пещеры.

**Обвальные отложения.** Развиты под сводами пещеры, сложенными коренными породами, там, где обвалы происходят в связи с потерей их устойчивости при формировании полостей, а также под устьями органических труб, доходящих только до подошвы неволинских карбонатных пород. Представлены автохтонным материалом, в составе которого находятся обломки ангидрита, гипса, доломита и известняка разной размерности (блоки, глыбы, плиты, дресва, щебень и пр.; рис. 13.3).

**Провальные отложения.** Развиты под устьями высоких органических труб, проходящих через неволинскую пачку. Представлены автохтонным и аллохтонным материалом, в составе которого имеются как коренные породы (обломки ангидрита, гипса, доломита, известняка, карстовой брекчии), так и материал из перекрывающих Ледяную гору плиоцен-четвертичных отложений (глины, суглинки, щебень, галька и пр.).

В ближней (холодной) части пещеры глыбово-щебнистый материал, накапливающийся на дне ходов, в зонах капли образует брекчию с ледяным цементом. Такая брекчия формировалась и во время наводнений (1902, 1914, 1926, 1979 гг.), когда воды р. Сылвы внедрялись в холодную зону. При таянии льда может происходить оседание пола отдельных гротов (например, в гроте Вышка), которое иногда трактуется как результат только химической денудации.

#### 13.4. ВОДНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Инфлювиальные отложения. Наличие над Кунгурской пещерой постоянных и временных карстовых озер с понорами на дне определяет возможность поступления в пещеру после снеготаяния и сильных ливней инфлюационного материала. К нему относятся скопления вязкой глины в основаниях органических труб в гротах Вышка, Геологов, Дружбы Народов, Заозерный, Космический, Крестовый, Ночь Осенняя, Романтиков, Руины, Смелых, Центральный и др.

Наиболее интересны в этом отношении гроты Заозерный, Космический и Хлебниковых. В Заозерном гроте в верхней части осыпи в нише в стене видны чередующиеся слои отсортированного песка и тонкозернистой красной глины, отложенные потоком, питающимся из большой воронки на поверхности. В Космическом гроте склон осыпи покрыт красной глиной, в промоинах которой лежит отмытая кремневая галька разных размеров. Обрушение глыб гипса вызвало расплескивание полужидкой глины на стены. В гроте Хлебниковых найдена хорошо окатанная галька размером от 1 до 4,5 см, имеющая светло-серый, серый и черный цвет. Состав ее различен: яшма серо-зеленого цвета с коричневыми пятнами (6 шт.), тонкозернистый алевролит с глинистым цементом (2 шт.), черный кремнь (1 шт.), серый с коричневым оттенком известняк оолитовой структуры (1 шт.). Все они поступили с поверхности и по отношению к пещере аллохтонны.

Речные отложения. Русловые подземные потоки в Кунгурской пещере отсутствуют. Невысокие скорости движения подземных вод, зафиксированные на ее отдельных участках в паводок (до 0,002 м/с), достаточны для транспортировки частиц только пелитовой размерности [356], выделить которые из глинистых отложений иного генезиса невозможно. Не исключен завыв в пещеру песчано-глинистых отложений р. Сылвы. Необходимы специальный поиск и изучение таких отложений в районе грота Вышка, в который ежегодно поступают паводковые воды через глыбовый навал.

Озерные отложения представлены различными осадками, источниками которых являются продукты выветривания коренных пород, минералы, кристаллизующиеся из озерной воды, а также материал, занесенный р. Сылвой в половодье. Вода озер имеет минерализацию 1,8—2,2 г/дм<sup>3</sup> и ГСК состав. Донные осадки исследованы в озерах гротов Великан, Длинный, Лукина и Романтиков. Они представлены преимущественно обломками глинисто-карбонатного состава, в разной степени загипсованными, с примесью терригенного материала. Карбонаты чаще всего имеют доломитовый, реже кальцитовый состав, с примесью глинистого вещества и анги-

дрита. Иногда осадок уплотнен и собран в агрегаты, но чаще для него характерна полужидкая илистая форма с грубодисперсной структурой, примесью алевритового материала, обломочная часть которого представлена кварцем (зерна хорошо окатаны, в некоторых случаях корродированы), микроклином, плагиоклазом, чешуйками хлорита.

Из минералов глин по данным рентгено-структурного анализа (РСА) установлены смектит, иллит, каолинит, корренсит и монтмориллонит. Обязательной примесью во всех донных осадках являются обломки ангидрита размером 0,5—1,0 мм и новообразования гипса. Карбонатный материал характеризуется пелитоморфной структурой и чаще всего образует слаболитифицированные сгустки с примесью глины и единичных ромбоэдров доломита.

Терригенно-глинистые озерные осадки по минеральному составу близки к полиминеральным образованиям нижней части стенок полости. Они в разной степени кальцитизированы и загипсованы.

На дне озера в гроте Великан обнаружено новообразование гипса в виде корочки толщиной 3,5—5,0 мм с горизонтально-слоистой пористой текстурой и мелкозернистой структурой. Отмечается слабая реакция с соляной кислотой, что указывает на присутствие примеси карбонатов. На поверхности слойков отмечаются обломочки ангидрита размером 0,3—0,5 мм.

В разрезах буровых скважин в Кунгурской пещере видно, что в их верхней части обычно располагается слой глины мощностью до 1 м, ниже — горизонт, содержащий обломки гипса либо глину с обломками гипса. Затем опять следует слой глины, на разных отметках включающий обломки известняков. Ниже располагается горизонт разрушенных известняков, а затем начинаются крепкие доломитизированные известняки филипповского горизонта. В разрезах всех пяти скважин отсутствуют глыбы гипса. Это свидетельствует о заложении ПраКунгурской пещеры в толще гипсово-ангидритовых пород на контакте с известняками филипповского возраста и о заполнении ее нижней части водными механическими отложениями до начала активных гравитационных процессов.

### 13.5. ВОДНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ

**Субтерральные отложения.** Под этими отложениями Г. А. Максимович [260] понимал различные карбонатные натечные образования: сталактиты, сталагмиты, колонны, покровы и пр. Так как над большей частью пещеры туюнская карбонатная пачка не сохранилась, а обломков крупноглыбового горизонта недостаточно, чтобы насытить инфильтрационные воды карбонатом кальция, в Кунгурской пещере они развиты слабо.

Корочки кальцита образуются при испарении пленочных растворов на поверхности пористых ангидритов и гипсов (гроты Атлантида, Великан, Грязный, Длинный, Дорофеева). Обычно они тонкозернистые, местами — мелкозернистые, светло-серые или снаружи коричневато-кремовые, внутри — молочно-белые с тонкозернистой сахаровидной структурой. Состоят из кальцита с незначительной примесью гипса. Толщина корочек колеблется от 2—3 до 5 мм. Спектральный анализ показал постоянное присутствие в них Sr. В разных количествах присутствуют также Mg, Al, Fe,

Mn, связанные с глинисто-доломитовыми частицами и придающие кристаллам серую или коричневую окраску. За гротом Грязный обнаружены сталактиты длиной до 5 см.

**Техногенные натёки.** При оборудовании туристских маршрутов в пещеру привнесено большое количество аллохтонного материала (песок, щебень, цемент и пр. [24]), что вызвало формирование специфических минеральных образований. В октябре 1975 г. в гротах Атлантида, Длинный, Романтиков, Хлебниковых проводились работы по ремонту каменной кладки. В тех местах, где по ней стекала вода, уже в ноябре на выступах цемента появились белые трубчатые тонкостенные сталактиты-соломки длиной до 10 см. В апреле 1981 г. в проходе Длинный — Великан на стене ограждения обнаружены кальцитовые трубочки длиной 7—10 см и толщиной до 4 мм, а на бетонной тропе появились высыпки кальцита, после высыхания обращающиеся в белый порошок, в котором под биноклем видны ромбоэдрические кристаллы кальцита. В декабре 1985 г. в проходе между гротами Грозный и Смелых из цемента каменной кладки вырос сталактит-трубочка длиной 30 см.

**Субаквальные отложения.** Для Кунгурской пещеры характерна кальцитовая пленка, образующаяся на поверхности воды озер. Первые ее описания дал Е. П. Дорощев [108, 110], а затем Г. А. Максимович [265], К. А. Горбунова и др. [80].

По Е. П. Дорощеву [108], пленки образуются на поверхности всех озер пещеры. Позднее [110] он привел карту пещеры по состоянию на март 1968 г. Озера в гротах Великан, Вышка, Грязный (юг), Длинный (север), Космический, Перепутье были покрыты сплошной кальцитовой пленкой, в озерах гротов Близнецы, Географов, Геологов, Длинный (восток, юг), Дружбы Народов, Мокрая Кочка наблюдались пятна пленки.

В рабочем журнале Е. П. Дорощева приведены данные о наличии и характере пленок на разных озерах Кунгурской пещеры за 1978—1987 гг. — более 800 наблюдений. Для статистической обработки был формализован материал [347]. Выделены восемь ситуаций: тонкий налет, забереги, корочка, единичные тонкие пятна, единичные толстые пятна, множество тонких пятен, множество толстых пятен, пленка отсутствует. Затем эти данные были "свернуты" в аналитическую таблицу 13.7. В 40 % случаев пленка на озерах отсутствует, чаще других встречаются тонкие налеты и мутные корочки (по 15 %), реже — различные пятна (6—7 %), изредка встречаются забереги (2 %).

Распределение кальцитовых пленок по сезонам различается слабо: больше всего их весной и осенью (75 %), меньше — зимой (60 %), еще меньше — летом (55 %). Встречаемость пленок разных видов примерно одинакова. Чаще других весной и осенью встречается корочка (20 %).

Кальцитовая пленка встречается почти во всех озерах Кунгурской пещеры. Ее *тонкий налет* чаще других отмечен в озерах гротов Атлантида и Дружбы Народов (25 % случаев, в остальных гротах — 13—20 %); реже всего она встречается в гроте Романтиков и отсутствует — в гроте Вышка. *Забереги* во всех гротах редки (2—3 %) или вообще отсутствуют (озера в гротах Вышка, Лукина, Длинный). *Корочка* чаще всего встречается в гротах Вышка (46 %) и Великан (23 %), реже (11—20 %) — в гротах Атлантида, Геологов, Романтиков, Лукина. *Единичные тонкие пят-*

Таблица 13.7

## Распределение кальцитовых пленок по гротам, %

Вид пленки	Атлантида	Великан	Геологов	Длинный, озеро		
				северное	восточное	южное
Тонкий налет	24	7	20	15	13	14
Забереги	2	2	2	3	3	0
Корочка	15	23	20	9	11	8
Единичные тонкие пятна	9	7	18	8	10	10
Единичные толстые пятна	11	11	6	3	2	0
Множество тонких пятен	7	12	4	5	10	6
Множество толстых пятен	3	13	3	0	0	0
Пленка отсутствует	29	25	27	57	51	62
<i>CV</i>	0,75	0,71	0,81	0,81	0,73	1,04
$t_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	3,5	4,2	3,2	3,7	3,7	3,7
$t_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	3,4	2,5	3,5	3,8	3,8	3,8
$r, \%$	97	98	93	—	—	—
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	—	—	—	—	2044—2295	—

Вид пленки	Дружбы Народов	Романтиков	Колизей	Лукина	Вышка
Тонкий налет	24	7	15	13	0
Забереги	3	4	3	0	0
Корочка	3	13	4	20	46
Единичные тонкие пятна	11	9	15	0	0
Единичные толстые пятна	15	8	1	13	20
Множество тонких пятен	14	12	5	0	7
Множество толстых пятен	15	12	1	41	20
Пленка отсутствует	15	35	56	13	7
<i>CV</i>	0,51	0,35	0,98	1,10	1,29
$t_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	5,2	—	3,9	—	—
$t_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	5,0	—	4,4	—	-0,3
$r, \%$	97	—	—	—	—
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	1866	—	—	—	—

Примечание: "—" — сведения на момент существования пленки отсутствуют.

на часты в гротах Геологов, Дружбы Народов, Колизей (11—18 %), более редки — в гротах Атлантида, Длинный, Великан, Романтиков, отсутствуют — в Лукина и Вышке. *Единичные толстые пятна* обильны в гротах Атлантида, Великан, Дружбы Народов, Вышка (11—20 %) и более редки — в гротах Геологов, Длинном (северное и восточное озера), Романтиков, Колизей; не отмечены они в Длинном (южное озеро). *Множественные тонкие пятна* преобладают в гроте Лукина (41 %); часты они в гроте Великан, Дружбы Народов, Романтиков (12—14 %), реже встречаются в остальных гротах (9—10 %), вообще отсутствуют — в гротах Лукина и Длинный. *Множественные толстые пятна* наиболее часты (12—20 %) в гротах Великан, Дружбы Народов, Романтиков, Вышка;

редки (1—3 %) — в гротах Атлантида, Геологов и Колизей; отсутствуют в озерах грота Длинный.

Таким образом, кальцитовая пленка чаще всего (50—55 % случаев) отсутствует в озерах гротов Длинный и Колизей; в гротах Дружбы Народов и Лукина она отсутствует в 13—15 % случаев, в гроте Вышка — всего в 7 %. Наибольшая вариация видов пленок ( $CV = 1,04—1,29$ ) отмечена для гротов Вышка, Лукина, Длинный (южное озеро), через которые проходит основной поток воды в паводок; наименьшая (0,35—0,51) — Дружбы Народов и Романтиков.

На мелководье в северной части грота Географов, а также на глыбах в затопляемой части пещеры Е. П. Дорофеев обнаружил скопления кальциевой пленки в виде холмиков с ямкой наверху; они появляются в тех местах, где с потолка капает вода. Под ударами капель пленка ломается и тонет, а к зоне капли стягивается новая пленка. Так возникает груда толщиной до 3—4 см, в которой капли выбивают ямку. Обломки пленки лежат на дне озер годами, постепенно покрываясь тонким слоем ила.

В образовании и сохранении пленки выявлен ряд закономерностей. Массовое образование кальцитовых пленок отмечается при осеннем подъеме карстовых вод; сначала они появляются на поверхности глубоких взаимосвязанных между собой озер, а изолированные мелководные озера дольше остаются чистыми. В последующие месяцы происходит перераспределение пленок — они исчезают с поверхности озер на пути подземного потока из грота Вышка через южную часть грота Великан в грот Длинный. В стороне от этого потока поверхность озер покрывается тонким налетом, а изолированные озера (на севере грота Великан, на юге грота Длинный) — сплошной мутной корочкой, достигающей наибольшей толщины к марту. В весенний паводок пленки исчезают почти на всех озерах (в период наводнения 1979 г. отмечено их полное исчезновение).

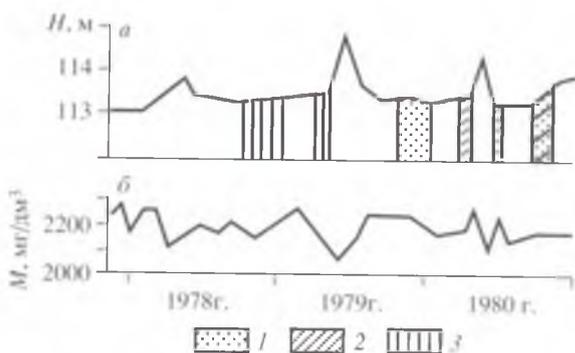
В зонах интенсивной капли менее минерализованных вод из трещин и органических труб на некоторых озерах (западнее грота Длинный, между гротами Великан и Вышка) кальцитовая пленка не образуется. После спада паводка часть пленки остается на берегах озер, являясь индикатором максимальных уровней воды.

Неравномерное распределение кальцитовых пленок, возможно, связано с различной степенью водообмена. В озерах, где движение воды отсутствует, кальцитовая пленка покрывает ее поверхность сплошным слоем (у водомерных постов в гротах Великан, Длинный); в озерах с круговым движением воды (в гротах Атлантида, Длинный южное и северное, Дружбы Народов, Колизей, Романтиков) кальцитовая пленка плавает отдельными пятнами, не срастаясь в сплошной покров (во всех случаях вращение воды было правое — по часовой стрелке).

Е. П. Дорофеев [108] полагал, что кальцитовые пленки могут являться показателем изменения химического состава воды озер, смешения вод разного химического состава и температуры, испарения пересыщенной воды, отжима вод, насыщающих глыбово-глинистый слой на дне пещеры, или всплывания кристаллов, покрывающих поверхность увлажненной глины при затоплении пещеры. Статистически достоверные связи изменений видов и количества пленок с перечисленными факторами не прослеживаются. Не обнаружена связь между ними и уровнями, темпе-

Рис. 13.4. Ход уровней (а), общей минерализации (б) и образования пленки на поверхности озера в гроте Дружбы Народов в 1978—1980 гг.

Виды пленки: 1 — одиночные пятна, 2 — тонкий налет, 3 — толстый налет



ратурой и химизмом воды и для отдельных озер. Об этом свидетельствуют наблюдения, проведенные с октября 1977 г. по декабрь 1980 г. на озерах в гротах Длинный и Дружбы Народов (рис. 13.4).

Сведений о минералогическом составе пленок немного [303]. В гроте Ночь Осенняя после понижения уровня озера на высоте 3,0—3,5 м со стены отобран образец кальцитовой пленки буровато-серого цвета, сложенный тонкими пластинками размером 0,5—5,0 мм и толщиной 0,01 мм. Для кальцита характерны микрозернистая структура и пористая кружевная текстура. За счет примеси глинистого материала и частиц гипса пленка имеет буровато-коричневый цвет. В центре озера грота Великан пленка кальцитовая (100 %), микропористая (рис. 13.5), тонкозернистая с зернами не крупнее 0,01 мм. Микроскопические исследования показали, что в составе пленки присутствуют образования кальцита двух форм: кристаллы первой генерации служат "затравками" и имеют хорошо образованные грани размером 0,01 мм; кристаллы второй генерации размером не более 0,005 мм скрепляют отдельные индивиды, образуя сплошную пленку толщиной до 0,02 мм.

В прибрежной части озер для пленки характерен доломитово-кальцитовый состав с примесью ангидрита, гипса и глинисто-терригенного материала (от 10 до 30 %). Карбонатная часть состоит из тонкозернистых агрегатов с преобладанием кристаллов ромбоэдрической, тригонально-призматической и реже скаленоэдрической формы размером 0,03—0,05 мм. Гипс представлен игольчатыми и пластинчатыми зернами, ангидрит характеризуется изометричным обликом зерен размерами не более 0,01 мм и агрегатами из гипса и ангидрита, часто насыщенными глинисто-алевритовой примесью, в составе которой установлены кварц, плагиоклаз, микроклин, смектит, иллит, каолинит. По данным РСА, соотношение глины и алеврита в примеси составляет 1:4,5.

**Кристаллы автохтонных минералов.** Основным источником формирования вторичной минерализации Кунгурской пещеры служат породы ледянопещерской и неволинской пачек.

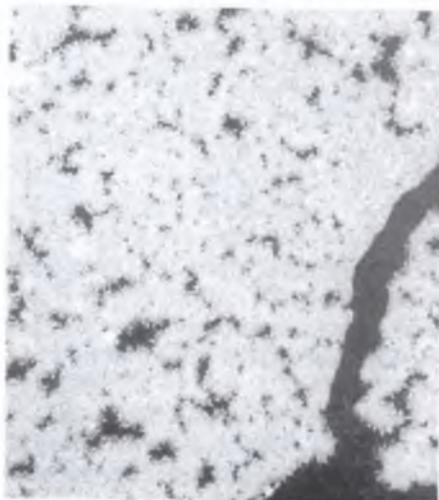


Рис. 13.5. Кальцитовая пленка на поверхности озера в гроте Великан [302]

*Ледянопещерская пачка* слагается в основном ангидритом (общая мощность 20 м), гипсом (6 м), доломитом (1,4 м). Кроме того, в ней встречаются песчаниковые и песчано-глинистые линзы [94].

Первичный минеральный состав ангидритов в приповерхностной зоне связан со сменой проницаемости пород от поверхности массива в глубину на участках дробления и повышенной трещиноватости, а также со сменой проницаемости на контактах перекрывающих и подстилающих отложений. Интенсивность процессов гидратации возрастает на участках развития карстовых форм, локализующих поверхностный и подземный стоки. Присутствие смешаннослойных минералов, кварца и ангидрита (до 30,0; 7,0; 3,0 % соответственно) при изменениях содержания гипса от 70 до 100 % формирует фоновую картину соотношения минералов.

Приведенное соотношение является общим для приповерхностных сульфатных толщ иренского горизонта кунгурского яруса, слагающих ряд карстовых районов Предуралья и связано в первую очередь с особенностями распределения тектонических трещин и состава перекрывающих отложений. Для зон дробления пород характерно присутствие доломита, гравитационно и химически перераспределенного из перекрывающих толщ.

Сульфатные породы на участках сгущения тектонических трещин характеризуются наличием смешаннослойных минералов (до 30 %), кварца (до 14 %), доломита (до 12 %) и ангидрита (до 6 %). Глинистые минералы, кварц и доломит во взвешенном и растворенном состоянии инфильтрационными водами привносятся из перекрывающих отложений и концентрируются на путях их движения в трещинах.

Приведенный выше минеральный состав сульфатных отложений характерен только для “оболочки” массива. Внутренние его части, как правило, не содержат примесей или их очень мало (до 10 %). Находящиеся здесь карстовые полости оказывают неодинаковое влияние на минеральный состав пород. Сфера влияния карстовой формы на состояние и состав пород, в которых она развита, зависит от ее морфологии и морфометрии, степени гидрогеологической активности и длительности существования в активном режиме. Эти вопросы были исследованы на участке выходной штольни, вскрывшей в 1992 г. грот Вышка ([177, 253, 344], рис. 13.6). Межтрещинные блоки характеризуются высоким содержанием ангидрита (более 80 %) и низким — гипса (менее 20 %). Влияние грота Вышка “очерчивается” радиусом 4—5 м. Здесь содержание гипса достигло 100 % по сравнению с 5—10 % в соседнем участке штольни. Глубина влияния единичной трещины составляет 1,5—2,0 м, а поверхности Ледяной горы — 7—8 м.

**Песчаник.** На переходе из грота Смелых в Грозный описана линза песчаника бурого мелкозернистого (0,1—0,2 мм) с комками глины размером до 6 см. Текстура его микрослоистая, структура псаммитовая, состав полиминеральный (состоит из зерен кварца, полевых шпатов, обломков алевролита, карбонатных, кремнистых и ожелезненных пород, зерен глауконита). Цементом является более тонкий материал аналогичного состава с примесью кальцита. По данным РСА, в его состав входят кварц, плагиоклазы, доломит, кальцит, иллит.

На контакте с линзой гипсоангидритовая порода сильно изменена и представляет собой комковатую, рассыпчатую массу бурого цвета. Обломки гипсоангидрита размером 2,0—5,5 см обволакиваются глиной, содержа-

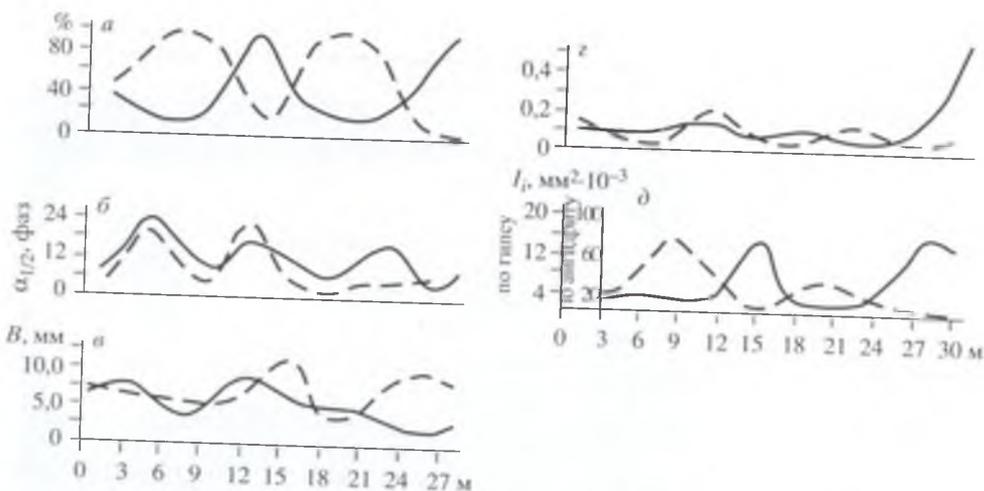


Рис. 13.6. Рентгеноструктурный анализ образцов гипса (1) и ангидрита (2) из выходящего тоннеля [344].  
 а — содержание в пробе; б — степень текстурированности; в — общий показатель деформированности; г — значения макронапряжений; д — интенсивность рассеяния импульсного луча,  $n \cdot 10^{-1} \text{ мм}^2$

щей доломитовую пыль. Часть обломков сложена известковистой глиной. В шлифе участки гипса разделяются песчанистыми и глинисто-карбонатными пелитоморфными образованиями, что придает породе брекчиевидность. Создается картина раздробления гипсовой породы, в которую по трещинам “затягивался” обломочно-карбонатный материал с угловатыми обломки кремнистых пород, кварца, полевых шпатов, измененных эффузивных пород. Цементирующий их карбонатный материал интенсивно ожежен и имеет бурю окраску. В состав терригенной примеси входят кварц, гипс, доломит, плагиоклазы, кальцит, микроклин, смектиты, иллит, каолинит.

В гроте Данте описана рыхлая буровато-серая грубодисперсная масса с псаммитовой примесью. В отраженном свете она состоит из скопления мелких зерен (от сотых долей до 5 мм), собранных в рыхлые агрегаты, связующей массой которых является кальцит. Форма отдельных зерен округлая, неправильная с неровными поверхностями. Основная их масса светло-серая, полупрозрачная со стекляннм блеском. Отмечаются единичные зерна желтого, кремового, буровато-коричневого (со смолянистым блеском) цвета. Образец содержит кварц, плагиоклаз, доломит, микроклин, гипс, смектиты, кальцит, ангидрит, иллит, хлорит.

В гроте Полярный описана рыхлая псаммитовая масса с примесью дресвы, включающая более крупные карбонатные обломки неправильной формы серо-бурого цвета. По данным РСА, она состоит из кварца, доломита, плагиоклаза, гипса, кальцита, целестина, микроклина, смектитов, каолинита, иллита.

В Коралловом гроте песчано-алевритовая масса представлена зернами кварца (45 %) и полевых шпатов (43 %). Зерна кварца имеют размер 0,1—0,2 мм, полупрозрачные, светло-серого или кремового цвета, обусловленного гидроокислами железа; зерна изометричные, хорошо окатанные, единичные — с неровной корродированной поверхностью. Зерна полевых

**Морфология и состав кристаллических отложений Кунгурской пещеры  
(встречаемость в гротах), %**

Морфология и состав	Экскурсионная часть	Заповедная часть	Морфология и состав	Экскурсионная часть	Заповедная часть
Гипс (кристаллы)	35	15	Мука гипс-доломитовая	30	10
таблитчатый	20	15	Порошок кристаллический	5	15
игольчатый	15	50	Селенит	40	40
нитевидный	10	—	Марьино стекло	5	15
спутанно-волоконистый	5	—	Целестин	5	—
корочки	25	25	Мирабилит	10	—
ежи	10	10	Экссудаты	5	—
конкреции	30	10			

шпатов (плагиоклаз, реже микроклин) имеют размер 0,2—0,3 мм, белые или светло-серые, таблитчатые со сглаженными ребрами. Агрегаты карбонатов и глины размером до 0,4 мм со следами выщелачивания, коричневого, желтого и красного оттенков (благодаря наличию окислов и гидроокислов железа). Встречаются единичные зерна темноцветных минералов (возможно, из эффузивов), темно-серые с зеленоватым оттенком, изометричные, с неровной поверхностью.

*Неволинская пачка* представлена доломитами серыми, темно- и желтовато-серыми (14 м), в верхней части обычно тонкослоистыми, в нижней — органогенно-оолитовыми с ядрами крупных брахиопод. В них встречаются прослои темно-серой глины и слой гипса. Карстовый процесс сопровождается глубоким геохимическим преобразованием пород, промежуточными и конечными продуктами которого являются глубоко измененные породы, остаточные продукты их выщелачивания, вторичные минеральные новообразования.

Вторичные минералы в коренных отложениях. В составе коренных отложений, вмещающих полости Кунгурской пещеры, находятся сульфатные (ангидрит, гипс) и карбонатные (доломит, известняк) породы. Это определяет богатство их вторичных минеральных образований (селенит, марьино стекло, отдельные кристаллы, корочки, россыпи кристаллов гипса и пр.). Морфология отложений, их состав и распределение по гротам приведены в табл. 13.8. Кристаллическими формами более богата экскурсионная часть (15 видов), бедна — заповедная (10). В последней большинство кристаллических форм встречается реже, чем в экскурсионной. Исключение составляют игольчатые кристаллы гипса, марьино стекло и кристаллический порошок.

*Селенит.* Прослои селенита толщиной до 2—5 см встречаются на контактах пластов частично гидратированных ангидритов и доломита в гротах Атлантида, Близнецы, Вышка, Вышка II, Грозный, Западный, Космический, Крестовый, Первый, Переслегина, Полярный, Смелых, Хрустальный (рис. 13.7). Их формирование происходило в твердой среде, на участках, где давление окружающих пород было меньше критического. Гидратация вызывала увеличение объема исходного вещества, сопровождающееся пластическими деформациями, расслоением, образованием трещин. Вторич-



Рис. 13.7. Белый селенит на доломите (ход Хрустальный)

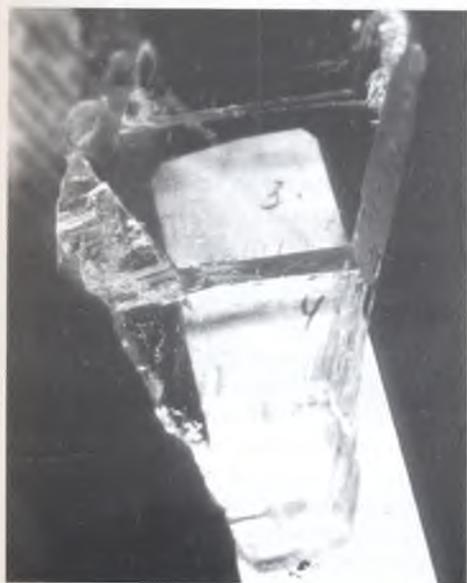


Рис. 13.8. Прозрачный кристалл таблитчатого гипса (ход Хрустальный)

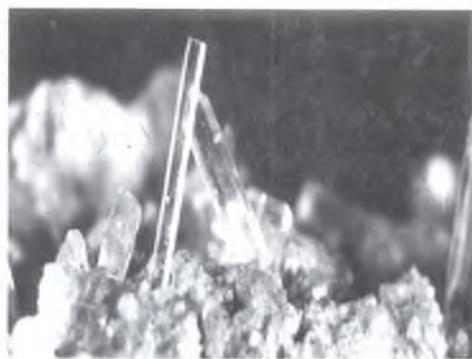


Рис. 13.9. Столбчатые кристаллы гипса в гроте Географов

ные таблитчатые кристаллы росли, отодвигая посторонние включения на периферию.

*Пластинчатый гипс* (“марьино стекло”). В гротах Бриллиантовый, Вышка II, Полярный, Хрустальный в пустотах выщелачивания среди доломитовых прослоев в ангидритах встречаются включения пластинчатого гипса размером до 2 см. Отдельные кристаллы достигают 30 см в длину. Цвет белый, розовый, зеленоватый, серый. Некоторые кристаллы представляют собой чистый оптический гипс (рис. 13.8).

Кристаллы гипса. Столбчатые кристаллы встречены в гротах Бирюзового озера, Близнецы, Географов (рис. 13.9), Грозный, Перепутье, Переслегина, Вышка II, Великан, Романтиков. Их длина достигает 3 см, толщина 0,2 см. Чаше встречаются плоские иглы с прямоугольной вершиной. Они обычно нарастают друзами на корочках перекристаллизованного гипса. Конкреции со щетками игл длиной в 0,5 см найдены в гротах Бирюзового озера, Длинный, Великан, Вышка, Колизей, Ночь Осенняя, Руины, Смелых, Тернистый Путь.

В гроте Смелых описан нитевидный кристалл диаметром 0,1 мм, а в Грозном — спутанно-волокнистое гипсовое образование. В гроте Колизей обнаружены чешуйчатые кристаллы светло-коричневого цвета; в гротах Вышка, Космический, ходе Хрустальном — шестоватые кристаллы длиной 2—4 см, белые, полупрозрачные. В гротах Колизей, Великан и в ряде ходов часто встречаются светло-коричневые двойниковые кристаллы, иногда образующие сплошной слой (рис. 13.10). Кристаллизация пластинок гипса произошла из сульфатных растворов, пропитывающих глину. В гроте Колизей, в ходах к западу от грота Смелых и к юго-западу от грота Грязного в глине обнаружены светло-коричневые дендриты, имеющие размеры до 10 см в поперечнике. Наблюдаются случаи взламывания глинистой корочки растущими кристаллами. Во влажную глину, заполняющую трещины или осевшую на обломках ангидрита и гипса, прорастают пучки полупрозрачных кристаллов, образующие **коры** толщиной до 3 см. Некоторые трещины, заполненные в прошлом глиной, полностью “залечены” вторичными кристаллами гипса.

Кристаллизация гипса при испарении пленочных растворов на гипсово-ангидритовом основании приводит к образованию “гипсовых ежей” — радиально-лучистых агрегатов гипса из множества разноориентированных иглолочек (рис. 13.11). Гипс пластинчатый, игольчатый, мелкозернистый; размеры зерен изменяются от долей до 2 мм. Текстура в центре образования беспорядочная, по краям — радиально-лучистая, пористая (размеры пор между зернами до 2 мм). Е. П. Дорофеев обнаружил такие гипсовые образования на стене между гротами Крестовый и Руины, а также в гроте Хрустальный.

В местах падения капель (грот Географов, проход между гротами Крестовым и Руины и др.) на глыбах образуются валики из мелких пластинок гипса, а в глине — гипсовые “розы” (рис. 13.12) и дендриты из полупрозрачных кристаллов (грот Колизей). Выступающие плоские заостренные вершины кристаллов располагаются концентрически, как лепестки роз; в дендритовых сростках они похожи на чешую рыб. На выступах стен органической трубы в проходе между гротами Крестовый и Руины, в местах, где разбиваются капли воды, обнаружены сферолитовые образования диаметром

Рис. 13.10. Двойниковые кристаллы гипса под слоем глины в гроте Колизей



Рис. 13.11. "Гипсовые розы" в гроте Шапка Мономаха

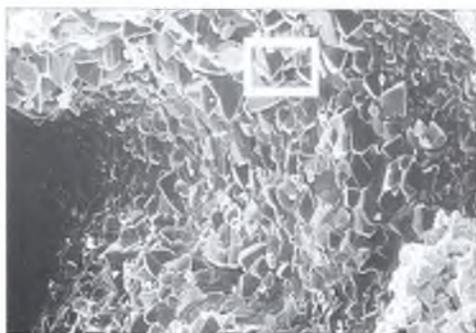


Рис. 13.12. Рельефные зерна целестина (электронная микрофотография [303])

4—5 мм, сложенные радиально вытянутыми белыми шестоватыми кристаллами гипса.

В гротах Бирюзового озера, Вышка, Геологов, Грозный, Грязный, Метеорный, Смелых, поверхность стен местами покрыта кристаллической корой из мелких (0,05 см) кристаллов. В трещинах в коре встречаются призматические удлиненные и прозрачные игольчатые кристаллы гипса длиной до 3 см и толщиной до 0,2 см. В трещинах на стенках грота Грозный обнаружены коры из полупрозрачных гипсовых кристаллов. Длинные оси кристаллов ориентированы перпендикулярно к поверхности коры, на которой выступают острые вершины. Над корой поднимаются гипсовые кораллиты высотой до 4 см, образованные агрегатами кристаллов с округленными вершинами. В изломе обнаруживается характерное двойниковое срастание кристаллов.

Кристаллические отложения Кунгурской пещеры загрязнены пелитовыми частицами, поступающими по трещинам из вышележащей толщи, а также с поверхности при инфильтрации атмосферных осадков. По данным РСА, в их составе находятся кварц, плагиоклазы, микроклин, доломит, кальцит, гипс, ангидрит, смектиты, иллит, хлорит, каолинит и другие более редкие минералы (аллофан, целестин и флюорит).

**Мука.** В Кунгурской пещере подобные образования имеют разный минералогический состав. В гротах Бриллиантовый, Западный, Полярный, Скульптурный встречена серовато-белая гипсовая мука. В гроте Грязный содержащиеся в сульфатных породах карбонатные примеси накапливаются в углублениях и трещинах в виде белой доломитовой муки.

**Россыпи кристаллов.** В гроте Великан и у грота Грязного в основании коренных стен и глыб встречаются россыпи кристаллов ангидрита мощностью до 1 см, состоящие из отпрепарированных при растворении серых зерен, иногда испытывавших вторичную перекристаллизацию. К западу от грота Вышка на полу хода обнаружены блестящие россыпи шестоватых кристаллов селенита.

**Дендриты оксидов и гидроксидов.** В гротах Вышка, Крестовый и др. по трещинам в гипсах обнаружен бурый налет глинистого состава, обогащенный гидроксидами железа, а среди доломитовых прослоев — дендриты оксидов марганца и оолитовые стяжения из гидроксидов железа.

**Вторичные минералы осыпей.** Отложения осыпей формируются под влиянием гравитационных процессов, механического и химического воздействия капающей воды на обломочный материал; физико-химического выветривания обломочного материала; кристаллизации новообразований на поверхности обломков, в пустотах и в кавернах; заполнения каверн глинистым и другим материалом. В результате в осыпях формируются окатыши, стяжения, конкреции, секреции.

**Окатыши** возникают на осыпях под органическими трубами под воздействием капающей воды (гроты Крестовый, Эфирный). Их состав доломитовый или известковый с пелитоморфной или микрозернистой структурой, размеры менее 5 см, округлой или неправильной формы со сглаженными поверхностями и пористо-кавернозной текстурой. Под влиянием эффекта слипания глинистых частиц, насыщенных доломитовой “мукой” или кальцитом, некоторые окатыши образуют непрочные стяжения. В промежут-

ках между слипшимися окатышами иногда отлагаются пластинчатые кристаллы гипса.

Пустоты пор и каверн окатышей, расположенных в верхней зоне осыпей, заполнены глинистым материалом, иногда с примесью гидроокислов железа и терригенного материала в виде единичных окатанных и полуокатанных зерен кварца размером 0,01—0,05 мм. По мере смещения окатышей вниз по осыпи из зоны капли в менее влажные зоны в полостях начинается процесс кристаллизации кальцита (рис. 13.12), гипса, реже — целестина (рис. 13.13).

*Стяжения* [202]. На поверхности осыпей в гротах Грозный, Крестовый, Морское Дно наблюдаются новообразования, формирующиеся при “слипании” мелких обломков коренных пород размером 2—12 мм. Роль цемента выполняют карбонатно-глинистый материал, гипс, реже — кальцит. Обломки состоят из ангидрита, доломита, известняка, комочков глины. При исследовании под микроскопом установлено, что обломки доломита и известняков чаще всего характеризуются оолитовой структурой. Строение ооидов однородное или зональное. Зональность обусловлена чередованием пелитоморфных и мелкозернистых концентрически расположенных слоев карбонатного материала. Центральная часть ооидов иногда пустая.

*Секрещии*. В гроте Крестовый Е. П. Дорофеев обнаружил желвакообразную кальцитовую секрещию неправильной формы размером 21×32 мм, а в ней новообразование целестина ( $\text{SrSO}_4$ ). Ранее возможность нахождения целестина в отложениях Кунгурской пещеры только предполагалась [299]. Структура секрещии меняется от мелко-зернистой до пелитоморфной, текстура пористо-кавернозная (размеры пустот 0,3—2,5 мм), комковатая, участками брекчиевидная. Секрещия представляет собой брекчию, сложенную несколькими окатышами коренных пород, сцементированных новообразованиями мелко- и микрозернистого кальцита. На это указывают пелитоморфные структуры отдельных комочков в центральной части, на периферии постепенно переходящие в микрозернистый кальцит с размерами зерен 0,005—0,010 мм. На фоне кальцита четко выделяются неправильные агрегаты, вероятно, заполнившие часть пористо-кавернозного пространства (до 30 %), представленные кристаллами целестина столбчатой, короткопризматической или, реже, неправильной формы размером 0,2—0,4 мм (см. рис. 13.12). Выделения целестина в форме новообразований установлены еще в четырех гротах Кунгурской пещеры.

**Минералы гротов со льдом.** Археолог И. С. Поляков [351] первым обратил внимание на мелкие гипсовые кристаллы, покрывающие поверхность льда Кунгурской пещеры. Кристаллограф Е. С. Федоров [403] связал их возникновение с таянием или испарением льда.

Россыпи кристаллов гипса с примесью кальцита на поверхности льда, вероятно, возникают в условиях режеляции. Кристаллизация начинается одновременно с замерзанием воды сульфатно-кальциевого состава. При нулевой температуре растворимость гипса резко падает, и часть сульфатов из раствора переходит в твердое состояние. Дальнейший рост кристаллов происходит в результате испарения льда.

На поверхности льда в гроте Полярный, в проходах между гротами Бриллиантовый, Данте и Полярный наблюдались россыпи в виде мучнис-

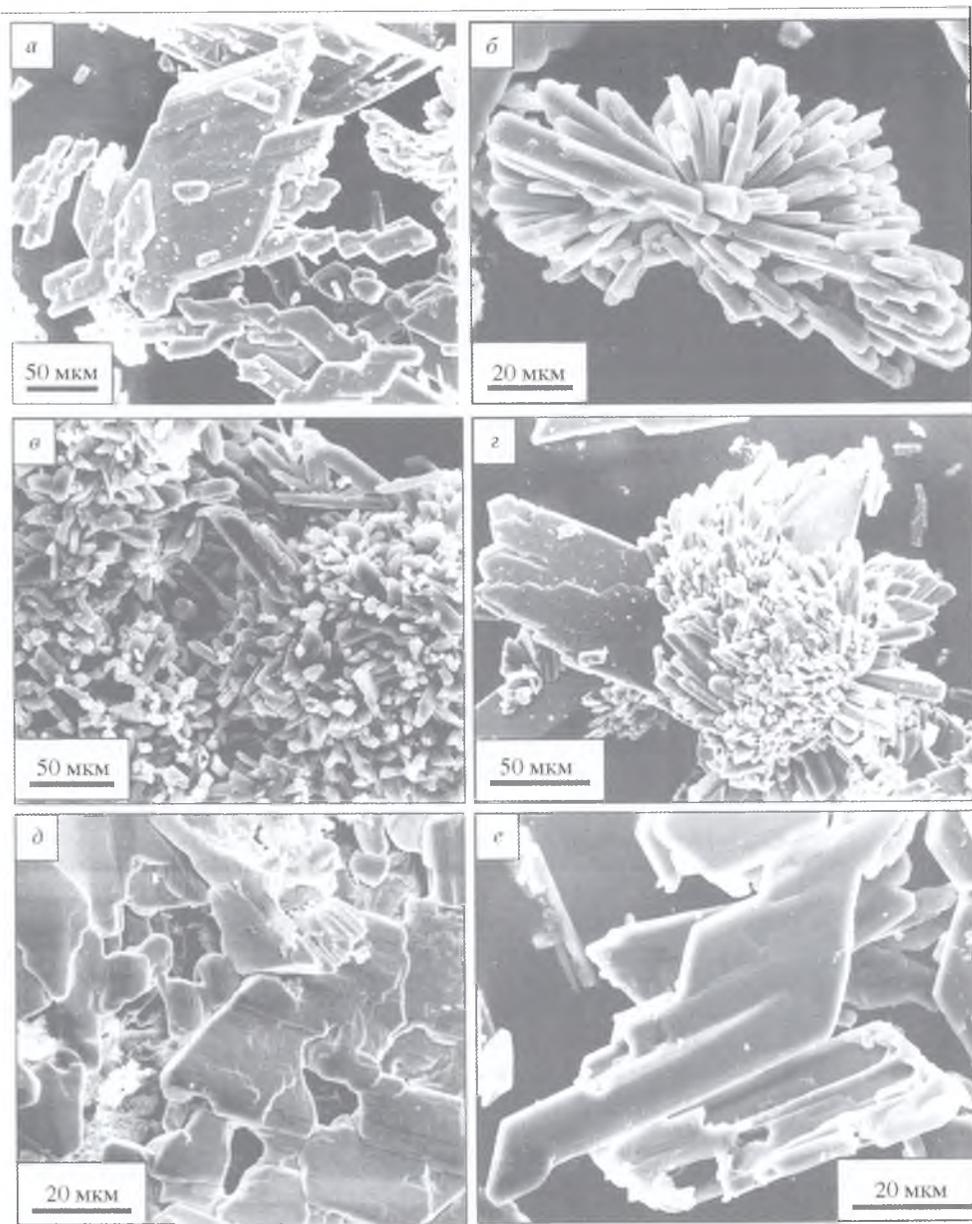


Рис. 13.13. Морфология кристаллических агрегатов криогенного гипса [23].  
*a* — сростки уплощенных кристаллов (I тип); *б, в* — расщепленные формы кристаллов; *г* — агрегат призматических кристаллов (II тип); *д* — футляровидные кристаллы; *е* — индукционная поверхность грани {010}

той массы или в форме хлопьевидных образований [16]. Для них характерна мелкокомковатая текстура; комочки легко распадаются и в некоторых случаях дают реакцию с соляной кислотой. В осадке остаются иголки и ромбические таблички гипса (типа “лезвие бритвы”) размерами 0,01—0,13 мм по длинной оси, шириной 0,03 мм при толщине в тысячные доли миллиметра. В некоторых случаях скопление иголок наблюдается в форме звездчатых агрегатов. Кальцит и доломит с примесью тонкозернистого кварца образуют сгустки округлой или неправильной формы размером 0,5—1,0 мм. Некоторые из них окрашены в темно-серый (примесь органики в виде волокон, напоминающих углистое вещество), другие — в слабобоксеровый цвет (пленки из гидроокислов железа).

Перед гротом Вышка обнаружены рыхлые конкреции белого цвета, похожие на россыпь гороха с поперечником около 0,5 см. Некоторые из них имеют спутанно-волокнистое строение. В углублениях тающего льда у входа в грот Грозный найдены хрупкие сферолиты с выступающими концами игольчатых кристаллов (“гипсовые ежи”). Первоначальные кристаллы с размерами около 0,10 мм в полувлажном состоянии перекристаллизовались в лучи — иглы, веером расходящиеся от центров сферолитов, имеющих поперечник до 2 см. В гроте Руины сделана редкая находка — на упавшей глыбе гипса вдоль “залеченной” трещины цепочкой расположились гипсовые конкреции, опущенные белыми радиально вытянутыми тонкими иглами длиной 1 см.

При таянии льда остается “лунное молоко” — белая полужидкая масса, состоящая в основном из кристаллов гипса, иногда кальцита с примесью частичек ангидрита, доломита, кварца, поступившей с капающей водой. При таянии сезонного льда полужидкая масса высыхает, превращаясь в “гипсовую муку” — рыхлые образования из микрокристаллов. Такие отложения установлены на полу гротов Крестовый, Руины, Скульптурный. При испарении зимой ледяных сталагмитов на полу гротов также остается “гипсовая мука”.

“Гипсовая мука” под наледью между гротами Бриллиантовый и Полярный была подвергнута детальному минералогическому изучению [23]. Толщина ее слоя на ледяной поверхности сталактитов, сталагмитов и кор — менее 1 мм [16], увеличиваясь в нишах испарения и у основания наледей до 5,0 см и более.

Морфология кристаллов гипса и кальцита изучена при помощи электронного сканирующего микроскопа JSM-35С. Диагностика минералов подтверждена РСА. Кристаллы гипса образованы тремя простыми формами — основными: пинакоидом {010}, ромбическими призмами {120}, {−111}, и второстепенными: {011}, {−103}(?) (рис. 13.13). Выявленные кристаллографические формы типичны для кристаллов гипса различного генезиса [456]. В то же время характер и морфология агрегатов, а также микрорельеф граней кристаллов имеют специфические особенности, позволяющие судить об условиях и механизмах роста криогенного гипса.

В муке обнаружены два типа агрегатов гипса. Первый — параллельные и двойниковые сростки уплощенных по {010}, относительно крупных кристаллов размером до 300—400 мкм, толщиной первые десятки мкм (см. рис. 13.13, а). Их форма указывает на кристаллизацию в среде с плоскостной симметрией, вероятно, в капиллярной пленке раствора. Часто грани

пинакоида  $\{010\}$  расщепляются с образованием сферолитов (см. рис. 13.13, б, г). Второй тип образован агрегатами размером 50—100 мкм и представлен щетками (корами) призматических кристаллов с элементами сферолитового роста и геометрического отбора (см. рис. 13.13, в). Удлинение кристаллов первого типа обычно параллельно поверхности намораживания, второго — субперпендикулярно.

На кристаллах гипса широко развиты проявления скелетного роста (рис. 13.13, е), характерны также кривогранные поверхности и ребра. Нередко кристаллы агрегатов первого типа имеют асимметричное строение: одна из граней пинакоида  $\{010\}$  имеет гладкую ровную поверхность, другая — индукционную поверхность с округлыми торцами (ступенями) слоев роста (см. рис. 13.13, д). Индукционные поверхности такого типа свойственны синхронному росту пар: дисперсный поликристаллический агрегат (сферолит, мелко-зернистый агрегат) — монокристалл [150]. На взаимосвязанное образование кристаллов гипса и льда может указывать обилие пустот в скелетных, фульгаровидных кристаллах гипса (см. рис. 13.13, е), оставшихся от включений кристаллов льда.

Грани призматического пояса гипса имеют гладкую поверхность, тогда как поверхность граней ромбической призмы  $\{111\}$  неровная, бугристая. Характер агрегатов гипса указывает на кинетический режим роста кристаллов и их кристаллизацию из существенно пересыщенного раствора. Появление расщепленных форм гипса может быть также связано с примесью натрия и обусловлено автодеформационным механизмом расщепления [199, 359].

Наблюдения за механизмом формирования подземных наледей и морфологические признаки кристаллических агрегатов гипсовой муки позволяют предложить схему формирования этого оригинального типа пещерных новообразований. На стадии просачивания атмосферных вод слабоминерализованные (менее 300—500 мг/дм<sup>3</sup>) агрессивные воды интенсивно растворяют сульфатные породы, насыщаясь при этом до 800—1500 мг/дм<sup>3</sup> и приобретая СК гидрохимический тип. Несмотря на высокую минерализацию, инфильтрационные воды остаются ненасыщенными по отношению к гипсу. В привходовой части пещеры они охлаждаются и, замерзая слой за слоем, наращивают толщину пещерных наледей.

Замерзание воды из-за высокого содержания растворенных солей происходит постепенно. Процесс кристаллизации льда сопровождается переохлаждением жидкой фазы и повышением концентрации солей в остаточном растворе. В нем и происходит кристаллизация гипса, а затем и кальция (рис. 13.14). При кристаллизации последнего, возможно, важную роль играет дегазация раствора, уменьшающая его карбонатную емкость. Под действием воздушных потоков лед испаряется, а кристаллы гипса остаются на его поверхности в виде мучнистого порошка. В процессе замерзания сульфатных кальциевых вод из остаточных растворов кристаллизуются гипс и кальцит (крио кристаллизационная стадия).

Освобождение минеральных частиц из льда и их накопление происходят при таянии и испарении подземных льдов. Таяние сезонных пещерных льдов наиболее активно в весеннее время. В это время ледяные сталактиты и сталагмиты часто “белеют”, становятся слабопрозрачными. В зоне сезонного оледенения к лету на месте растаявшего ледяного сталагмита ос-

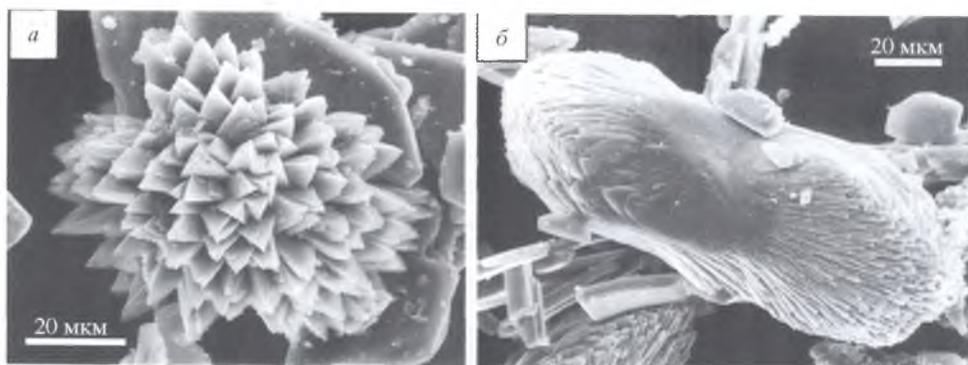


Рис. 13.14. Расщепленные формы криогенного кальцита, представленные острым ромбоэдром {04—41} [23].

*a* — сферолит, *б* — сноповидный кристалл

тается только светлое мучнистое пятно, быстро растворяемое атмосферной влагой или после высыхания развеваемое воздушными потоками. В случае многолетних льдов мучнистый порошок наиболее активно выступает на поверхности льда в зимнее время, в период их интенсивного испарения. В это же время происходит накопление муки и образование мучнистых отложений у основания наледей в зоне сезонного оледенения.

**Аэрозольные образования.** В гротах с повышенной концентрацией аэрозольных частиц происходит накопление специфических образований. Высокие концентрации аэрозолей характерны для более холодных частей гротов, причем отмечаются значительные колебания их значений (от 0 до 40 %). В их составе преобладают сажистые частицы диаметром до 1 мкм. Предполагается [22, 337 др.], что аэрозоли могут формироваться при отрыве мельчайших частиц породы от потолка и стенок с отрицательным уклоном, но количество их таково, что в течение года может образоваться слой толщиной 2 мкм.

К аэрозольным образованиям относится *гипсовый мох* — сезонные новообразования тонкоигольчатых и волокнистых кристаллов длиной 1,5—4,5 см и диаметром около 0,01 мм, ориентированных под углами 70—85° относительно потолка. Кристаллы очень хрупкие, разрушаются в течение 1—2 ч. Изучение под микроскопом и РСА показали, что в состав кристаллов входят гипс (87 %), доломит (11 %), ангидрит (2 %). Новообразования такого типа могли кристаллизироваться в случае насыщения пещерных аэрозолей катионами кальция и сульфат-ионами, которые при резком похолодании могли образовать твердую фазу. Гипсовый мох формируется только в туниковой части грота Полярный, там, где длительное время сохраняются низкие температуры и отсутствует сильное движение воздуха.

В марте 1998 г. был проведен повторный отбор проб волокнистых кристаллов из грота Полярный, которые в герметично закрытых сосудах были доставлены в лабораторию. При их исследовании в иммерсионной жидкости установлено, что показатель преломления кристаллов значительно ниже 1,541; в скрещенных николях минерал изотропен, а его параметры значительно отличаются от параметров гипса. Методом РСА волокна минерала идентифицированы как тенардит ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Однако тенардит сформироваться в ус-



Рис. 13.15. Кристаллы мирабилита из Кунгурской пещеры [303]

ловиях Кунгурской пещеры не может, так как он возникает при кристаллизации из чистых водных растворов при температуре выше 32,4 °С (в гроте Полярный температура не превышает +0,2 °С). Поэтому следует предположить, что первоначальный состав волокнистых новообразований был мирабилитовый (рис. 13.15).

*Мирабилит* ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) образуется в виде призматических кристаллов моноклинной сингонии, вытянутых по [010] или [001], бесцветный, прозрачный или мутно-белый. Твердость 1,5—2,0, очень хрупкий. Оптические свойства: двухосный, отрицательный;  $N_g = 1,398$ ,  $N_m = 1,396$ ,  $N_p = 1,394$ ,  $N_g - N_p = 0,004$ . Хорошо растворяется в воде, соленый на вкус. В зимний период рассол становится пересыщенным и из него выделяется мирабилит, часть которого с повышением температуры, теряя воду, переходит в тенардит. При этом волокнистые кристаллы превращаются в мучнистую пыль, отдельные кристаллы которой под микроскопом имеют игольчатую форму и оптические константы, характерные для тенардита.

Находки мирабилита в гроте Полярный являются показателем присутствия в пещере высоко насыщенных растворов СН типа [452].

В гроте Смелых, в нишах, изолированных от потоков воздуха, обнаружены прозрачные нити длиной до 7 см и толщиной 0,1—0,2 мм. В комнатных условиях они через 1—2 мин рассыпаются в белый порошок. Здесь же встречены экссудаты — белые шарики, образующие на стенах и глине на полу скопления, похожие на горох или пшено. Они прикрепляются к сводам, растут на поверхности сухих глинистых отложений. Под бинокляром просматривается его спутанно-волокнистая структура. Возможно, нити и экссудаты появились в результате конденсации аэрозолей или их создают сульфатредуцирующие бактерии.

Кунгурская пещера известна более 300 лет и знаменита в основном своими ледяными образованиями. Однако, как выяснилось в последние десятилетия, из нее описаны и другие минеральные образования. По условиям минералообразования пещера разделяется на внешнюю, переходную и внутреннюю части с разными микроклиматом (температура, влажность, давление, движение воздуха) и обводненностью (рис. 13.16). Привходная часть пещеры холодная. Здесь круглый год сохраняется лед. Влажность воздуха достигает 100 %. Дальняя часть отличается постоянной положительной температурой (около 5 °С), высокой влажностью воздуха (90—100 %), наличием капли и многочисленных озер. Между внешней и внутренними частями расположена переходная зона, границы которой смещаются во времени.

Минерализующими растворами в пещере являются инфильтрационные и конденсационные воды, питающие капель; трещинные и карстовые воды ангидритов, гипсов и карстово-обвальных отложений, поровые воды мел-

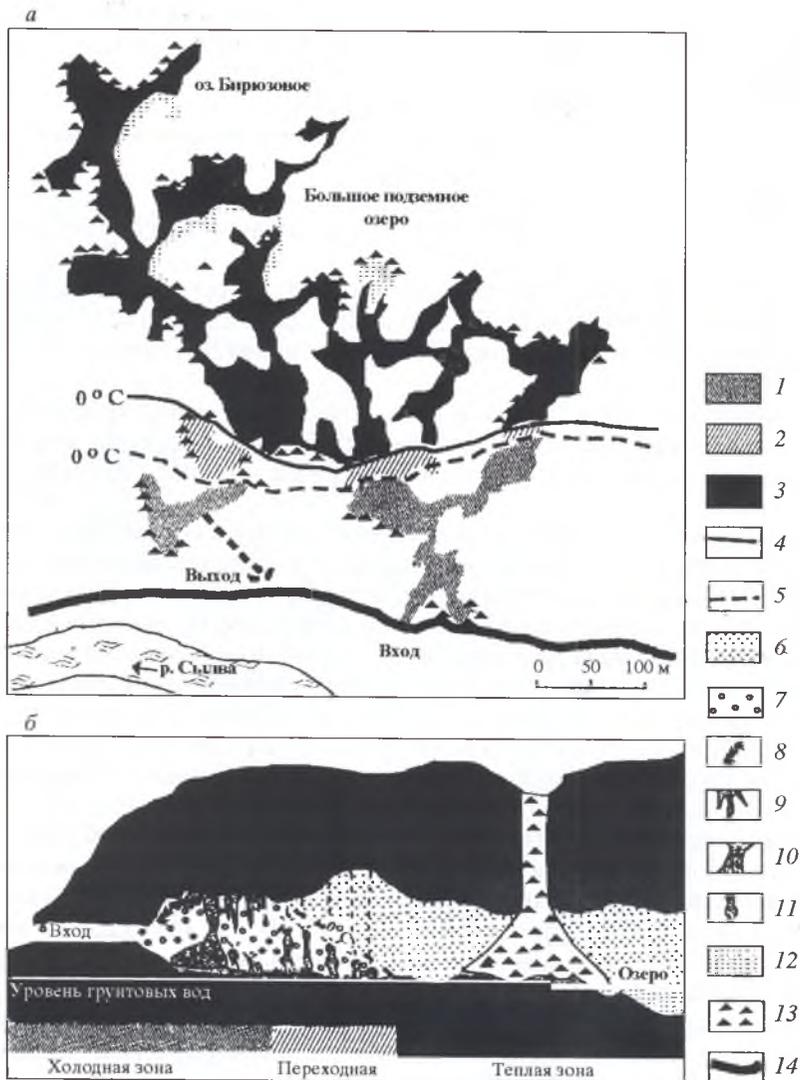


Рис. 13.16. Распределение температурных зон в Кунгурской пещере [459].

*а* — схематический план, *б* — разрез; зоны: 1 — холодная, 2 — промежуточная, 3 — теплая; изотермы: 4 — 0° на полу пещеры, 5 — 0° у свода пещеры; воздух: 6 — теплый, 7 — холодный; формы льда: 8 — изморозь, 9 — ледяные сталактиты, 10 — многолетние льды, 11 — ледяные сталагмиты; 12 — подземные озера; 13 — обвалы в пещере; 14 — подножие Ледяной горы

кодисперсных отложений. Минерализация воды от 50 до 2300 мг/дм<sup>3</sup> и преимущественно ГК и СК состав. Преобладают слабощелочные воды с рН более 7. Состав подземных вод определяет два типа минерализации в пещере: карбонатный и сульфатный [93]. К. А. Горбунова [93] (по состоянию на 1995 г.) приводит для Кунгурской пещеры список из 15 минералов. На начало 2004 г. по данным визуальных и микроскопических определений, химического, спектрального, рентгеноструктурного анализа (ПГУ, ЕНИ,

МГУ) из Кунгурской пещеры описано уже 30 минералов [302, 304]. Ниже приведен их список по классификации А. Г. Бетехтина [294].

**Фториды.** Флюорит (1).

**Оксиды.** Лед (2), кварц (3), пиролюзит (4).

**Гидрооксиды.** Гетит (5), гидрогетит (6), гидроокислы железа (7), псиломелан (8).

**Карбонаты.** Кальцит (9), доломит (10).

**Сульфаты.** Барит (11), целестин (12), ангидрит (13), гипс (14), тенардит (15), мирабилит (16).

**Силикаты.** Пальгорскит (17), хлорит (18), корренсит (19), глауконит (20), иллит (21), ферроиллит (22), каолинит (23), аллофан (24), монтмориллонит (25), смектит (26), сапонит (27), плагиоклаз (28), микроклин (29), ортоклаз (30).

Эти минералы встречаются в разных формах (зерна, кристаллы, микрориспаллы, мука, порошок, чешуйки, стяжения, дендриты, корочки, налеты, оолиты, пленка, сталактиты, сталагмиты, колонны, натеки, каскады, хлопья и пр.).

До последнего времени в составе отложений Кунгурской пещеры описывались в основном *аутигенные минералы* — составные компоненты коренных пород, формы их преобразования, а также новообразования, сформировавшиеся на стенках гротов под влиянием капли под органическими трубами, из отжимающихся поровых растворов и т.д. Однако в ней имеются и *аллотигенные минералы*, занесенные в пещеру из рыхлых покровных осадков при образовании карстовых провалов и речными водами в период половодья р. Сылвы. На их долю приходится не более 1 % от общего объема видов минералов, однако ассоциация минералов может указывать на область сноса.

Наиболее информативной является тяжелая фракция. В целях ее изучения была отобрана проба из рыхлых осадков грота Заозёрный. Для отмучивания использована навеска в 3 кг. После длительной отмывки осталась рассыпчатая смесь псефит-псаммит-алевритового состава весом 371,6 г, которую рассеяли на ситах с отверстиями 5,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,1 мм. В результате гранулометрического анализа получены узкие классы, где преобладающими оказались псефитовая (18,4 %), мелкопсаммитовая (31,0 %), тонкозернистая и алевритовая (29,8 %) фракции. Для выделения тяжелой фракции использовался класс мелкопсаммитового состава с размером частиц 0,25—0,1 мм. Выход составил 3,1 % данного класса крупности.

В составе тяжелой фракции установлены следующие аллотигенные минералы (в порядке убывания): эпидот, гематит, гидрогетит, магнетит и, вероятно, ильменит, а также аутигенный ангидрит. Состав тяжелой фракции рыхлых отложений Кунгурской пещеры соответствует аллювию р. Сылвы [329]. Обнаружены также единичные кремневые и яшмовые гальки. Очевидно, они попали в пещеру из перекрывающих неоген-четвертичных отложений.

В дальнейшем необходимо продолжить изучение минералов Кунгурской пещеры и привести их номенклатуру к мировым стандартам [452].

Распределение различных кристаллических образований в Кунгурской пещере приведено на рис. 13.17.



Рис. 13.17. Распределение кристаллических образований в Кунгурской пещере.  
 1 — кристаллы гипса; 2 — селенит; 3 — мука, порошок; 4 — кальцит; 5 — мирабилит; 6 — целестин

### 13.6. СНЕЖНО-ЛЕДЯНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Ледяные образования Кунгурской пещеры издавна привлекали внимание исследователей. Первым о них упомянул в 1722 г. В. И. Геннин [64]. Последующие ее описания [7, 39, 77, 184, 289, 351, 400, 402, 405, 444] свидетельствуют о том, что оледенение с этого времени не исчезало, хотя и менялось в размерах. Таким образом, достоверно известно, что оледенение в Кунгурской пещере существует более 280 лет.

В 1940—1950-е гг. XX в. большое внимание льдам Кунгурской пещеры уделил Г. А. Максимович, который описал их происхождение, предложил классификацию, изучил химический состав, составил первые инструкции по изучению пещерного льда [255—261, 270—273, 275 и др.]. Наиболее полно их описал Е. П. Дорофеев [111].

Основные условия появления и сохранения оледенения в пещерах — это наличие благоприятных соотношений температур вмещающих пород и внешнего воздуха, формы полости, запаса холода, водопритока [242, 243].

*Соотношение внешних зимних температур воздуха и температуры пород*, благоприятное для оледенения, можно получить на основе анализа математических моделей теплового режима пещер. Эти модели содержат ряд допущений, однако дают довольно близкую к реальной картину взаимодействия внешнего и пещерного температурных полей. Расчеты по ним трудоемки и требуют применения ПК.

На основании модельных расчетов выведен температурный индекс оледенения пещер ( $K$ ):

$$K = -(T_x)/(T_m - T_x), \quad (13.1)$$

где  $T_x$  — средняя температура воздуха самого холодного месяца (чаще всего января);  $T_m$  — температура вмещающих пород:  $T_m = T_0 + a$ , где  $T_0$  — средняя годовая температура воздуха на поверхности,  $a$  — добавочный член, величина которого для разных частей России меняется от 2 до 6 °С. Оледенение пещер может быть развито в тех районах, где  $K$  выше нуля; при  $K = 0,00—0,25$  — развито сезонное,  $0,25—1,00$  — сезонное и постоянное,  $> 1$  — постоянное оледенение пещер. В районе Кунгурской пещеры существуют климатические условия для развития сезонного и постоянного оледенения.

*Форма полости* определяет систему циркуляции воздуха и расположение зоны охлаждения зимним воздухом. На участках охлаждения возникают ОТА — отрицательные температурные аномалии, зоны со средней годовой температурой воздуха и пород ниже температуры вмещающих пород. Область ОТА располагается у нижней (ближней к выходу) части Кунгурской пещеры, в средней и верхней частях склона находятся трещинные выходы из пещеры, а область ПТА — положительной температурной аномалии, где средняя годовая температура воздуха и пород выше температуры карстового массива, приурочена к вертикальным стволам пещеры [220, 223].

*Запас холода* формируется при охлаждении полости зимним воздухом. Кратковременный, сезонный или многолетний запас холода ( $Q$ ) образуется согласно уравнению

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (13.2)$$

где  $Q_1$  — тепло, выносимое из пещеры; тепло, поступающее в пещеру:  $Q_2$  — с водой и воздухом,  $Q_3$  — из недр массива,  $Q_4$  — за счет фазовых переходов воды. Запас холода в пещере реализуется в виде замороженных стен, а при наличии водопритока — в виде запаса льда.

В Кунгурской пещере вынос тепла из зоны ОТА в течение зимы намного превосходит привнос тепла в нее летом из глубины полости. Ориентировочные расчеты показали, что суммы средних суточных температур воздуха в 1969 г. соответственно составляли  $-2405$  и  $+830$  °С, а в 1984 г.  $-1904$  и  $+970$  °С. Таким образом, в пещере на протяжении приблизительно 200 м от входа существует зона устойчивых отрицательных средних годовых температур воздуха. Граница постоянного оледенения проходит по изотерме  $+0,2$  °С, а сезонного — около  $+1,0$  °С.

*Водоприток* в пещеру определяет морфологию, распространение, запасы и баланс массы льда в полости. Количество воды, поступающей в пещеру, зависит от количества твердых и жидких осадков, попадающих непосредственно в полость или с подземными водами, а также от условий конденсации и сублимации водяного пара в ней.

Второстепенные условия развития и сохранения оледенения — воздействие атмосферных явлений (давление, влажность воздуха, солнечная радиация, атмосферная циркуляция воздуха), строение полости, теплофизические свойства пород, геоморфологические условия, наличие растительности — влияют на величину запасенного в ней холода [242].

Согласно современным классификациям [104, 244], в Кунгурской пещере имеются конжеляционные, сублимационные и осадочно-метаморфические льды<sup>11</sup>. Основную массу составляют конжеляционные льды (98 %), на долю сублимационных и осадочно-метаморфических приходится всего 2 %. Их распределение показано на рис. 13.18.

**Конжеляционные льды** образуются при замерзании инфильтрационных, конденсационных, карстовых вод и воды в пустотах и порах скальных пород [146, 327].

При капельных водопритоках инфильтрационных вод образуются висячие наледи: сталактиты, гребешки, каскады, занавеси, драпировки, сталагмиты, колонны и их комбинации; при струйном стекании — колонны и покровные наледи, при капельном — гребешки, сталактиты, сталагмиты, при пленочном — покровные наледи. Карстовые воды образуют покровные наледи, а воды озер — лед водоемов. При слабом переохлаждении воды могут возникнуть плавучие кристаллы льда, а у берегов — забереги; дно иногда обрастает донным льдом. Мелкие водоемы могут промерзать до дна. Вода в пустотах и порах скальных пород образует цементный лед, в трещинах — жильный, в дисперсных породах (суглинки, глины) — сегрегационный. У выхода микротрещин на границе скальной породы и воздуха образуются единичные формы стебелькового льда (антолиты, разновидность сегрегационного льда).

Для удобства описания иногда выделяют натечные, озерные, сегрегационные льды, льды-цементы и жильные льды [111, 117, 121, 123, 125 и др.].

<sup>11</sup> Г. А. Максимович [260] разделял пещерные льды на гидрогенные, атмогенные и гетерогенные.

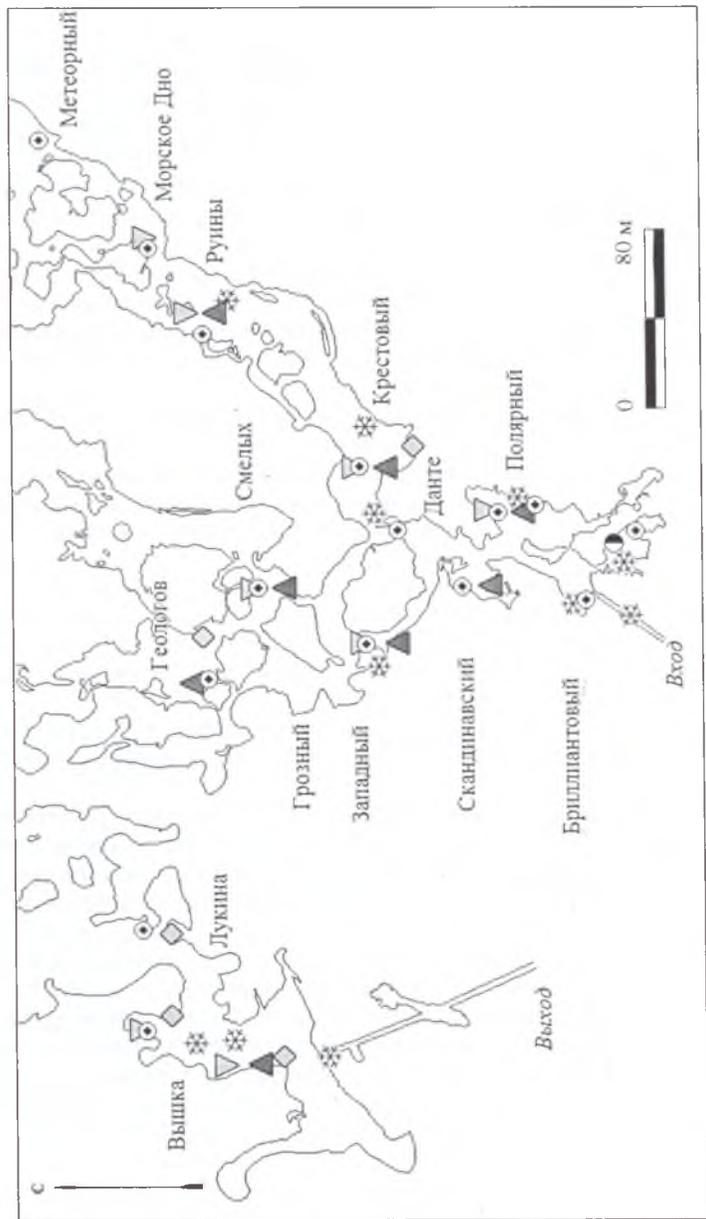


Рис. 13.18. Распределение снежно-ледяных образований в ближней части Кунгурской пещеры.

1 — сталактиты; 2 — сталактиты; 3 — покровы и коры; 4 — сублимационные кристаллы; 5 — озерный лед; 6 — офрированный снег

Натечные льды Кунгурской пещеры описаны наиболее подробно. Лед появляется в первую очередь у пола, где движется холодный тяжелый воздух. В местах капли со сводов вода уже не просачивается в грунт, а замерзает, образуя *сталагмиты*, которые в благоприятных условиях достигают 2—3 м высоты. Позднее, когда температура у сводов также опустится ниже 0 °С, начинается рост *сталактитов*. В гроте Крестовый в марте 2003 г. описан сталактит длиной 3,5 м. Срастаясь, сталактиты и сталагмиты образуют *сталагматы*, или *колонны*. Когда породы в своде промерзнут, поступление воды прекращается. Начинается испарение ледяных натеков, меняющее их форму и размеры (рис. 13.19—13.33).

Смена погоды на поверхности земли, чередование похолоданий и оттепелей влияют на форму сталагмитов. В морозы они тянутся вверх, приобретая острые верхушки; при оттепели появляются утолщения и головки. Воздушные потоки иногда вызывают неравномерное замерзание воды на сталагмитах, принимающих форму штопоров с левым или правым вращением. В местах интенсивной капли они имеют вид пирамид из прозрачных ледяных шаров (ледяной виноград). В. Н. Андрейчук [19] описал возникновение в момент оттепели или весной “бокаловидных” сталагмитов — в местах падения капель воды образуется емкость, вмещающая иногда до 1 л воды. Сухой холодный воздух подтачивает основание сталагмитов. Часто его рост сверху и испарение льда снизу происходят одновременно, пока сталагмит не падает набок под тяжестью головки.

Формы сталактитов менее разнообразны: на горизонтальных сводах и выступах образуются конусовидные сосульки, на наклонных — плоские сталактиты, флаги, гирлянды, занавеси. В местах обильного поступления и быстрого замерзания воды вырастают ветвистые сталактиты.

Для участков пещеры, имеющих разную высоту сводов и количество просачивающейся воды, характерны условия, благоприятствующие росту тех или иных образований. Поэтому в одних местах ежегодно появляются сталагмиты, в других — сталактиты, в третьих — покровные наледи и наледи в форме каскадов. С наступлением зимы зона сезонного оледенения постепенно расширяется.

Натечные ледяные образования бывают прозрачные и молочно-белые, встречаются и переходные разновидности. Даже соседние сталактиты и сталагмиты могут быть разной прозрачности. Большинство сталагмитов имеет прозрачное стекловидное ядро головки и матовую мутную периферийную часть. Прозрачность льда зависит от скорости замерзания воды, наличия во льду воздушных пузырьков, степени переохлаждения воды и связанных с ней размеров кристалликов льда. Чем меньше размеры кристаллов, тем менее прозрачен лед. Так как в Кунгурской пещере замерзает вода сравнительно высокой минерализации, его прозрачность зависит также от количества примесей (табл. 13.9).

На осыпях и полах пещеры за счет инфильтрации из трещин образуется *сезонный* (гроты Западный, Грозный, Крестовый, Руины, Вышка, Великан) и *многолетний наледный лед* (гроты Бриллиантовый, Данте, Полярный, Скандинавский, проход между гротами Горе Толстякам и Длинный) мощностью до 2 м. После наводнения 1979 г. после просачивания воды через глиняную перемычку, защищавшую вход в пещеру, мощная наледь образовалась во Входном тоннеле.



Рис. 13.19. Группа сталагмитов в гроте Крестовый

Рис. 13.20. Сталагмиты под органной трубой в гроте Крестовый



Рис. 13.21. Сталагмиты-палки в гроте Вышка

Рис. 13.22. Сталагмиты в гроте Грозный



Рис. 13.23. Булавовидные сталагмиты в гроте Грозный





Рис. 13.24. Штопорные сталагмиты в гроте Крестовый



Рис. 13.25. Сложный сталагмит в гроте Вышка



Рис. 13.26. Кораллновые сталагмиты в гроте Руины



Рис. 13.27. Ледяной сталагнат в гроте Вышка



Рис. 13.28. Сложные кристаллы в гроте Вышка



Рис. 13.29. "Ледяной дождь". Сталактиты (грот Руины)



Рис. 13.30. Резной сталактит, возникший при пульсирующем поступлении воды из трещины (грот Грозный)



Рис. 13.31. Линейно расположенные сталактиты и сталагмиты под трещиной в своде грота Крестовый



Рис. 13.32. Многолетний лед в гроте Полярный



Рис. 13.33. Сталактиты, сталагмиты, сталагматы и многолетний лед в гроте Полярный

Таблица 13.9  
Средний химический состав льда сталагмитов из грота Крестовый  
(анализы выполнены в марте 1966 и 1968 гг.), мг/дм<sup>3</sup>

Место отбора проб	Кол-во анализов	НСО <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	Ca	Mg	Минерализация	pH
Прозрачная головка	7	7,2	8,0	6,1	4,8	2,3	32,5	6,6
Матовая периферийная часть	9	53,4	314,6	11,8	117,6	13,3	546,0	7,1

На изломах упавших сталактитов и сталагмитов видны радиально расположенные крупные кристаллы льда, а в разрезе слоистых натечных льдов — столбчатые кристаллы. В многолетнем натечном льде четко фиксируются годовые слои, которые чаще всего маркируются грязевыми горизонтами или корой таяния.

Натечные льды в теплый период активно стаивают в гротах Крестовом и Руины, накапливаются в гротах Данте, Скандинавский, Полярный, Бриллиантовый.

В холодный период льды испаряются под воздействием потоков морозного воздуха, особенно в первых гротах — Бриллиантовом и Полярном, а также в проходе к гроту Данте. В результате в наледях возникают ниши, на дне которых лежит слой остаточной гипсовой муки. Некоторые сталагмиты, образовавшиеся в начале зимы, с усилением морозов исчезают за счет испарения. Их основания к концу зимы оказываются покрытыми сплошным белым слоем гипсовой муки.

Озерный лед Кунгурской пещеры изучен сравнительно слабо. В журнале Е. П. Дорофеева имеются данные о замерзании озер в гротах Вышка, Лукина, Великан, Крестовый (колодец), Геологов, а также о ледяных пластинках-заберегах (следы высокого стояния воды р. Сылвы в паводок) в гротах Первый (50-е гг.), Вышка (15.X.1978, 1980, 1982, 1983, 1986, 1987 гг.), Лукина (15.VII.1978, 15.V.1982, 15.IV.1983, 15.I.1985 гг.), Великан (15.III и 15.IV.1979 гг.), Крестовый (15.VII.1978 г.). В 1966—1967 гг. описан сравнительно редкий случай образования льда на поверхности озера в гроте Геологов в сильные морозы [110]. В декабре—январе температура воды в озере снизилась от 4,8 до 0 °С и 07.II.1967 г. на поверхности воды образовались прозрачные ледяные кристаллы, которые представляли собой свободно плавающие или сросшиеся концами шестилучевые пластинки поперечником до 100 мм и толщиной до 1 мм. С удалением от берегов размеры и толщина пластинок убывали.

В результате химического анализа воды Кунгурской пещеры получены интересные материалы о составе исходной воды и образующегося льда в гротах Великан, Великан—Вышка и Геологов. Общей закономерностью является снижение минерализации льда в 3—10 раз, сопровождающееся уменьшением содержания основных компонентов (SO<sub>4</sub>, Ca, Mg); pH и гидрхимический тип воды остаются неизменными (см. табл. 11.8).

Сегрегационные льды образуются в водонасыщенных грунтах в зоне сезонного оледенения при резких похолоданиях на поверхности. Они

были встречены также при бурении скважин и шпуров, и при проходке соединительных тоннелей и расширении проходов в пещере. Наблюдалось также образование “ледяных кустов” игольчатого льда, растущего из пор в бетоне, скрепляющем глыбы крепи.

Льды-цементы скрепляют щебень и дресву, образуя своеобразную брекчию с ледяным цементом (гроты Вышка, Западный и др.). Разнообразие форм льда в гротах пещеры показано в табл. 2.8.

**Сублимационные льды.** Воздухообмен между атмосферой и подземными полостями, а также между отдельными участками пещеры создает условия для конденсации (сублимации) влаги на одних, ее испарения (возгонки) — на других участках. Граница между этими зонами непрерывно перемещается в плане и по вертикали. Для возникновения сублимационных кристаллов температура воздуха должна быть отрицательной, а предмет, на котором идет кристаллизация, — иметь температуру ниже точки росы. Воздух, соприкасаясь с породой или льдом, становится пересыщенным влагой. Сублимационные кристаллы появляются в местах контакта холодного сухого и теплого влажного воздуха. Это происходит вблизи противотока в основном пещерном канале, когда холодные воздушные потоки движутся вдоль пола, а более теплые — вдоль свода галерей в обратном направлении. М. П. Головков [76, 77] и Е. П. Дорофеев [111, 114, 117, 120 и пр.] выявили морфологическое многообразие сублимационных ледяных кристаллов Кунгурской пещеры (листовидные, лотковые, пирамидальные, прямоугольные, игольчатые), а также наличие сложных форм (сростки).

Устойчивые очаги сублимации, где кристаллы разрастаются особенно интенсивно, возникают в гротах Бриллиантовый, Полярный, Скандинавский, Западный, Крестовый, Руины и в проходах между ними.

Листовидные кристаллы имеют вид сплошных пластинок, достигающих 50 мм в поперечнике и 100 мм в длину. Форма пластинок похожа на листья или лепестки цветов. От края к основанию толщина ступенчато увеличивается. На краю кристалла обнаруживают радиально вытянутые ледяные пластинки толщиной около 0,025 мм и шириной до 0,5 мм, между которыми остаются глубокие разрезы. На продолжении разрезов в кристалле видны радиально вытянутые газовые пузырьки. Они придают кристаллу вид листа с сетью жилок (рис. 13.39). При понижении температуры происходит нарастание на кристалле новых пластинок под небольшим углом к первой. Появляется параллельная штриховка растущих пластинок, начинается рост новой — лотковой формы. Переход от кристаллов листовидной формы к кристаллам лотковой формы зафиксирован на деревянной рейке в гроте Полярный.

Лотковые кристаллы — это скелетные кристаллы, которые растут при большом пересыщении воздуха влагой; при этом скорость роста на ребрах многократно выше, чем на гранях, поэтому и возникают бокаловидные формы или их части — лотки (см. рис. 13.36). Они представляют собой 1—3 грани шестисекторной пирамиды-воронки. Часто разрастается одна крупная грань, похожая на дно лотка, и две недоразвитые боковые, образующие борта. Треугольные микроступеньки-границы, расширяющиеся от основания к краю, состоят из ступенек роста, ориентированных перпендикулярно главной оси симметрии. Ступенчатые плоскости, переходящие на соседнюю, недоразвитую грань, заворачиваются отдельными пучками в

шестигранные спиралевидные воронки, расположенные по краям. Подобные кристаллы наиболее распространены в пещере, покрывая стены гротов и ранее возникшие ледяные образования. В пластинчатых кристаллах с понижением температуры также появляются ступеньки роста. Постепенно ими прорастает весь кристалл, преобразуясь в лотковый. Красивые друзы лотковых кристаллов украшают свод Полярного грота, появляются на непродолжительное время в гротах Вышка и Западный.

Пирамидальные кристаллы представляют собой шестисекторные воронки-пирамиды, прикрепленные узким основанием к своду или ко льдам на своде. Правильные воронки-пирамиды образуются только на свободных ото льда сводах. Обычно встречаются спиралевидные пирамидальные кристаллы, ступенчато разросшиеся на лотковых и полностью их маскирующие. В каждой разросшейся друзе ступеньки роста и образованные ими грани пирамид ориентированы в трех направлениях, образуя углы по  $120^\circ$ . Параллельно направленные грани многочисленных пирамид отражают свет как один большой кристалл. У каждой воронки одна из граней как бы разорвана, и края по разрыву закручены в шестисекторные спирали ступенек роста. Так формируется множество незавершенных шестисекторных пирамид. Кристаллы пирамидальных форм часто встречаются вместе с лотковыми, так как лоток — это неполная пирамида (рис. 13.37).

К пирамидальной форме относятся и описанные М. П. Головкиным [77] шестиугольные выпукло-вогнутые пластинки. Плоских шестиугольных пластинок, подобных некоторым видам снежинок, в пещере не встречено, но с повышением температуры отмечается тенденция перехода воронки к шестисекторной пластинке. При понижении температуры воронка становится глубже, приобретая бокалообразную форму. Если при относительно высоких температурах отложение льда и рост кристаллов шли в стороны, перпендикулярно главной оси симметрии гексагонального кристалла, то при более низких температурах начинается преимущественный рост кристаллов льда вдоль главной оси симметрии.

Прямоугольные кристаллы. На ребрах пирамидальных кристаллов с наружной стороны вырастают столбики-иглы, ориентированные вдоль главной оси симметрии. Срастаясь между собой, они образуют новые грани, перпендикулярные граням пирамид. Так образуются скелетные сростки с прямоугольными ячейками-пирамидами (вид сбоку) и ступенчато расположенными шестисекторными спиральными пирамидами (вид сверху). С понижением температуры шестисекторная пирамидальная форма распадается и исчезает, а прямоугольная проявляется более отчетливо (рис. 13.38).

Игольчатые (столбчатые) кристаллы возникают при дальнейшем снижении температуры. За два-три очень морозных дня в гроте Вышка на металлических ограждениях и сталагмитах выросли иглы до 300 мм длиной. С наступлением оттепели, на их боковых поверхностях начинается отложение льда. Под собственной тяжестью кристаллы как бы “провисают”, образуя шнуры и цепи (рис. 13.40, 13.41).

Дендритовые кристаллы имеют вид резной пластинки толщиной 0,025 мм, похожей на лист папоротника или перья птицы. В каждой пластинке имеется только три направления параллельных лучей, расположенных под углом  $60^\circ$ , а сам кристалл является аналогом разросшейся в одном направлении снежинки. Такие кристаллы появляются в Бриллиантовом

гроте при температуре ниже  $-18,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  — они бахромой свисают со свода, колышутся под напором потока воздуха.

При оттепели происходит обратная смена форм кристаллов. Хрупкие дендриты обычно осыпаются на пол, у игольчатых все более проявляется прямоугольно-пирамидальное строение, а на свободных концах игл, подобно снежинкам, вырастают шестисекторные пирамиды-воронки, имеющие вид запонок. Летом прямоугольные кристаллы исчезают, но сохраняются пирамидальные и лотковые. В осенне-летний период много кристаллов осыпается на пол, озерняется (кристаллы обтаивают и принимают форму зерен), смерзается и перекристаллизуется, образуя снегоподобную массу. Площадь скоплений достигает  $0,5\text{--}2,0\text{ м}^2$ , мощность —  $10\text{--}20\text{ см}$ . Летом эти образования подтаивают, покрываются плотной корой, иногда исчезают (гrotы Бриллиантовый, Вышка, Полярный).

Кристаллическая изморозь появляется при отсутствии температурной разности между поверхностью предмета и воздухом; она нарастает на ранее возникших кристаллах, различных предметах, имеющих небольшую теплопроводность и интенсивно образуется при понижении температуры воздуха на поверхности земли. При повышении температуры воздухообмен в пещере замедляется, и скорость роста изморози снижается (рис. 13.42).

Кристаллический налет появляется на теплоинерционных предметах, имеющих температуру ниже окружающего воздуха. Его возникновение отмечается зимой при оттепелях, когда наружный воздух с относительно высокой температурой, попадая в пещеру, соприкасается с охлажденными стенками и предметами, а также летом, когда пещерный воздух с положительной температурой движется к выходу через охлажденную ближнюю часть пещеры.

По Е. П. Дорощеву [111], в Кунгурской пещере сублимационные кристаллы разных форм образуются при различных температурах: листовидные — при  $-0,5\text{...}-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; лотковые — при  $-0,5\text{...}-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; пирамидальные — при  $-3,0\text{...}-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; прямоугольные — при  $-5,0\text{...}-7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; игольчатые (столбчатые) — при  $-10,0\text{...}-15,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; папоротниковые — при  $-18,0\text{...}-20,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Наблюдения за естественными и искусственно выращенными льдами показали неполное совпадение приведенных интервалов с теоретическими данными. Это связано с отсутствием синхронных замеров температуры и влажности воздуха у растущих кристаллов в Кунгурской пещере и с недостаточной изученностью пещерной изморози [247].

Как следует из рис. 13.34, форма сублимационных кристаллов

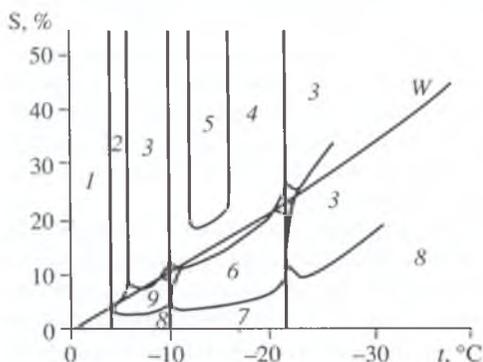


Рис. 13.34. Форма сублимационных кристаллов льда как функция температуры воздуха и пересыщения водяного пара по отношению ко льду [247].

1 — температура воздуха; S — пересыщение водяного пара по отношению ко льду; W — линия, соответствующая давлению водяного пара над переохлажденной водой при данной температуре. Форма кристаллов: 1 — пластинки, 2 — иглы, 3 — полые призмы, 4 — пластинки, разбитые на секторы, 5 — дендриты (ветвистые кристаллы), 6 — толстые пластинки (скелетные), 7 — сплошные очень толстые пластинки, 8 — сплошные призмы, 9 — бокалы

зависит от температуры и влажности воздуха. Дендриты льда образуются только тогда, когда пересыщение воздуха влагой превосходит точку насыщения по отношению к воде (а не ко льду) при данной температуре воздуха; при меньшем пересыщении образуются кристаллы пластинчатой формы. Внешняя форма кристаллов сохраняет только те элементы собственной симметрии, которые совпадают с наложенными на него элементами симметрии среды: симметрией поля давления водяного пара, потоков питания к кристаллу, молекулярной теплоемкости, а также направления движения выделяемой и поглощаемой теплоты кристаллизации.

Лабораторные исследования показали, что максимальная скорость роста сублимационного льда наблюдается при температуре воздуха около  $-5,0^{\circ}\text{C}$ , а при более высоких и низких температурах скорость роста кристаллов понижается. Влияние степени пересыщения воздуха влагой на скорость сублимации льда в пещерах изучено недостаточно. Принято считать, что влажность воздуха в пещерах всегда близка к 100% [63, 219, 260, 461 и др.]. Исследования последних лет показали, что возможна ситуация, когда она достигает 150% и более (воздух пересыщен влагой).

Обычные приборы не могут фиксировать пересыщение, однако его можно оценить расчетным путем [247]. Пусть теплый воздух поступает в замороженную полость. Превышение влажности теплого воздуха над влажностью холодного и есть пересыщение воздуха влагой (в действительности степень пересыщения будет несколько ниже, так как при смешении теплого и холодного воздуха образуется смесь с промежуточной температурой и влажностью). Наибольшие по площади и объему скопления сублимационных кристаллов льда располагаются вблизи входов в пещеру.

Форма сублимационных кристаллов зависит не только от температуры воздуха (см. рис. 13.34). Если принять температуру притекающего из бокового хода потока воздуха равной  $0^{\circ}\text{C}$ , то, чем ниже будет температура воздуха в основном канале полости, тем больше будет пересыщение воздуха влагой. Однако чем больше пересыщение, тем больше выделится тепла при сублимации льда, что отрицательно скажется на росте кристаллов. Чтобы учесть выделившееся тепло, используют соотношение:

$$T_{\text{рэт}} = T + 1,75(e - e_n), \quad (13.3)$$

где  $T_{\text{рэт}}$  — реальная эквивалентная температура воздуха;  $T$  — температура воздуха в пещере;  $e$  — влажность теплого воздуха,  $e_n$  — влажность у поверхности льда. Рост сублимационных кристаллов льда будет идти тогда, когда  $T_{\text{рэт}} < 0$ , т. е. когда  $T < 1,75(e - e_n)$ . По этому неравенству можно оценить температуру воздуха, необходимую для сублимации льда при разном пересыщении воздуха влагой.

Величина слоя пара в воздухе влияет на массу образующегося в пещере сублимационного льда и на форму его скоплений. Развиваются преимущественно те кристаллы, направление наибольшей скорости роста которых не выходит за пределы переохлажденного слоя пара. Чем тоньше этот слой, тем больше ориентирующее влияние субстрата и наоборот — вплоть

до полного его отсутствия в условиях равномерного пересыщения значительной толщи пара.

Влияние субстрата и движения воздуха на сублимацию льда изучено слабо. Сублимация идет на поверхности гипсов и льдов, металлов, цемента и дерева. Наибольшие по массе скопления изморози приурочены к участкам с активным движением воздуха в пещере. Кристаллы быстрее растут в тех точках, где выделяющееся при сублимации тепло быстрее уносит ветер. При обдувании гексагональной ледяной пластинки воздушным потоком со скоростью ветра около 10 см/с на ее углах за несколько секунд выросли ажурные кристаллы в виде веточек. Когда воздушный поток был отключен, на концах веточек появились пластинчатые расширения.

Сублимация в гротах Кунгурской пещеры происходит не повсеместно. Ее максимум сдвинут (рис. 13.35—13.42) к сводам гротов (Бриллиантовый, Полярный). По-видимому, положение максимума сублимации зависит от толщины и температуры более теплого потока воздуха в пещерном канале.

Максимум объема сублимационного льда приурочен к периоду минимальных температур воздуха во входных частях пещер или несколько позже. В Кунгурской пещере это наблюдается в феврале—марте. При изменении условий в пещере (резкое похолодание на поверхности) все сечение грота может быть занято потоком сухого холодного воздуха, что приведет к прекращению сублимации и началу испарения сублиматов. Поскольку изморозь растет с расширением от основания, то наиболее уязвимы для испарения (и таяния) места прикрепления кристаллов к своду. Поэтому в Кунгурской пещере часто наблюдается осыпание кристаллов в период похолодания.

В Кунгурской пещере наблюдается и летняя сублимация льда, хотя и в меньшем объеме, чем зимой, так как обуславливается только тем холодом, который запасли толщи пород и льда за зимний цикл охлаждения пещеры. При этом образуются небольшие пластинчатые кристаллы льда (до 5 мм в поперечнике, как например, в VIII—IX.1985 г.), которые растут в соответствии со штриховкой Фореля ледяного кристалла основания (каждая пластинка сублимационного кристалла является как бы продолжением одной из базисных плоскостей ледяного кристалла субстрата). Так как в субстрате ориентировка базисных плоскостей у каждого кристалла льда различна, при освещении ледяной стены под определенным углом по разному наклону растущих на нем сублимационных кристаллов хорошо отбиваются границы кристаллов субстрата и ориентация их базисных плоскостей. Наблюдения за ориентацией летних сублимационных кристаллов позволяют проводить специальные исследования кристаллов субстрата без применения приборов и отбора образцов.

Таким образом, механика образования сублимационных кристаллов в Кунгурской пещере в общих чертах ясна, но для выяснения динамики процесса сублимации необходимы дополнительные исследования.

**Осадочно-метаморфические льды.** Поток воздуха в Первый грот через Старый вход в пещеру вносится снег, который преобразуется потом в зернистый фирн и лед. В весенне-летний период много кристаллов осыпается на пол и смерзается в гроте Бриллиантовом и Полярном. Площадь



Рис. 13.35. Кристаллы на своде грота Полярный



Рис. 13.36. Кристаллы лотковой формы в гроте Вышка

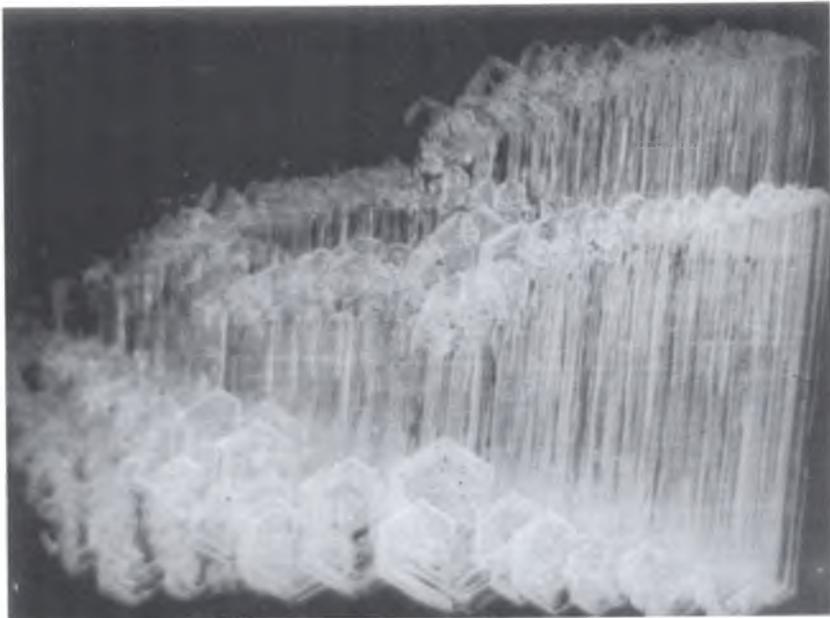


Рис. 13.37. Кристаллы пирамидальной формы в гроте Полярный

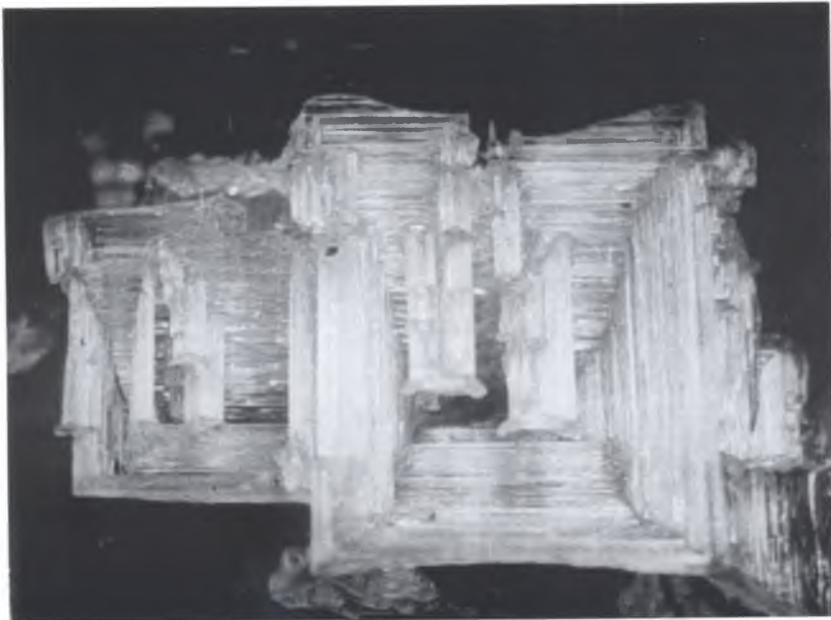


Рис. 13.38. Кристаллы прямоугольной формы в гроте Полярный

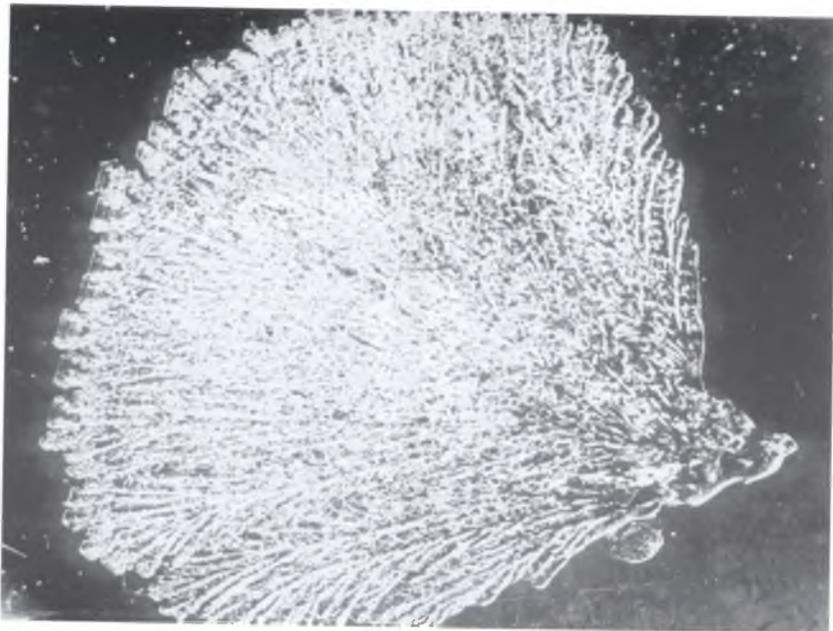


Рис. 13.39. Листовидные кристаллы в гроте Полярный

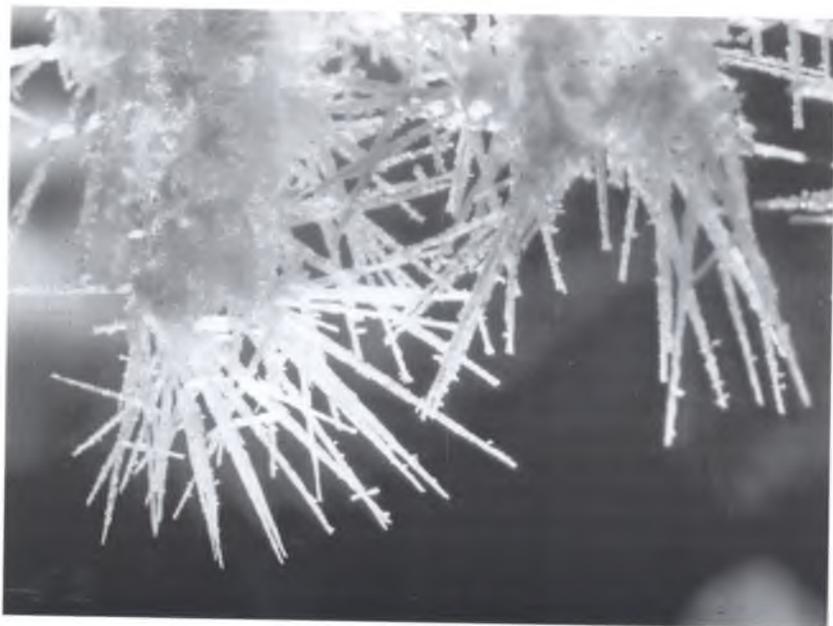


Рис. 13.40. Кристаллы игольчатой формы в гроте Бриллиантовый



Рис. 13.41. Иглы на ограждении (длина до 300 мм) в гроте Вышка



Рис. 13.42. Изморозь на стене в гроте Бриллиантовый

скопления осадочно-метаморфических льдов достигает 0,5—2,0 м<sup>2</sup>, мощность — 10—20 см. Летом эти образования подтаивают, озераются и покрываются плотной корой, иногда исчезают.

### 13.7. ОРГАНИЧЕСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ

Органические отложения для Кунгурской пещеры не характерны (рис. 13.43).

**Ветви деревьев, шишки, хвоя** встречены в гротах Первый, Длинный, Крестовый, Руины и Космический. В большинстве случаев они занесены сюда водой, хотя в Космический попали через органную трубу. Находки шишек и хвои свидетельствуют о том, что на Ледяной горе раньше был сосновый бор. Затем его вырубили и началось восстановление березового леса, а сейчас сделаны свежие посадки сосны.

**Черный налет на стенах** (следы высокого стояния воды) относится к гумусу (органика). Известен в гротах Вышка, Близнецы, Географов, Длинный, Центральный, Смелых.

**Копоть на стенах.** В Бриллиантовом и Полярном гротах во льду имеются загрязненные прослой (копоть сохранилась с того времени, когда пеще-

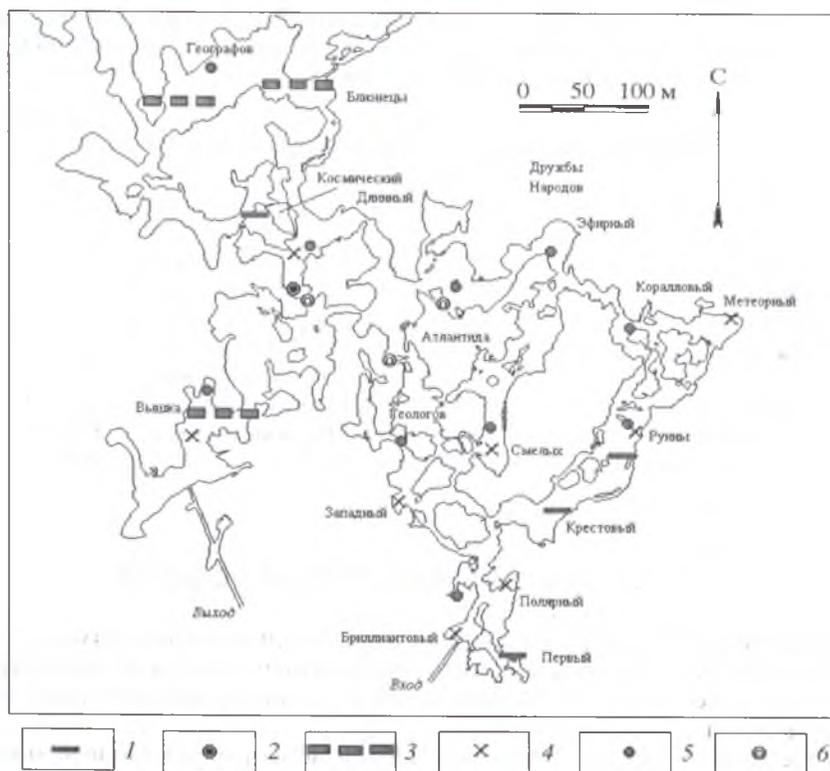


Рис. 13.43. Органические отложения в Кунгурской пещере.  
1 — ветви, шишки, хвоя; 2 — ствол березы; 3 — черный налет на стенах (уровни воды); 4 — копоть на стенах и льду; 5 — грибы и плесень; 6 — водоросли

ру посещали с факелами), в гротах Вышка, Длинный, Западный, Метеорный, Руины и Смелых — копоть описана на стенах и сводах. Надписей на стенах сравнительно немного и относятся они в основном к 30-м гг., когда в пещере работала экспедиция И. М. Переслегина.

**Грибы.** Тонкая пленка обнаружена на стенах гротов Вышка, Геологов, Длинный, Дружбы Народов, Коралловый, Смелых, Эфирный.

**Водоросли.** Отмечены в озерах гротов, где имелось подводное освещение (Длинный, Дружбы Народов, Атлантида).

### 13.8. АНТРОПОГЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

В пещеру при ее благоустройстве были привнесены десятки тонн различных строительных материалов, металла, пластмассы, стекла, резины и пр. Хотя их большая часть пошла на оборудование экскурсионной тропы, значительное количество неиспользованных материалов осталось в пещере. Кроме того, вдоль экскурсионной тропы и в озерах накапливается мелкий мусор (монеты, спички, обрывки бумаги и др.).

Для оценки характера и степени загрязнения пещеры было осуществлено предварительное картирование предметов антропогенного происхождения. В табл. 13.10 приведены данные о количестве различных материалов, обнаруженных в экскурсионной и заповедной частях пещеры, площади которых находятся примерно в соотношениях 2:1.

Таблица 13.10  
Антропогенные отложения в Кунгурской пещере [по 24]

№	Материал	Площадь, м <sup>2</sup>	Масса, кг	№	Материал	Площадь, м <sup>2</sup>	Масса, кг
1	Металл	141	4360	9	Дерево и стекло	64	500
2	Дерево	36	570	10	Дерево и бетон	2	300
3	Бетон	3	160	11	Дерево и резина	10	270
4	Резина	18	109	12	Металл и бетон	2	30
5	Картон	8	35	13	Дерево и картон	7	27
6	Стекло	11	4	14	Металл и стекло	2	20
7	Дерево и металл	211	3970	15	Различный мусор	394	7255
8	Металл и резина	41	786		Итого	950	18 396

### 13.9. ГЕОХИМИЯ КУНГУРСКОЙ ПЕЩЕРЫ

В Кунгурской пещере основными карстующимися породами считаются ангидриты и гипсы, подчиненное место занимают прослой доломитов, известняков и песчаников. Их химический состав приведен в табл. 13.11, а спектральный — в табл. 13.12.

Карстовые процессы сопровождаются перераспределением минерального вещества в массиве Ледяной горы, однако для малых элементов Кунгурской пещеры они освещены слабо. В 70-е гг. XX в. К. А. Горбунова, А. М. Кропачев и Н. П. Старков [89, 90, 97, 385] изучали минералогию глин

Таблица 13.11

Химический состав вмещающих пород района Кунгурской пещеры (анализы выполнены в Институте геологии и геохимии УНЦ АН СССР в 1987 г.), мас. %

Порода	Кол-во проб	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	SO <sub>3</sub>
Ангидрит	6	32,48	0,41	0,02	0,02	Сл.	46,70
Гипс	13	33,62	1,35	0,02	0,01	Нет	47,50
Известняк	1	55,59	0,40	0,01	Нет	Нет	1,65
Песчаник	2	11,67	5,19	1,58	1,59	0,20	1,21
Глины	13	22,75	8,67	0,58	0,96	0,02	2,02

Порода	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ.	П. п. п.	H <sub>2</sub> O	Σ
Ангидрит	0,24	0,24	0,06	0,09	20,27	0,12	100,41
Гипс	0,06	0,05	0,08	0,08	18,11	0,10	100,90
Известняк	Нет	Нет	0,50	0,07	42,32	0,07	100,61
Песчаник	46,62	0,51	8,86	5,51	15,64	1,10	99,68
Глины	22,82	0,34	7,92	2,39	29,03	2,11	99,61

(5 спектральных анализов), распределение акцессорных элементов во вмещающих породах и отложениях (313 анализов), стронций (94 анализа), марганец и титан (195 анализов). В пещере и ее окрестностях были взяты пробы почвы, элювия, гипса и ангидритов, воды капели, подземных озер и шурфов, отложений льда, гидрогенных минералов и продуктов подземного выветривания, которые проанализировали методом полуколичественного спектрального анализа на спектрографе ИСП-30. Большое количество спектральных анализов выполнено в Кунгурском стационаре.

Общее представление о водной миграции химических элементов в Кунгурской пещере дает таблица 13.13. Наиболее изучена миграция марганца, титана и стронция.

**Марганец** принадлежит к распространенным элементам — его содержание в земной коре составляет 0,100 мас.%. В окислительной среде интенсивность миграции марганца средняя. Коэффициент его миграции в Кунгурской пещере (по максимальным содержаниям) превышает единицу только для гипсовой муки (2), прослоев доломита и песчаных глин (3), пещерных глин (4).

**Титан** также принадлежит к распространенным элементам — его содержание в земной коре составляет 0,450 мас.%. Среднее и даже максимальное содержание титана в Кунгурской пещере существенно меньше кларкового. В окислительной среде титан является водным мигрантом со слабой и очень слабой интенсивностью миграции. Коэффициент миграции даже по максимальным содержаниям превышает единицу только для пещерных глин (7) и прослоев песчаных глин (14). Ледяные сталактиты по сравнению с вмещающими породами обеднены титаном. В водах озер и шурфов он вообще не обнаружен.

**Стронций** принадлежит к сравнительно распространенным элементам — его содержание в земной коре составляет 0,034 мас.%. По химическим свойствам он близок к кальцию. В зоне эпигенеза стронций обладает

Таблица 13.12

Максимальное содержание химических элементов (по сравнению с кларком) в породах и огложнях Кунгурской пещеры (анализы выполнены в спектральной лаборатории Кунгурского стационара и гидрогеохимической лаборатории ПГУ), мас. %

Образец	Кол-во проб	Грот	Be	Mn	Si	Ga	Fe	Al	Ni	Ti	Ag	Co	Sr	Cr	Ba	B	Cu
Кларк			0,00038	0,1	29,50	0,0025	4,65	8,050	0,0058	0,450	0,000007	0,0018	0,034	0,083	0,065	0,0012	0,0047
Ангидрит голубой	14	Географов	<b>0,0006</b>	0,1	> 1,0	0,001	> 1,0	> 3,0	<b>0,006</b>	0,1	0	<b>0,003</b>	<b>1,0</b>	0,01	0,06	<b>0,03</b>	<b>0,003</b>
Гипс	140	Великан, Вышка	0,0003	<b>0,5</b>	> 1,0	<b>0,06</b>	1,0	> 3,0	> 6,0	0,06	<b>0,006</b>	<b>0,003</b>	<b>3,0</b>	0,03	0,06	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>
Заполнитель трещин	4	Геологов	0,0003	0,03	1,0	0	1,0	3,0	0,001	0,03	0	0	<b>1,0</b>	0,006	0,03	0	0,001
Кристаллы гипса	11	Крестовый, Великан	0,003	0,1	0,01	<b>3,0</b>	0,06	0,2	0,01	0,3	0	<b>1,0</b>	<b>0,2</b>	0,05	0,05	0,001	0,001
Гипс, мука	5	Полярный, Крестовый	0	<b>0,2</b>	0,1	0	0,03	< 1,0	<b>0,03</b>	0,01	0	0,001	<b>0,2</b>	0,001	0,05	0	0
Селенит	17	=	0	0,001	0,1	0	0,03	0,003	0,001	0,03	0	0	<b>3,0</b>	0,003	0,006	0	0,001
Доломит, прослой	77	Вышка	<b>0,0006</b>	<b>0,3</b>	> 1,0	0,0003	0,60	3,0	0,003	0,03	<b>0,001</b>	0,001	<b>3,0</b>	0,01	0,06	<b>0,03</b>	0,001
Известняк неволинский	8	Вышка	< 0,0003	0,06	> 1,0	0	1,0	3,0	<b>0,006</b>	0,003	0	<b>0,01</b>	<b>3,0</b>	0,003	0,06	<b>0,003</b>	<b>0,06</b>
Известковый натек	6	Цемент	<b>0,001</b>	0,006	1,0	<b>0,3</b>	0,01	0,01	<b>0,01</b>	0,06	0	<b>0,03</b>	<b>0,6</b>	0,001	0	0	< 0,001
Песчанистые глины	4	Данте	<b>0,01</b>	<b>0,3</b>	6,0	> 1,0	6,0	> 6,0	0,001	> 6,0	0	0,001	<b>0,3</b>	0,01	0,001	0	0,001
Глина	63	=	<b>0,07</b>	<b>0,6</b>	> 1,0	> 1,0	3,0	> 3,0	> 3,0	> 3,0	<b>0,6</b>	<b>0,01</b>	> 1	> 1	<b>0,1</b>	<b>0,06</b>	0
Лед	5	=	0	0,1	0	0,0001	0,03	0	<b>0,01</b>	0,003	0	<b>0,01</b>	<b>1,0</b>	0,001	0,01	0,001	0,005

Примечание. По А. Виноградову [52]: 0 — элемент при данной чувствительности прибора не обнаружен; ≈ — пробы отобраны из нескольких гротов; полужирным шрифтом выделены содержания, превышающие кларковые.

Таблица 13.13

Коренные породы и отложения Кунгурской пещеры, коэффициенты водной миграции у которых выше единицы

Породы и отложения	Грот*	% превышения**	Элемент и коэффициент его миграции										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пещерная глина	≈	73	Ag 85 000	Ni 512	Ga 400	Be 184	B 50	Sr 30	Cr 12	Ti 7	Mn 6	Co 5,5	Ba 1,5
Гипс, порода	Великан, Вышка	40	Ni 1034	Ag 857	B 25	Ga 24	Sr 3,0	Cu 2,1	Co 1,7				
Песчанистая глина	Данте	40	Ga 400	Be 26	Ti 14	Sr 9	Mn 3	Fe 1,3					
Доломит, прослой	Вышка	33	Ag 142	Sr 90	B 25	Mn 3,0	Be 1,6						
Ангидрид голубой	Географов	33	Sr 30	B 25	Be 1,6	Co 1,4	Ni 1,1						
Гипс, кристаллы	Крестовый, Великан	33	Ga 1220	Co 555	Ni 17	Be 8,8	Sr 6						
Известняк неволинский	Вышка	26	Sr 90	Cu 13	Co 5,5	Ni 1,1							
Известковый натек	≈	26	Ga 120	Sr 18	Co 17	Be 2,7							
Гидрогенный лед	≈	20	Sr 30	Ni 17	Co 5,5								
Гипс, мука	≈	20	Sr 6	Ni 5	Mn 2								
Заполнитель трещин	Геологов	7	Sr 30										
Ссленит	≈	7	Sr 90										

\* (\*) — проба взята из нескольких гротов.

\*\* По отношению к 15 определяемым спектральным анализом элементам.

высокой подвижностью и вытесняется из коры выветривания интенсивнее кальция. Коэффициент миграции стронция в коренных породах и отложениях Кунгурской пещеры по максимальному содержанию составляет 6 (кристаллы гипса, гипсовая мука), 18 (известковые натёки), 30 (голубой ангидрит, заполнитель трещин, глина, гидрогенный лёд), 90 (коренные гипсы, селенит, неволинский известняк). Основная масса стронция в составе сульфатов находится в виде целестина, хемогенное выпадение которого охватывает конечные моменты карбонатной и начальные — сульфатной садки, значительная часть — в виде изоморфной примеси. В сублимационных ледяных кристаллах не обнаружен.

Остаточные продукты выщелачивания вмещающих сульфатных и карбонатных пород накапливаются в виде пещерной глины. Формирование глин Кунгурской пещеры происходит в условиях преобладания СК вод с повышенной до 2,2 г/дм<sup>3</sup> минерализацией и сопровождается их карбонатазацией, сульфатизацией, а возможно — и отложением целестина.

**Бериллия** в земной коре 0,00038 мас.%. Его среднее и даже максимальное содержание в Кунгурской пещере в основном меньше кларкового. Коэффициент миграции по максимальным содержаниям превышает единицу только для ангидрита и доломита (1,6), известковых натёков (2,6) и кристаллов гипса (8,8). Существенно обогащены бериллием пещерные глины (184).

**Галлия** в земной коре 0,0025 мас.%. Коэффициент миграции по максимальным содержаниям превышает единицу для коренного гипса (24), известковых натёков (120), прослоев песчанистых глин и пещерных глин (120). В кристаллах гипса из гротов Крестовый и Великан коэффициент миграции составляет 1200.

**Никеля** в земной коре 0,0058 мас.%. Его максимальное содержание в Кунгурской пещере в основном выше кларкового. Коэффициент миграции превышает единицу для гипсовой муки (6), кристаллов гипса (17), глины (517) и, особенно, коренного гипса из гротов Крестовый и Великан (1024).

**Серебра** в земной коре 0,000007 мас.%. В большинстве пород и отложений Кунгурской пещеры его содержание ниже чувствительности метода определения. Однако в трех случаях коэффициент миграции превышает единицу: для прослоев доломита из грота Вышка (142), коренных гипсов из грота Вышка и Великан (857) и пещерных глин (85 000).

**Кобальта** в земной коре 0,0018 мас.%. В большинстве случаев коэффициент миграции по максимальным содержаниям превышает единицу: в коренных ангидрите и гипсе — 1,7, неволинском известняке, пещерных глинах и гидрогенном льде — 5,5, известковых натёках — 17 и кристаллах гипса — 555.

**Бора** в земной коре 0,0012 мас.%. Для коренных гипсов, прослоев доломита и заполнителя трещин коэффициент миграции составляет 25, а для пещерных глин — 50.

**Меди** в земной коре 0,0047 мас.%. В большинстве случаев ее содержание в породах и отложениях Кунгурской пещеры ниже кларковых. Исключение представляют коренной гипс и неволинский известняк из грота Вышка, для которых коэффициент миграции составляет 2,1 и 12,7.

**Кремний, железо, алюминий, хром, барий.** Максимальное содержание этих элементов в коренных породах и отложениях Кунгурской пещеры су-

щественно ниже кларкового. Лишь для прослая песчаных глин коэффициент миграции выше единицы по железу (1,3), а для глин — по барии (1,5), хрому (12,0) и бору.

Из табл. 13.17 следует, что 15 химических элементов, определенных в Кунгурской пещере, образуют четкую последовательность. Больше всего их (73 %) в пещерных глинах, меньше — в голубых ангидритах и неволинских известняках (26 %).

Из отложений пещеры также формируется ряд: гипсовые кристаллы (33 %), известковые натёки, водородный лёд, гипсовая мука, заполнитель трещин, селенит (7 %).

Коэффициент водной миграции более единицы имеют 13 элементов. В группу активных мигрантов входят шесть из них. Стронций встречается во всех видах пород и отложений (100 %), а коэффициент его водной миграции колеблется от 3 до 90. Затем следуют никель (58 %, 1,1—1034), кобальт (58 %, 1,7—555), бериллий (50 %, 1,6—184), марганец (42 %, 2—6) и галлий (42 %, 24—1220). В группу менее активных мигрантов входят семь элементов: бор встречается в 4 видах пород и отложений (33 %, 25—50), серебро — в 3 (25 %, 857—85714), титан — в 2 (17 %, 7—14), медь — в 2 (17 %, 2,1—13), железо, хром и барий — в 1 (по 8 %, 1,3—12). Для кремния и алюминия коэффициенты миграции менее единицы.

## Глава 14

# БИОЛОГИЯ

Кунгурская пещера, как и большинство других пещер мира, является местом постоянного или временного обитания ряда представителей фауны и флоры, на что неоднократно указывалось в специальной и популярной литературе. Тем не менее сведения о жизни в пещере чрезвычайно скудны. Профессионально исследованы лишь немногие группы обитающих здесь организмов, а сами работы проводились эпизодически. Регулярные наблюдения, выполненные неспециалистами, не отличаются научной строгостью и касаются лишь тех организмов, обнаружение которых не требует применения специальных методов. Однако и они представляют значительный интерес, поскольку фиксируют уникальные события пещерной жизни, ускользнувшие от внимания профессиональных биологов. Среди таких описаний следует особо отметить “Журнал Е. П. Дорофеева”, в котором автор скрупулезно регистрировал свои находки и встречи с подземными обитателями. Впоследствии эти данные перепечатывались из работы в работу и вошли в генеральный обзор населения пещеры, который опубликовал Д. В. Наумкин [311].

К настоящему времени из Кунгурской пещеры достоверно известно несколько десятков живых форм — бактерий, плесневых и шляпочных грибов, зеленых растений, беспозвоночных и позвоночных животных.

### 14.1. ГЕТЕРОТРОФНАЯ МИКРОФЛОРА

**Бактерии.** Наиболее ранние микробиологические исследования в Кунгурской пещере проводились в 40-е гг. XX в.; их результаты опубликованы в двух небольших статьях, почти не известных специалистам [56, 57]. Авторы работы изучали пробы воздуха, воды, глины и льда из гротов Полярный, Руины, Метеорный, Дружбы Народов и Атлантида и сделали вывод о крайней бедности пещеры бактериями. В частности, численность бактерий в пробах воздуха оказалась сопоставима с таковой в верхних слоях атмосферы или в воздухе хвойных лесов.

В 1957 г. для микробиологических исследований были отобраны пробы воды из озера в гроте Колизей, колодца в гроте Крестовый и озера в гроте Мокрая Кочка, а также пробы инфильтрационной влаги в гротах Морское Дно, Эфирный и Мокрая Кочка. Изучение этих материалов позволило установить, что параметры развития микрофлоры при ее в целом низком уровне изменяются в широких пределах. Так, общее микробное число (экз/мл) в водах озер колебалось от 1 до 74, сол-титр — от 3 до 333 и выше, причем пик обоих показателей приходился на конец весны — начало лета [311]. Указанные особенности динамики микрофлоры в воде пещерных

озер объясняются влиянием талых вод, просачивающихся с поверхности плато, а также паводковых вод р. Сылвы, несущих много органики. Особенно примечательно обнаружение *coli*-формных бактерий, являющихся индикаторами фекального загрязнения.

Следующий эпизод микробиологических исследований в Кунгурской пещере состоялся в 1965 г., когда сотрудники лаборатории антибиотиков биолого-почвенного факультета МГУ Е. С. Лисина-Кулик и Л. Д. Барсукова [216] в целях изучения бактерио- и микофлоры отобрали свыше сотни проб нерастворимого остатка гипса, ангидрита, доломита, глины из осыпей в 10 гротах, воды озер в гротах Длинный, Дружбы Народов, Колизей и льда в гроте Бриллиантовый. Было выяснено, что численность бактерий (количество клеток на 1 г субстрата) в разных типах отложений пещеры неодинаково: в глине осыпей — 524, в кристаллах льда — 245, в покровных льдах — 180, во льдах сталактитов и сталагмитов — 150, в продуктах разрушения гипсов и ангидритов — до 120, в воде озер — 105, т. е. значительно меньше уровня развития бактериофлоры поверхностных вод и почвенных горизонтов. Так, в реках и озерах в зависимости от их типа регистрируется от сотен тысяч до десятков миллионов клеток в 1 мл воды, а в почвах их численность достигает 20 млрд клеток в 1 см<sup>3</sup>.

Полный таксономический список бактерий, встреченных в Кунгурской пещере, приведен в Банке данных. Здесь отметим только, что в бактериопланктоне подземных озер Е. С. Лисиной-Кулик и Л. Д. Барсуковой [216] были выявлены исключительно грамположительные формы с абсолютным преобладанием кокков *Sarcina aurantiaca* (= *Micrococcus luteus*). Эти сапрофитные микроорганизмы чрезвычайно широко распространены в природе; они встречаются в почве, воде, на поверхности живых растений и мертвых растительных остатках, поэтому их обнаружение в пещере представляется закономерным. *S. aurantiaca* обладает устойчивостью к повышенным концентрациям солей, и довольно значительная минерализация озерной воды и льда пещеры, неблагоприятная для других микроорганизмов, обеспечивает этому виду почти монополярное развитие.

В мае 1998 г. изучением бактериофлоры в озерных и инфильтрационных водах Кунгурской пещеры занимались сотрудники Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН (г. Пермь). Пробы инфильтрационных вод отбирали из органной трубы грота Эфирный, озерных — в гротах Вышка, Дружбы Народов и Колизей. Численность бактерий в пробах изменялась в пределах 0,18—8,25 млн клеток/мл (в среднем 2,56 млн), в то время как в сылвенских водах она достигала 9,9—13,3 млн клеток/мл. Среди микроорганизмов зарегистрированы сапрофитные, ацетатооксиляющие и глюкозооксиляющие формы (в том числе с волютином, способные аккумулировать фосфаты); примечательно полное отсутствие тионовых и сульфатвосстанавливающих бактерий, что объясняется бедностью пещерных вод органикой и их хорошей аэрированностью [216].

В октябре 2001 г. специалистами Центра госсанэпиднадзора г. Кунгура выполнено обследование воды из озер в гротах Вышка, Длинный и Дружбы Народов на предмет наличия в них бактерий семейства *Enterobacteriaceae* и термотолерантных конформных бактерий. Ни те, ни другие не были обнаружены, на основании чего был сделан вывод, что во-

да озер Кунгурской пещеры удовлетворяет нормативам СанПИН 2.14.559—96 [144, 366].

Рассмотренные выше результаты исследований пещеры позволяют отметить значительный разброс полученных в разное время данных. Так, сведения о численности бактерий в подземных водах колеблются от 1—74 до 8,2 млн экз/мл. Столь же разнятся и результаты таксономических исследований. Возможно, это связано не столько с объективным состоянием пещеры, сколько с применением различных методик. Методы микробиологических исследований за последние полвека шагнули далеко вперед, и данные работ 40-х и 60-х гг. XX в. уже могут не вполне соответствовать современному уровню.

**Плесени.** Первая и до сих пор единственная работа, посвященная изучению плесневых грибов в Кунгурской пещере, была выполнена в 1965 г. сотрудниками лаборатории антибиотиков биолого-почвенного факультета МГУ [216]. В нерастворимом остатке гипса, ангидрита и доломита, а также озерной воде, ледяных образованиях и глине из осыпей ими обнаружено 25 видов и форм плесневых грибов, относящихся к двум крупным таксонам: фикомицетам, или низшим грибам, и эумицетам, или высшим грибам. Среди фикомицетов зарегистрированы не определенные до вида представители родов *Mucor* (семейство Mucoraceae) и *Mortierella* (семейство Mortierellaceae), принадлежащие к одному порядку мукоровых (Mucorales) класса зигомицетов (Zygomycetes). Из эумицетов в пещере представлены некоторые виды родов *Penicillium*, *Aspergillus*, *Alternaria*, *Hormodendrum* и *Cephalosporium*, относящихся к одному порядку гифомицетов (Hyphomycetales) класса несовершенных грибов (Deuteromycetes).

Большинство найденных в Кунгурской пещере плесневых грибов — сапрофиты; они чрезвычайно широко распространены в природе, главным образом, в почвах, где принимают активное участие в разложении всевозможных органических остатков. Многие из них постоянно сопутствуют человеку, развиваясь на пищевых продуктах, влажной бумаге, тканях, изделиях из кожи, дерева и даже воске и парафине (как *Aspergillus flavus*), вызывая их порчу, известную в быту под названием плесневения.

Некоторые грибы, как типичные сапрофиты, при определенных условиях могут переходить к паразитическому образу жизни, вызывая микозы растений, животных и человека. Например, некоторые зигомицеты из рода *Mucor* являются возбудителями мукоромикозов, а гифомицеты из рода *Aspergillus* провоцируют заболевания, известные под названием аспергиллезов. Особенно патогенен аспергилл дымящий (*A. fumigatus*), найденный в гроте Колизей; у людей он способен вызвать хроническую эмфизему легких, аллергические реакции с симптомами ангины, часто бывает причиной отомикозов. Из других интересных находок, сделанных в Кунгурской пещере, следует указать на энтомопатогенные грибы рода *Cephalosporium*, заражающие членистоногих, и *Penicillium chrysogenum*, в былые времена использовавшийся в фармацевтической промышленности для производства пенициллина (найден в гротах Эфирный и Романтиков).

Количественные исследования [216] показали, что самым богатым в отношении зачатков грибов субстратом оказался нерастворимый оста-

ток гипса, ангидрита и доломита. Характерный обитатель продуктов разрушения гипсовых отложений — грибы рода *Cephalosporium*; почти во всех пробах встречены некоторые виды *Alternaria* и *Hormodendrum*.

В пробах из глыбово-глинистых осыпей в гротах Коралловый, Атлантида и Эфирный наибольшую численность имели такие представители гифомицетов, как *Penicillium* и *Aspergillus*. Здесь на их долю приходилось от 54 до 80 % от численности всех зачатков. На таких же биотопах в гротах Титанический, Романтиков, Колизей, Геологов, Длинный, Географов и Вышка доминировали уже другие грибы, главным образом *Alternaria*, которым сопутствовали *Hormodendrum* и *Cephalosporium*.

Состав доминантного комплекса микромицетов глыбово-глинистых осыпей обнаруживает четкую зависимость от общей численности и видового разнообразия зачатков грибов: с ростом этих показателей растет и представленность пенициллов и аспергиллов, но падает роль альтернативных. Например, в гроте Вышка, где зарегистрировано всего два вида плесеней, а плотность зачатков составила не более 150 экз/г субстрата, на долю альтернативных приходилось 60 % их общего количества, в то время как в гроте Эфирном, где было найдено 7 видов, а плотность зачатков достигала 830 экз/г субстрата, вклад альтернативных в тотальную численность плесеней не превышал 12 %. По-видимому, данное явление связано с процессами сукцессии микромицетов, протекающими в подземных условиях.

Необходимо заметить, что подземная микофлора существенно отличается от сообществ верхних почвенных горизонтов как по таксономической структуре, так и по уровню своего развития. Обращает на себя внимание большое количество альтернативных, в некоторых случаях заметно преобладающих по численности зачатков над другими микромицетами, а также крайне низкая роль плесеней рода *Fusarium*, наряду с пенициллами и аспергиллами относящихся к группе основных почвенных грибов.

Указанные различия почвенных и подземных микоценозов представляются вполне закономерными, если учесть некоторые особенности экологии составляющих их грибов. Представители рода *Alternaria* развиваются на отмирающих растениях и их более или менее свежих остатках, являясь своего рода пионерами в сукцессии микромицетов; следовательно, повышение удельного значения альтернативных в пещере, где нет настоящих почв, но существует непрерывный, хотя и скудный приток растительного детрита, не должно вызывать удивления. Что касается грибов рода *Fusarium*, то в основной массе они умеренные термофилы с оптимумом вегетации около +20 °С и выше, поэтому их отсутствие в пещере, где температура редко превышает +5 °С, вполне объяснимо. В некоторых биотопах Кунгурской пещеры сохраняется довольно высокая роль пенициллов и аспергиллов, что объясняется их более высокой холодоустойчивостью. Так, пенициллы секции *Asymmetrica* способны развиваться даже в холодильниках при температуре чуть выше нуля.

По обилию пещерная микофлора очень сильно уступает почвенным сообществам грибов. Если в 1 г почвы в зависимости от ее типа насчитываются десятки и сотни тысяч зародышей одних только гифомицетов, то в пещере их численность даже в самых богатых биотопах едва достигает тысячи. Несомненно, столь низкая плотность плесеней в подземных пус-

тотах объясняется их бедностью органическим детритом и продуктами его распада.

Вегетация плесеней в Кунгурской пещере протекает скрытно и внешне никак не обнаруживается, однако в некоторых случаях, связанных с занесением в пещеру досок, бумаги, парафина и других форм органических материалов наблюдаются вспышки их массового развития. Такие случаи отмечены в “Журнале Е. П. Дорофеева” и некоторых публикациях [24]. Так, в августе 1979 г. в гроте Центральный на гниющих досках плесень образовала белый покров толщиной до 5 см и площадью около 2 м<sup>2</sup>, просуществовав в таком виде без малого два года (до мая 1981 г.) и оставив после себя сухую пленку ржаво-бурого цвета. В декабре 1982 г. плесень появилась на гниющих досках ступеней, ведущих под органную трубу в гроте Эфирный; в наиболее плотной массе она имела розоватый оттенок. В сентябре 1985 г. покров плесени от лестницы двинулся вниз по камням и влажной глине, захватывая все новые участки, но на месте своего старого развития он начал отмирать, превращаясь в коричневую пленку, а в октябре покрытая пышной плесенью площадь составила чуть более 1 м<sup>2</sup>. В 1986 г. от плесневого покрова осталось лишь пятно с каймой шириной до 20 см у склона осыпи, а в 1987 г. перестало существовать и оно. В декабре 1985 г. на тропе между гротами Западный и Атлантида были обнаружены ярко-желтые пятна с белым плесневым ореолом. Плесень разрослась здесь на каплях свечного парафина, оставленных туристами.

**Грибы.** Помимо вездесущих плесеней, в Кунгурской пещере иногда встречаются и “настоящие” грибы, относящиеся к классу базидиальных эумицетов (*Basidiomycetes*), которым свойственно образовывать плодовые тела привычного облика (шляпка и ножка). К сожалению, базидиальные грибы пещеры специалистами никогда не изучались, и все, что мы знаем о них, получено в ходе любительских наблюдений. Тем не менее составленные сотрудниками стационара красочные описания по-своему интересны и удачно раскрывают одну из сторон загадочной пещерной жизни.

По данным В. Н. Андрейчука и Е. П. Дорофеева [24], первый гриб обнаружен в мае 1980 г. возле бетонированного устья скважины на щебнистом грунте в гроте Коралловый. Своей формой и белым цветом он напоминал шампиньон и достигал в высоту 15 см. В июне появилось еще восемь грибов, имевших вид белых столбиков без шляпок высотой до 3,0 см при диаметре 0,5 см. На основании описаний можно предположить, что эти грибы относятся к агариковым (семейство *Agaricaceae*), из которых широкой известностью пользуются шампиньоны и грибы-зонтики. Все агариковые — типичные сапрофиты, развивающиеся на разлагающейся органике и не нуждающиеся в микоризообразовании (симбиозе с корнями высших растений). Некоторые из них способны давать нормальные плодовые тела только при правильном чередовании дня и ночи; в противном случае у них формируются уродливые образования, иногда причудливые, но чаще всего имеющие вид столбика, состоящего из длинной ножки и крошечной зачаточной шляпки. Такие плодовые тела неоднократно находили в погребках, старых колодцах, угольных шахтах и карстовых пещерах; возможно, авторы указанной выше работы столкнулись с подобным явлением.

Еще один гриб был извлечен вместе с куском шлама из скважины в гроте Коралловом в ноябре 1980 г; он имел белую чешуйчатую ножку высотой около 10 см и колокольчатую шляпку с черными краями, рассеченными на перьевидные лопасти. Коричневатая макушка шляпки была гладкой и сверху напоминала глаз; ее диаметр не превышал 1,5 см. По определению профессора Л. Г. Переведенцевой (ПГПУ), это гриб-навозник *Coprinus* из семейства *Coprinaceae*; именно для них характерно такое явление, как автолиз, при котором гриб, созревая, расплывается в чернильную жижу, начиная с нижнего края шляпки.

В последующие годы плодовые тела грибов различных размеров и формы в Кунгурской пещере находили неоднократно, однако их описания в литературе не приводятся.

Все находки базидиальных грибов в пещере приурочены к бетонированному устью скважины в гроте Коралловый и экскурсионной тропе, что дает основание предположить, что их споры были занесены под землю вместе с песком во время проведения строительных работ [24].

## 14.2. ЗЕЛЕННЫЕ РАСТЕНИЯ

Основные факторы, определяющие своеобразие подземных биотопов — постоянно низкая температура, высокая влажность и отсутствие света. Полная темнота, царящая в глубине пещер, не только лишает животных возможности зрительной ориентации, но и препятствует существованию зеленых растений. Впрочем, последние могут проникать в подземные пустоты на значительные расстояния от входа, довольствуясь настолько слабой освещенностью, что она совершенно не воспринимается человеческим глазом. Абсолютными чемпионами в данном отношении являются мхи и водоросли, способные вегетировать при освещенности 0,05 % от ее нормального дневного уровня. Дальняя граница фотической зоны, в пределах которой распространены зеленые растения, очень сильно варьирует в зависимости от размеров входного отверстия и морфологии привходовой части пещеры и обычно не превышает 100 м [40].

В Кунгурской пещере изолированные очаги мхов и водорослей встречаются на значительном расстоянии от входа; их присутствие здесь может объясняться только наличием искусственного освещения.

**Водоросли.** Ярко-зеленые пятна водорослей *Fribonema minus* и *F. monochloron* (по данным Е. П. Дорофеева) отмечены на подводных лампах и перед ними на дне озер гротов Дружбы Народов и Атлантида, а также на камнях и глине перед прожекторами в гроте Длинном. В настоящее время в гроте Атлантида водоросли отсутствуют, поскольку он уже давно не освещается.

Специальных исследований альгофлоры в Кунгурской пещере до сих пор не проводилось; имеющиеся материалы ограничены небольшими сборами Н. Н. Панькова, выполненными в августе 2002 и июле 2003 гг. В пещере обнаружены два таксона зеленых водорослей (отдел *Chlorophyta*): нитчатые формы *Ulothrix* (семейство *Ulotrichaceae*, порядок *Ulotrichales*) и одноклеточные представители семейства *Chlorococcales* (порядок *Chlorococcales*), более точное определение которых оказалось невозможным. Единичные обрывки нитей улотрикса отмечены на дне озера в гроте

Дружбы Народов, мелкие зеленые шарики хлорококковых — в соскобах с камней перед прожекторами в гроте Длинный. Оба таксона не характерны для р. Сылвы, в фитобентосе которой безусловно преобладают диатомовые водоросли *Vacillariophyta* [333].

**Мхи.** Развитие мхов, как и водорослей, в Кунгурской пещере приурочено к источникам искусственного освещения. Наиболее крупная подушка мха (около 20 дм<sup>2</sup>), известная уже более 10 лет, образовалась у одного из прожекторов в гроте Длинный. Еще одна, меньшая по размерам популяция мхов произрастает на ангидритовой полке возле фонаря в проходе между гротами Метеорный и Коралловый [311]. Отобранные образцы были идентифицированы как *Pohlia vachlenberi* (определение А. Г. Безгодова).

### 14.3. БЕСПОЗВОНОЧНЫЕ ЖИВОТНЫЕ

До недавнего времени профессиональных исследований фауны беспозвоночных в Кунгурской пещере не проводилось. Тем не менее некоторые представители этой обширнейшей группы животных наблюдались здесь неоднократно, что фиксировалось как в научных отчетах Кунгурского стационара Горного института УрО РАН и “Журнале Е. П. Дорофеева”, так и в ряде печатных работ [24, 143, 311]. Среди беспозвоночных Кунгурской пещеры отмечались только ногохвостки, двукрылые (мухи и комары) и бокоплавы *Crangonyx chlebnikovi* Borutzky.

Предметом специального внимания беспозвоночные Кунгурской пещеры стали летом 2001 г., когда сотрудник стационара Н. В. Лаврова в ряде подземных озер установила ловушки с приманкой (кусочки колбасы, сыра и яблок), в которые попало несколько десятков рачков. В августе 2002 г. сотрудники ПГУ Н. Н. Паньков и Е. Ю. Крайнев обследовали пещеру в пределах туристического маршрута “Большое кольцо”. В целях сбора фаунистического материала осуществлялся визуальный осмотр стен и пола пещеры, а также отдельных камней и глины из осыпей и обвалов. Кроме того, в озерах гротов Дружбы Народов и Длинный с использованием стандартных гидробиологических методик была отобрана 21 проба зообентоса. Предварительные результаты работ опубликованы [335].

С мая по август 2003 г. в Кунгурской пещере выполнен еще один цикл исследований, в которых, кроме авторов настоящей главы, приняли участие научный сотрудник ИЭГМ УрО РАН Н. В. Панькова и студенты Н. Г. Горшков (ПГУ) и А. В. Чернов (УрГУ). Помимо ручного сбора животных (при помощи пинцета), использовались ловушки различных конструкций: пластиковые стаканчики емкостью 0,2 л, на 1/3 заполненные 4 %-ным формалином и вкопанные в глину вровень с поверхностью (ловушки Барбера), а также полиэтиленовые ленты 5×50 см, смазанные невысыхающим клеем “Муксидан” и разложенные в разных местах на полу пещеры. Для отлова крангоников использовались мини-верши, изготовленные из пластиковых бутылок объемом 1,5 л с отрезанным и вшитым внутрь воронкой горлышком и кусочками колбасы в качестве приманки. Всего было установлено 17 ловушек Барбера, 12 липких лент и 15 мини-вершей, простоявших в пещере от 3 до 16 суток.



11. *Chironomidae* indet. (ближе не определены)  
Подотряд Brachycera — короткоусые двукрылые, или мухи  
Семейство Bombyliidae — бомбилииды  
12. *Dischistus unicolor* Lw. — дишистус одноцветный  
Семейство Helomyzidae — геломизиды  
13. *Helomyza serrata* L.

**Нематоды** — обширный класс беспозвоночных, насчитывающий свыше 15 000 видов. Представители этого класса чрезвычайно широко распространены в природе, обитая на дне морей и континентальных водоемов, населяя почву и паразитируя в тканях и внутренних полостях животных и растений. Свободноживущие нематоды (описано около 5000 видов) встречаются везде, где есть разлагающееся органическое вещество (детрит). Многие из них обитают в самых неподходящих условиях: при полном отсутствии кислорода, высокой кислотности и т. д. Это, как правило, мелкие формы; их длина редко превышает 2 мм. Они имеют вид беловатых упругих червячков с несегментированным веретеновидным телом, покрытым плотной кутикулой. Из-за крохотных размеров и скрытного образа жизни, несмотря на вездесущий характер нематод, обнаружить их без применения специальных методов невозможно.

В Кунгурской пещере зарегистрированы две нематоды (длиной 0,4 и 0,7 мм), найденные в центральной части озера в гроте Дружбы Народов на глубине около 1,5 м и относящиеся к одному виду *Plectus rhizophilus* De Man, 1880 (определение А. С. Козлова). Черви этого вида распространены всесветно; они населяют мелководья континентальных водоемов, часто встречаются во мху и сырой почве. Занесены ли они в пещеру с поверхности плато вместе с детритом или попали в озеро с полыми водами р. Сылвы, в настоящее время установить невозможно.

**Малоцетинковые черви** — одна из групп беспозвоночных животных, играющих исключительно большую роль в экономике природы. К настоящему времени систематиками описано около 3000 видов малоцетинковых червей, большинство из которых, включая и общеизвестного дождевого червя, обитает в почвах, некоторые виды (около 500) населяют пресные воды, среди них хорошо знакомые любителям аквариумистики трубочники.

В Кунгурской пещере зарегистрирован единственный представитель класса, относящийся к семейству Enchytraeidae — горшечных червей. Это нитевидное безглазое животное, имеющее длину около 12 мм и желтовато-белый цвет, было отловлено в центральной части озера в гроте Дружбы Народов в августе 2002 г. Поскольку систематика семейства Enchytraeidae не разработана, более точное определение найденного червя не представляется возможным. Известно, что представители указанного семейства обитают как в почвах, так и на дне континентальных водоемов, питаясь разлагающимся органическим материалом, который заглатывают вместе с грунтом. Этот червь мог попасть в пещеру как с полыми водами р. Сылвы, так и с поверхности Ледяной горы вместе с детритом.

**Остракоды** (ракушковые раки) — широко распространенная в морских и пресных водах группа низших ракообразных, насчитывающая около 2000

видов. Размеры большинства остракод не превышают 1,0—5,0 мм. Их тело заключено в двустворчатую раковину, имеющую различную форму (почковидную, бобовидную, эллиптическую и т. д.), за что они и получили свое название. Остракоды ведут, как правило, бентосный образ жизни, роясь в детрите, который служит им пищей. Среди этих рачков известно и немало троглофильных и троглобионтных форм, описанных из различных пещер мира [40].

В Кунгурской пещере (центральная часть озера в гроте Дружбы Народов) зарегистрированы три ювенильные особи ракушковых рачков и большое количество створок их раковин длиной 0,4—0,6 мм. Эти животные принадлежат к трем родам: *Limnocythere*, *Candona* и *Cypridopsis* [334]. Некоторые представители родов, а именно *Limnocythere inopinata* (Baird, 1850), *Cypridopsis vidua* (O. F. Mueller, 1776) и ближе не определенные *Candona* в массе развиваются в р. Сылве [334]. Таким образом, есть основания полагать, что остракоды попадают в пещерные озера с полыми водами. С другой стороны, среди *Cypridopsis* и *Candona* известны и специализированные пещерные формы, поэтому вопрос о природе обнаруженных рачков остается открытым.

**Крангониксы.** Эти бокоплавы были впервые обнаружены Е. В. Боруцким в 1926 г. в озерах Большой Мечкинской пещеры и описаны им как новый для науки вид, получивший название в честь первого экскурсовода и хранителя Кунгурской пещеры А. Т. Хлебникова [439]. В настоящее время крангониксы Хлебникова достоверно известны еще из трех пунктов близ Кунгура. Летом 2002 г. один рачок был пойман сотрудником стационара Н. В. Лавровой в Ординской пещере, еще один попался в ноябре 2003 г. студенту ПГУ А. Б. Крашенинникову в родниковом ручье — притоке р. Иргины (пос. Шахарово Суксунского района); это первый случай нахождения *C. chlebnikovi* в поверхностных водах, куда он, несомненно, был вынесен из-под земли.

Обстоятельства первого нахождения в Кунгурской пещере крангониксов остаются неясными. В научных отчетах Кунгурского стационара Горного института УрО РАН отмечено, что рачки, по которым был описан *C. chlebnikovi*, найдены Е. В. Боруцким в 1926 г. в озерах гротов Дружбы Народов, Колизей, Мокрая Кочка и Хлебникова, однако в статье Е. В. Боруцкого, на которую принято ссылаться, указаний на этот счет нет. Более того, в качестве местонахождения *C. chlebnikovi* фигурирует только Большая Мечкинская пещера: “Fundort: Unterirdischer See und Fluß in der Höhle am Ufer des Flusses Metschka (Nebenfluß der Sylva), Ural, Kungurbezirk” [439. S. 254]. Остается лишь догадываться, кем и когда были найдены крангониксы в Кунгурской пещере и кто устанавливал их видовую принадлежность.

**Зоогеография.** Совокупность находок крангониксов Хлебникова позволяет утверждать, что этот вид обладает исключительно узким ареалом, границы которого, скорее всего, не выходят за пределы Нижнесыльвенского района карбонатно-гипсового карста. Своей эндемичностью и локальностью распространения *C. chlebnikovi* резко выделяется из современной гидрофауны Урала и Приуралья, которой свойственны безусловное преобладание широкоареальных видов и крайне низкая специфичность [333].

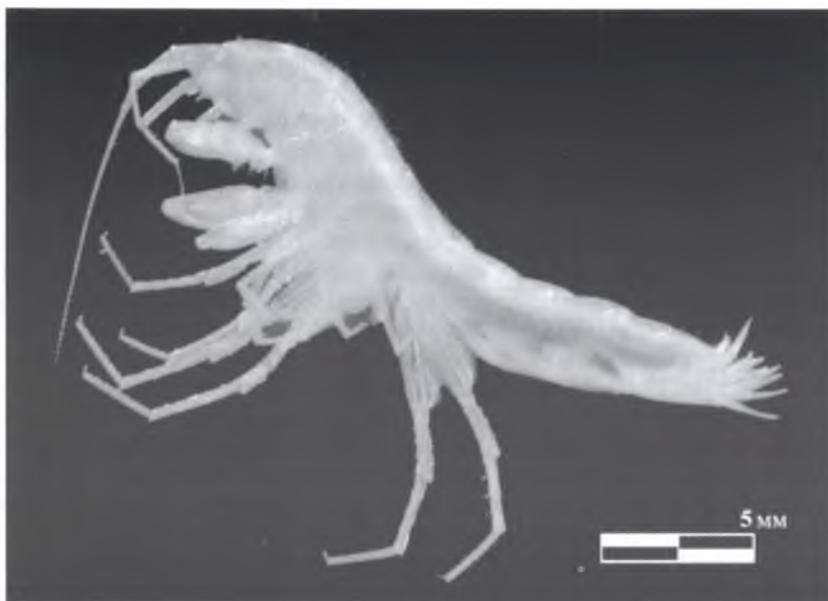


Рис. 14.1. Самка троглобионтного бокоплава *Crangonyx chlebnikovi maximovitshi* (Pan'kov, Pan'kova, 2004) из Кунгурской пещеры

Особенности морфологии. Из известных представителей фауны Кунгурской пещеры только рачки *C. chlebnikovi* являются специализированными троглобионтами с ярко выраженными морфологическими адаптациями к пещерному образу жизни. Эти бокоплавы совершенно лишены глаз и не способны воспринимать свет. Подобно другим подземным жителям, крангониксы полностью утратили пигментацию покровов; из-за просвечивающих через стекловидно-прозрачный хитин жирового тела беловатых мышечных волокон они выглядят молочно-белыми [336].

Вплоть до недавнего времени крангониксы из Кунгурской пещеры считались тождественными номинативной форме *Crangonyx chlebnikovi chlebnikovi* Borutzky [439], и только специальное изучение их морфологии позволило установить, что эти рачки нуждаются в выделении по меньшей мере в особый подвид, который был описан под названием *Crangonyx chlebnikovi maximovitshi* Pan'kov, Pan'kova, 2004 [336]. От бокоплавов номинативной формы они отличаются меньшими размерами взрослых особей (14,0—20,5 мг против 22,5—43,0 мг), нежно-белым цветом (против грязно-белого и желтоватого), отсутствием рудиментарных органов зрения (ярко-желтых глазных пятен) и наличием беспорядочно разбросанных по всему телу непрозрачных матово-белых пятнышек, хорошо видимых под микроскопом (рис. 14.1).

Экология. В Кунгурской пещере крангониксы Хлебникова зарегистрированы во всех изученных озерах (табл. 14.1). По данным количественных проб, на глинистых грунтах центральной части Большого Подземного озера (грот Дружбы Народов) численность крангониксов не превышает 0,34 экз/м<sup>2</sup> при биомассе 5,8 мг/м<sup>2</sup>, что значительно ниже, чем в Большой Мечкинской пещере (67,0 экз/м<sup>2</sup> при 2180 мг/м<sup>2</sup>), где хорошо видно в свете

Таблица 14.1

## Количество пойманных крангониксов и их относительная численность в некоторых озерах Кунгурской пещеры

Название грота с озером	Кол-во пойманных рачков*, экз.	Относительная численность, экз/лов.-сут	Название грота с озером	Кол-во пойманных рачков*, экз.	Относительная численность, экз/лов.-сут
Атлантида	29	2,4 ± 1,2	Колизей	1	1,0
Великан	34	1,4 ± 0,8	Романтиков	6	0,7
Геологов	6	1,0	Хлебникова	1	0,3
Длинный	44	1,2 ± 0,7	Всего	144	—
Дружбы Народов	23	1,5 ± 0,6	В среднем	—	1,3±0,5

\* Большая часть пойманных рачков после регистрации была выпущена в озеро.

электрического фонаря множество копошащихся в грунте рачков. Неодинаковый уровень развития рассмотренных популяций крангониксов, скорее всего, связан с существенно различными трофическими условиями, сложившимися в двух пещерах. Пищей этим рачкам, судя по содержанию их кишечника, служит оформленный детрит растительного и, реже, животного происхождения, поступающий с дневной поверхности. В Большой Мечкинской пещере плотность детрита в верхнем 5-см слое грунта достигает 32,0 г/м<sup>2</sup> воздушно-сухого веса. Он представлен крупными фракциями — кусочками древесной коры, обломками веточек, фрагментами листьев и стеблей трав, остатками насекомых. В Кунгурской пещере детрит находится в виде полуразложившихся волокон древесины, которые бокоплавам трудно собирать, а его плотность не превышает 3,5 г/м<sup>2</sup> [336]. Вероятно, дефицитом пищи объясняются и значительно меньшие размеры тела обитающих здесь крангониксов Хлебникова—Максимовича.

Геологическая история и родственные связи. Крангоникс Хлебникова относится к обширной группе подземно-ключевых амфипод *Stygobromus-Crangonyx* (*Synurella-Crangonyx*), изолированные фрагменты ареала которой разбросаны по всему миру [40, 439]. Эти рачки известны из Западной и Центральной Европы, включая Британские и Балеарские острова (*Stygobromus*, *Crangonyx* и *Metacrangonyx*), Центральной Азии (*Tadzhocrangonyx*), Восточной Европы, Крыма, Закавказья и Сибири (*Stygobromus*), Дальнего Востока, включая Камчатку, Сахалин и Японские острова (*Crangonyx* и *Pseudocrangonyx*), Северной Америки (*Crangonyx*, *Eucrangonyx* и *Stygobromus*), Южной Африки (*Crangonyx robertsi*), Мадагаскара (*Austroniphargus bryophilus*), Новой Зеландии (*Paracrangonyx compactus*) и т. д.

Реликтовый характер ареалов, их разбросанность по разным странам и далеко зашедшая дифференциация представителей группы *Stygobromus-Crangonyx* свидетельствуют о ее большой древности и широком распространении в далеком прошлом. Считается, что предки этой группы обитали в континентальных водоемах Северного полушария еще в мезозое и раннем кайнозое [439]. В частности, об этом позволяет судить характер географического распространения ее современных представителей: отдельные виды группы *Stygobromus-Crangonyx*, включая наиболее примитивные формы, приурочены главным образом к обеим частям Голарктики и дости-

гают здесь наивысшего таксономического разнообразия, что определенно указывает на Лавразию как центр происхождения этих ракообразных. Возможно, обособление филогенетической ветви *Stygobromus-Crangonyx* от общего ствола Gammaridae завершилось уже в раннем мелу, когда Лавразия еще имела тесный квазисухопутный контакт с Гондваной. Без подобного допущения, учитывая крайне низкую способность амфипод к расселению, очень трудно объяснить появление представителей группы в южных гондванских землях — в Южной Африке, на Мадагаскаре и, особенно, в Новой Зеландии. Современное распространение рода *Crangonyx*, по-видимому, ограничено Голарктикой; эти рачки известны из Западной и Центральной Европы, Приуралья, Дальнего Востока, приатлантических штатов Северной Америки.

Таким образом, для крангониксов характерен разорванный ареал с обширными разобщениями. Большая амплитуда дизъюнкций и далеко зашедшая дифференциация рачков в зоогеографических изолятах свидетельствуют о их независимой эволюции в течение продолжительного времени.

Анализ локализации фрагментов родового ареала, а также экологии и морфологии разных видов крангониксов позволяет судить о времени их обособления от общего ствола рода *Crangonyx*. Заслуживает внимания и тот факт, что 6 из 9 известных видов этого рода явно тяготеют к крупнейшим центрам консервации тургайской биоты (Восточно-Азиатскому и, особенно, Аппалачскому), причем в этих рефугиумах крангониксы населяют не только пещеры, но широко представлены и в поверхностных водах, а некоторые из них даже не имеют адаптаций к пещерному образу жизни. Например, североамериканский *C. gracilis*, обладающий хорошо развитыми глазами, обитает в водоемах и водотоках как на поверхности земли, так и в пещерах, встречается в озерах Верхнее и Гурон. Другие североамериканские виды крангониксов с полностью или частично редуцированными органами зрения (*C. forbesi*, *C. mucronatus*, *C. packardi* и *C. serratus*) населяют в основном подземные воды. Наиболее близкий к крангониксу Хлебникова дальневосточный *C. arsenjevi* известен из родников системы р. Хор [439].

Совпадение центров разнообразия и обилия рода *Crangonyx*, а также ареалов наименее специализированных его представителей с центрами консервации тургайской биоты определенно указывает на историческую связь крангониксов с тургайскими формациями.

Известно, что биота тургайского типа как зональное сообщество существовала на территории Евразии и Северной Америки вплоть до конца миоцена. В течение плиоцена в связи с общепланетарным похолоданием и усилением климатической дифференциации она постепенно уступила место более умеренной бореальной фауне и флоре современного типа, сохранившись в сильно измененном и обедненном виде в системе более или менее крупных рефугиумов. Вероятно, именно с этого времени сплошной голарктический ареал рода *Crangonyx* оказался разорванным, и дальнейшая эволюция рачков протекала в условиях географической изоляции [336].

В эпоху плейстоценовых оледенений на огромных пространствах Голарктики складывались исключительно неблагоприятные условия для существования фауны и флоры. На территориях, периодически занимаемых ледниками, вся биота, естественно, уничтожалась, а в перигляциальной зо-

не могли выживать лишь немногие виды, ценотически связанные с тундровыми и криоксеротическими формациями. Оледенения послужили мощным стимулом к заселению пещер некоторыми представителями аборигенной фауны, поскольку троглобионтный образ жизни позволяет животным выйти из-под контроля суровой климатической обстановки и чуждого им биоценотического окружения.

Результатом этого процесса стало хорошо знакомое спелеобиологам явление — приуроченность многих реликтов теплых эпох к пещерам, находящимся в древних перигляциальных зонах, и наличие родственных им наземных форм в более южных областях [40]. Так, в подземных водах умеренной зоны Европы до сих пор процветают остатки фауны, вымершей на дневной поверхности еще в эоцене и очень близкой к современной тропической. Водяные ослики подрода *Proasellus* населяют пещеры вдоль границы максимального оледенения, в то время как южнее встречаются исключительно наземные формы [40]. Хорошим примером указанной закономерности могут служить и представители рода *Crangonyx*. Три северных вида этого рода (*C. subterraneus*, *C. paxi* и *C. chlebnikovi*) в отличие от родственных им более южных форм являются строго троглобионтными животными [336].

На пике наиболее мощных оледенений область современного обитания крангониксов Хлебникова была расположена в перигляциальной зоне в 150—450 км от юго-восточной границы Скандинавского ледникового щита и несколько севернее Приуральского (Южно-Уральского) рефугиума неморальной биоты, где на протяжении всего плейстоцена сохранялись остатки плиоценовой фауны и флоры — прямой наследницы тургайских формаций. Во время теплых и влажных межледниковий неморальные сообщества выходили из своего убежища и распространялись на север вдоль Урала, доходя до широты Сыктывкара.

Таким образом, на протяжении всего плейстоцена наблюдались ритмичные пульсации ледников и Приуральского рефугиума, находящиеся в противофазе друг с другом, при этом по территории современного Кунгурского края с севера на юг и с юга на север поочередно прокатывались миграционные волны элементов перигляциальных и неморальных сообществ. Вероятно, во время одной из таких пульсаций, на волне отступления неморальной биоты в свое убежище, крангониксы “зацепились” за находящиеся здесь пещеры и только потому смогли дожить до наших дней. Скорее всего, это произошло уже в первую фазу раннеплейстоценового (Окского) оледенения примерно 400—500 тыс. лет назад, но нельзя исключить и того, что успешными оказались более поздние попытки, шанс которым представлялся 250, 170 и 70 тыс. лет назад — в начале Московского, Днепровского и Валдайского оледенений. Впрочем, последнее представляется маловероятным, поскольку кренобионтные амфиподы, обладая исключительно низкой вагильностью, во времена межледниковий едва ли могли поспевать за волнами более динамичных мигрантов.

Предки же троглобионтных *C. chlebnikovi*, оставшись на дневной поверхности, так и не сумели преодолеть “узких горлышек” климатических пессимумов и вымерли без остатка в предгорьях Южного Урала если не в раннем плейстоцене, то во всяком случае не позднее 16—18 тыс. лет назад, на пике Осташковской фазы самого сурового Валдайского оледенения.

Как результат, в поверхностных водах Урала и Приуралья ныне нет ни одного бокоплава, в котором можно было бы уверенно признать форму, родственную современным крангониксам [333].

**Клещи.** Личинки клещей-краснотелок Trombidiidae паразитируют на членистоногих, высасывая соки их тел. Взрослые формы — прожорливые хищники, нападающие на мелких беспозвоночных; нередко их можно встретить во влажной почве, где они привлекают внимание своим ярко-красным цветом.

В Кунгурской пещере личинки клещей-краснотелок (19 экз.) обнаружены на мухе *Helomyza serrata* L., пойманной 21.VII.2003 г. в гроте Дружбы Народов. Нет сомнений в том, что это результат случайного заноса паразитов с поверхности.

Акарифауна Кунгурской пещеры, вероятно, не исчерпывается клещами-краснотелками. Можно предполагать, что со временем здесь будут обнаружены и паразитиформные клещи (гамазоидные и иксодовые), отдельные представители которых постоянно встречаются на грызунах и насекомых, весьма частых гостях пещеры.

**Ногохвостки** — первичнобескрылые насекомые с грызущими или (реже) колюще-сосущими ротовыми органами, втянутыми в головную капсулу (признак подкласса скрыточелюстных — Entognatha) и прыгательной вилкой (видоизмененными брюшными конечностями), посредством которой они способны совершать резкие скачки. Это очень мелкие животные (в длину редко превышают 1 мм), большей частью обитающие в сырых местах — почве, подстилке и даже на поверхности воды, где они питаются разлагающимися органическими веществами (детритом) и грибным мицелием. Среди ногохвосток имеется ряд типичных обитателей пещер. Многие виды сохраняют активность при низкой температуре; зимой их нередко можно обнаружить под снегом, а иногда и на снегу.

Судя по литературным данным [311], ногохвостки входят в число обычных компонентов фауны Кунгурской пещеры. Здесь они живут на поверхности глины и между камнями, встречаются на поверхностной пленке воды, где ведут себя активно, собирая с нее частицы детрита и поедая трупы насекомых. Изредка наблюдаются вспышки численности ногохвосток, которые связывают со значительным поступлением в пещеру органических веществ.

В ходе нашего обследования пещеры ногохвостки не были обнаружены. Видимо, они не являются постоянными обитателями Кунгурской пещеры, развиваясь здесь эпизодически и лишь тогда, когда для них достаточно пищи. Можно предположить, что коллемболы время от времени попадают в карстовые полости с поверхности плато и, просуществовав под землей более или менее продолжительное время, погибают. Таксономическая принадлежность найденных в пещере коллембол остается неясной.

**Жуки-прицепыши** — мелкие темноокрашенные насекомые (длина взрослых форм 1,3—4,5 мм), обитающие в незагрязненных реках и ручьях. Они живут на водных растениях или камнях, по которым передвигаются, цепляясь сильно развитыми коготками. Троглобионтные или троглофильные формы не известны. В Кунгурской пещере (центральная часть озера в гроте Дружбы Народов) обнаружена единственная очень молодая (0,6 мм) личинка жука-прицепыша, идентифицированная как *Riolus cupreus* (Muller,

1806). Личинки и взрослые жуки этого вида обычны в р. Сылве; вероятно, найденная в пещере особь занесена сюда полыми водами. В этом случае необходимо допустить, что за четыре месяца пребывания в подземном озере, прошедших с момента окончания весеннего половодья до начала исследований, личинка практически не развивалась, в то время как в р. Сылве за это время сменяется одно-два поколения жуков-прицепышей. Возможно, это связано с очень низкой температурой воды, затормозившей нормальное протекание метаболических процессов и вызвавших у нее состояние анабиоза. Если такое предположение справедливо, следует признать, что обсуждаемая личинка является типичным троглоксеном.

**Зимние комары** *Trichocera maculipennis* Mg. (определение Т. М. Кутузовой) — весьма обычный компонент энтомофауны наземных сообществ. Взрослые особи — нежные насекомые средней величины (8—10 мм), сероватого или рыжеватого цвета, с длинными тонкими ногами и дымчато-пятнистыми крыльями. Их личинки развиваются в шляпочных грибах, гниющей древесине и других формах разлагающейся органики. Для зимних комаров характерно стремление к влажным и прохладным местообитаниям: их часто находят в пещерах, угольных шахтах, колодцах и погребах, собирают на снегу во время оттепелей. Представители этого вида, помимо Кунгурской пещеры, зарегистрированы в Ординской пещере и в расщелинах между камнями на дне карстовых воронок (данные Н. Н. Панькова).

В Кунгурской пещере комары *T. maculipennis* изредка попадались в ловушки Барбера и на липкие ленты в гротах Дружбы Народов, Морское Дно, Эфирный; два трупа этих насекомых были сняты с поверхностной пленки воды Большого Подземного озера. Все пойманные особи (18 экз.) оказались самками. Скорее всего, к этому же виду относятся и комары, неоднократно упоминавшиеся в научных отчетах стационара и литературе [143, 203, 311 и др.]. В пещере они известны очень давно, по крайней мере с 1912 г., когда на них впервые обратил внимание биолог П. О. Каптерев, посчитавший этих насекомых случайным компонентом спелеофауны. Позднее [203] было установлено, что комары постоянно встречаются в теплой части пещеры, где протекает значительная часть их жизненного цикла — от кладки яиц до вылета взрослых особей. Делать выводы о существовании автономной популяции *T. maculipennis* в недрах Ледяной горы пока рискованно.

Регулярные наблюдения позволили установить, что численность комаров в подземном лабиринте связана с интенсивностью и характером эксплуатации пещеры. В значительных количествах они отмечались только в начале 80-х гг. [203], когда бригада строителей оборудовала новый маршрут между гротами Дружбы Народов и Вышка. В это время поверхность озер в гротах Атлантида, Великан, Длинный, Романтиков была усеяна множеством разлагающихся трупов насекомых; ими питались ногохвостки, которые также получили здесь массовое развитие. После завершения работ численность комаров уменьшилась до единичных экземпляров.

По-видимому, комары *T. maculipennis* являются типичными псевдотроглобионтами, использующими пещеры в качестве временных укрытий, но нельзя исключить и того, что при достаточном количестве пищи они могут превращаться и в гемитроглобионтов, чувствующих себя одинаково хорошо как в подземных, так и наземных условиях.

**Личинки комаров-звонцов** (хириномид) — исключительно разнообразная группа амфибиотических насекомых. Только в Европе известно свыше 1500 видов. Личинки хирономид широко распространены в бентосе континентальных водоемов различного типа, во многих из них составляя основу численности, биомассы и таксономического разнообразия донной фауны.

Личинки комаров-звонцов имеют червеобразное, состоящее из 13 сегментов мягкое тело с ясно обособленной жесткой головной капсулой яйцевидной формы. На голове расположены тонкие усики, глаза и ротовые органы. На первом и последнем сегментах тела с брюшной стороны имеются небольшие ложные ножки, предпоследний сегмент на спинной стороне несет пару кисточек — пучков жестких щетинок, принимающих участие в плавании. Длина зрелых личинок хирономид составляет 2—30 мм. Цвет изменчив: беловатый, кремовый, зеленоватый, ярко-красный. Крупные, ярко-красные хирономиды известны в народе под названием мотыля. Взрослые насекомые (комары), легко узнаваемые по пушистым усикам, не питаются и живут не более недели.

В Кунгурской пещере (центральная часть озера в гроте Дружба Народов) найдена единственная очень молодая (0,7 мм) личинка комара-звонца, не подлежащая более точной идентификации. Наличие хорошо развитых глаз и зеленоватая окраска тела позволяют утверждать, что она не принадлежит к числу специализированных троглобионтов. Скорее всего, это насекомое попало в пещеру во время половодья из р. Сылвы, где хирономиды весьма многочисленны и разнообразны, после чего остановилось в своем развитии или сильно замедлило его темп. Это позволяет квалифицировать личинку комара-звонца как типичного троглоксена.

**Мухи.** В литературе о жизни в Кунгурской пещере часто упоминается о мухах с удлинённым оранжевым брюшком [203]. Указанной характеристики совершенно недостаточно для того, чтобы установить их более или менее точное систематическое положение; сомнительным является даже очень широкое определение “муха”, поскольку для неспециалиста “мухой” является любое насекомое с компактным телом и прозрачными крыльями. В коллекциях Кунгурского стационара Горного института УрО РАН эти загадочные насекомые отсутствовали, поэтому невозможно понять, о каких животных идет речь [334].

Весной и летом 2003 г. в Кунгурской пещере было найдено 13 мух, 12 из которых принадлежали к семейству Helomyzidae (*Helomyza serrata* L.; определение Ю. К. Воронина) и одна — к семейству Bombyliidae (*Dischistus unicolor* Lw.). Представители первого семейства — небольшие мушки (3—5 мм) с темной спинкой и красновато-коричневым брюшком, которое на просвет нетрудно принять и за оранжевое. Их личинки — сапрофаги, питающиеся разлагающимися органическими остатками и пометом животных, реже — мицетофаги, развивающиеся в шляпочных грибах. Взрослые насекомые — обычные представители наземной энтомофауны, широко распространенные от кромки арктических льдов до пояса пустынь. Среди геломизид много обитателей нор, некоторые виды встречаются на снегу зимой. Представители рода *Helomyza*, как и некоторых других родов этого семейства, имеют обыкновение скапливаться в пещерах. Известные из Кунгурской пещеры *H. serrata* найдены также в Ординской и Зуятской пещерах, где они весьма многочисленны (данные Н. Н. Панькова).

В Кунгурской пещере эти мухи собраны не только в глубокой, теплой части пещеры, но и недалеко от входа, в зоне постоянной мерзлоты (грот Полярный, начало мая 2003 г.), где они вмерзли лапками в лед, но при этом оставались живыми. Это наблюдение наводит на мысль, что геломизиды проникают в недра Ледяной горы в весенний период через входной и, возможно, выходной туннели, когда мощный поток холодного воздуха, который им было бы трудно преодолеть, еще только формируется. Таким образом, есть все основания считать, что *H. serrata* — обычные троглофилы, использующие пещеры на одной из стадий жизненного цикла в качестве временных убежищ.

Что касается единственного представителя семейства Bombyliidae — самца *D. unicolor*, найденного в гроте Дружбы Народов, то способ и биологический смысл проникновения его в подземный лабиринт остаются загадкой. Эти мелкие (около 3,0 мм) черноватые мушки с длинными хоботками встречаются на цветах, из которых они пьют нектар, а их личинки паразитируют в кубышках саранчовых. Вероятно, мы имеем дело с эпизодом случайного заноса в пещеру явно чуждого ей организма.

#### 14.4. ПОЗВОНОЧНЫЕ ЖИВОТНЫЕ

Обитающие в Кунгурской пещере позвоночные животные относятся к двум классам — костистым рыбам (Osteichthyes) и млекопитающим (Mammalia), причем последние представлены здесь двумя отрядами: рукокрылыми, или летучими мышами (Chiroptera), и грызунами (Rodentia).

**Рыбы.** Все находки рыб в Кунгурской пещере ограничены их скелетными остатками и чешуей неустановленного возраста, захороненными в пещерной глине выше уровня подземных озер, что свидетельствует об их давнем происхождении. Отсутствие данных о живых особях или их явно современных остатках дает основание полагать, что в настоящее время рыбы в подземные гроты и галереи уже не заплывают.

Первая находка останков этих животных относится к 1934 г. Согласно сообщению В. С. Лукина, в глинистых отложениях северной части грота Геологов был найден скелет крупной рыбы, таксономическая принадлежность которой остается неизвестной. В 1971 г. при обследовании низких ходов к западу от грота Вышка II обнаружены занесенные глиной кости и чешуя двух крупных судаков *Lucioperca lucioperca* (определение В. П. Золотовой). Эти находки свидетельствуют о значительных размерах каналов, некогда связывавших галереи пещеры с р. Сылвой, по которым речная рыба во время паводков могла проникать глубоко в недра Ледяной горы [24, 203].

В 50-е гг. проводились эксперименты по интродукции речной рыбы в озеро грота Дружбы Народов, которые, однако, не увенчались успехом. Рыбки длиной 8—10 см прожили в пещере свыше трех лет, а затем исчезли. Результаты эксперимента позволяют утверждать, что условия в подземных озерах вполне подходят для жизни взрослых рыб, но их полной натурализации, по-видимому, препятствует блокада циклов воспроизводства, вызванная изоляцией от внешних условий.

**Летучие мыши.** В гипсовых пещерах Приуралья из-за особенностей их микроклимата и развития оледенения летучие мыши обычно не живут, но

часто используют их для дневок или зимовок [415]. В Кунгурской пещере рукокрылые встречаются единично; здесь их численность несравненно ниже, чем в других пещерах района Кунгура [313]. В видовом отношении они тоже менее разнообразны: среди них достоверно идентифицированы только ночницы *Myotis* sp. и ушаны *Plecotus auritus* (семейство Vespertilionidae), в то время как в других пещерах отмечено четыре вида [311]. Согласно опросным данным (свидетельства сотрудников стационара и экскурсбюро), летающие зверьки осенью и зимой наблюдаются как в туристской, так и в заповедной частях пещеры; в летнее же время они собираются в тоннелях и первых гротах (Бриллиантовый — Крестовый) только на дневку. В журнале Е. П. Дорофеева имеется запись о том, что в октябре 1984 г. одна летучая мышь встречена в выходном тоннеле, где она вела себя очень активно. Присутствие большого количества рукокрылых в пещере отмечалось лишь во время строительства выходного тоннеля, когда ее сообщение с поверхностью было свободным, но сразу после установки дверей численность летучих мышей в подземных гротах и галереях резко сократилась. Это говорит о том, что ограниченность доступа в карстовые пустоты оказывает более существенное влияние на обилие зверьков, чем беспокойство со стороны туристов.

**Грызуны.** По сообщениям сотрудников стационара и экскурсбюро, эти животные довольно часто встречаются вдоль экскурсионной тропы вплоть до грота Дружбы Народов (800 м от входа), а их следы на влажной глине выявлены и в постоянно темной удаленной части пещеры. В марте 1985 г. один из зверьков попал в мышеловку — его глаза были нормально развиты. В скважине с водой в гроте Крестовый, по сообщению Д. В. Наумкина [311], были обнаружены утонувшие полевая мышь *Apodemus agrarius* (семейство мышиных Muridae) и обыкновенная полевка *Microtus arvalis* (семейство хомяковых Cricetidae). Учитывая экологию указанных видов, едва ли можно предполагать наличие в пещере их устойчивых самовоспроизводящихся популяций. Скорее всего, эти животные попадают в пещеру с поверхности и вскоре погибают. Кроме того, согласно опросным данным, в пещере встречаются серые крысы *Rattus norvegicus* (Muridae), которые могут питаться мусором, скапливающимся вдоль экскурсионных троп, а также овощами, хранящимися зимой в одном из ближних гротов.

По данным Е. П. Дорофеева, однажды через открытые зимой для вентиляции двери тоннеля в пещеру забегал колонок *Mustela sibirica*. В марте 2004 г. в гроте Бриллиантовый О. И. Кадебской найден мертвый юрок *Fringilla montifringilla*. Эти факты, несмотря на их случайный характер, представляют определенный интерес.

Завершая краткий обзор населения Кунгурской пещеры, отметим ряд его интересных особенностей. В составе флоры и фауны пещеры сравнительно богато представлены группы геми-, псевдо- и тихотроглобионтных организмов. Это вполне закономерно, если учесть широкое сообщение подземного лабиринта с поверхностью Ледяной горы, а в половодье — с р. Сылвой.

К *гемитроглобионтам*, обитающим в сходных биотопах как в пещерах, так и на поверхности земли и не имеющих специальных адаптаций к подземному образу жизни [40], относятся сапрофитные бактерии, плесневые и некоторые шляпочные грибы, некоторые детритоядные беспозво-

ночные — нематоды, малощетинковые черви, коллемболы и, вероятно, остракоды.

К псевдотроглобионтам, использующим пещеры в качестве временных убежищ и совершающих часть жизненных отправлений на дневной поверхности, принадлежат летучие мыши, мухи *H. serrata*, зимние комары *T. maculipennis*.

Группу тихотроглобионтных организмов (троглоксенов), попадающих в пещеры случайно и довольно скоро в них погибающих, составляют *coli*-формные бактерии, некоторые шляпочные грибы, личинки жуков *R. cupreus*, хирономиды, мухи *D. unicolor* и грызуны. К этой же группе следует отнести и личинок паразитических клещей-краснотелок Trombididae, оказавшихся в недрах Ледяной горы не по своей воле и не имеющих шансов завершить там свои жизненные циклы.

Эксплуатация пещеры человеком определяет еще один важный аспект жизни в ней. Именно антропогенный фактор обуславливает наличие в недрах Ледяной горы устойчивых популяций зеленых растений (мхов и водорослей), существующих здесь только благодаря искусственному освещению. Транспортировка в карстовые пустоты различного рода органических материалов оказывает мощное воздействие на динамику гетеротрофной микрофлоры и животных-сапрофагов, периодически вызывая бурное развитие плесеней и вспышки численности насекомых (коллембол и зимних комаров).

Наконец, третья особенность Кунгурской пещеры, отличающая ее от многих других пещер мира, состоит в том, что ее фауна исключительно бедна эутроглобионтными животными, узко приспособленными к подземному образу жизни. Среди специализированных троглобионтов Кунгурской пещеры имеется единственный вид беспозвоночных — бокоплав *C. chlebnikovi*. Несомненно, это связано с особенностями географического положения пещеры и геологической историей прилежащих территорий. Наряду с некоторыми другими пещерами Кунгурского края она является самым северным форпостом распространения эутроглобионтных животных не только в Европе, но и в мире в целом. Севернее крапгониксов Хлебникова проникают только бокоплавы *Synurella*, населяющие грунтовые и поверхностные воды [40] и обладающие более высокой вагильностью, позволившей им сравнительно быстро расселиться по значительной территории, покинутой ледником.

## Глава 15

# ЭКСПЕРИМЕНТЫ В КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЕ

Кунгурская пещера представляет собой естественный полигон для изучения особенностей строения, закономерностей развития карстовых массивов, а также опробования различных методов исследования подземных пространств [34, 83, 142, 155, 266, 268, 274 и др.].

### 15.1. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ ПЕЩЕРЫ

За 40 лет в районе пещеры выполнены разнообразные наземные и подземные геофизические исследования (табл. 15.1), однако их результаты не были обобщены.

Таблица 15.1  
Геофизические наблюдения на Ледяной горе и в Кунгурской пещере

Методы исследований		Автор и год проведения	Десятилетия					
Группы	Виды работ		1951— 1960	1961— 1970	1971— 1980	1981— 1990	1991— 2000	После 2000 г.
НИ	ЭП	В. С. Полевой, 1956	+					
НИ	ВЭЗ	В. С. Полевой, 1956	+					
НИ	ЭП, ПС	А. А. Смирнов, 1958	+					
НИ	ЭП	А. А. Огильви, 1956; Б. К. Матвеев, 1958	+					
НИ	ВЭЗ	Б. К. Матвеев, 1963		+				
ИИ	РП	А. С. Алешин и др., 1965		+				
ИИ	ПРКИ	А. С. Алешин и др., 1965		+				
ИИ	МВП	А. С. Алешин и др., 1965		+				
НИ	Переинтерпретация ЭП	Б. К. Матвеев, 1993		+				
ИИ	Гр	В. И. Солуха, 1978		+				
ИН	Термометрия	Кунгурский стационар			+			
ИИ	Наклономерные	В. И. Солуха, 1978			+			
ИИ	Температура пород	Кунгурский стационар			+			
НИ	Карта $\alpha$	В. М. Шувалов, 1977, 1979			+	+		
НИ	ВЭЗ	Б. К. Матвеев, 1994					+	
ИИ	ПС	Б. К. Матвеев и др., 1997						
НИ	Сейсмометрические	А. А. Маловичко, 1998, 2003						+

Примечание. Группы методов: НИ — наземные; ИИ — интерскопические (замеры в Кунгурской пещере). Виды исследований: ЭП — электромагнитное профилирование; ПС — методом естественного электрического поля; ВЭЗ — вертикальное электромагнитное зондирование; РП — радиопросвечивание; ПРКИ — метод подземной регистрации космических излучений; сейсмометрия: МВП — метод преломленных волн (с ударным возбуждением колебаний); Гр — гравиметрическая съемка

Условия проведения геофизических исследований в пещере имеют ряд особенностей.

Для Ледяной горы характерен многослойный геоэлектрический разрез: *первый слой* соответствует антропогенным отложениям (кажущиеся удельные электрические сопротивления 50—150 Ом·м), *второй* — глыбовым брекчиям неогена-антропогена (700 Ом·м), *третий* — закарстованной толще пермских гипсов и ангидритов (4000 Ом·м), *четвертый* — карбонатной толще филипповского горизонта (300—400 Ом·м).

Интерпретация наблюдений осложняется также рельефом Ледяной горы (крутые 60-метровые обрывы и многочисленные крупные карстовые воронки на поверхности) и подземной закарстованностью (известные и неизвестные гроты пещеры, разрушенные зоны над нею). В таких условиях трудно рассчитывать на однозначную карстологическую интерпретацию материалов [147, 285 и др.]. Несмотря на это, Кунгурская пещера неоднократно использовалась для постановки опытно-методических геофизических работ.

В 1953—1954 г. институт “Гидропроект” выполнил геологические и геофизические исследования по трассе высоковольтной линии Пермь — Свердловск на участке Кунгурской пещеры. На основании анализа графиков кажущихся удельных сопротивлений и данных интерпретации кривых вертикального электрического зондирования (КВЭЗ) В. С. Полевой [349] выявил зоны повышенных и пониженных кажущихся сопротивлений. Зоны повышенных и высоких кажущихся сопротивлений соответствуют проекциям гротов Кунгурской пещеры. Исключение составляют лишь некоторые гроты в Заозерной части пещеры, проекциям которых частично соответствуют зоны пониженных кажущихся сопротивлений (рис. 15.1), что объясняется развитием глинистых отложений над ними. Господствующая трещиноватость в толще Ледяной горы имеет направление 335°.

Данные электроразведки на Ледяной горе приняты за эталон при анализе профилей кажущихся удельных сопротивлений, полученных в различных пунктах трассы ЛЭП. В результате участок второй цепи ЛЭП длиной 10 км был перенесен на 3 км к западу от пещеры [419].

В 1954 г. П. П. Поболь выполнил вертикальное электрическое зондирование в гротах Кунгурской пещеры (Геологов, Колизей и Смелых), в результате чего определен характер отложений, слагающих днище. В восточной части грота Геологов первый горизонт мощностью около 1 м представлен брекчией коренных пород с большим содержанием глинистых отложений. Его истинное удельное сопротивление 38 Ом·м (рис. 15.2). Ниже залегают водонасыщенные карбонатные породы с удельным сопротивлением около 350 Ом·м. По данным ВЭЗ мощность рыхлых и обвальных отложений в гроте Геологов составляет 8 м.

В 1956 г. кафедра геофизики МГУ на небольшом участке р. Сылвы в районе пещеры провела детальные речные и наземные исследования естественного электрического поля (рис. 15.3 [371]) в период летне-осенних паводков. В результате было подмечено естественное регулирование речного стока и выявлено, что происходит взаимообмен между речными, подземными и пещерными водами района Кунгурской пещеры:

— участки долины реки, сложенные сульфатными породами, отличаются положительными значениями потенциалов электрического поля, а

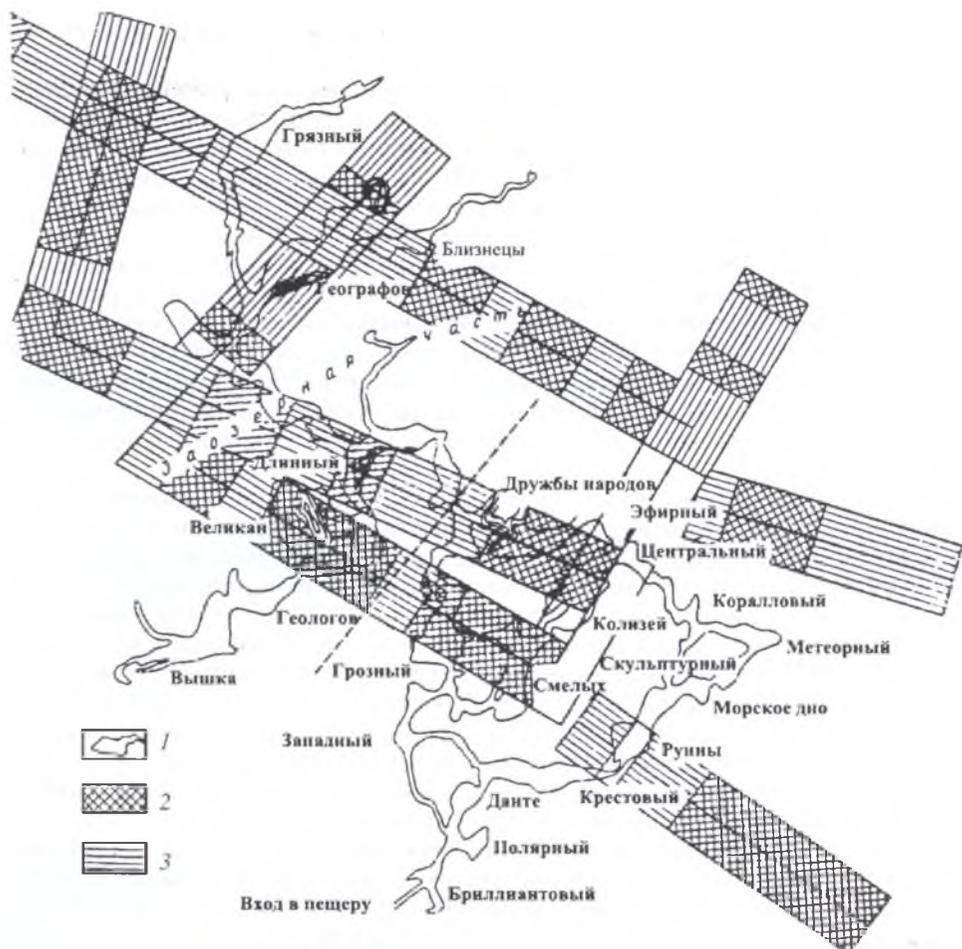


Рис. 15.1. План Кунгурской ледяной пещеры (1) и зон кажущихся удельных сопротивлений: повышенных (2) и пониженных (3) (по материалам В. С. Полевого [419])

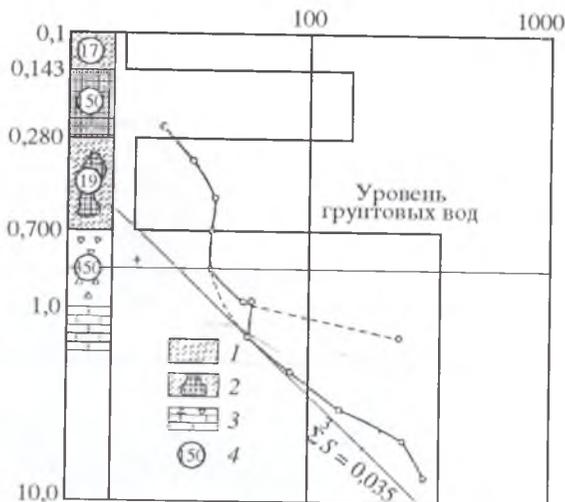
состоящие из карбонатных пород — отрицательными: при смене карбонатных пород сульфатными и увеличении их мощности на графиках появляются локализованные минимумы, говорящие о большой разрушенности сульфатных пород и утечке речных вод в закарстованное и трещиноватое ложе реки;

— у Кунгурской пещеры в гипсоангидритовых породах выявлена зона минимумов потенциала, связанная с фильтрацией речных вод в сторону Ледяной горы; зоны максимумов свидетельствуют о существовании на дне реки субаквальных источников из толщи филипповских доломитов;

— выше уровня подземных вод карстовые полости, заполненные крупнообломочным материалом, фиксируются так же, как незаполненные.

В 1956—1957 гг. по инициативе А. А. Огильви отрядами Североуральской геофизической экспедиции МГУ (О. В. Аведьян) и кафедрой геологии

Рис. 15.2. Кривая кажущихся удельных сопротивлений рыхлых отложений в гроте Геологов (по материалам В. С. Полевого [419]). 1 — суглинок; 2 — глыбы брекчии в глинистых отложениях; 3 — сульфатные и карбонатные породы; 4 — удельные сопротивления, Ом·м



ПГУ (О. Л. Тарунина) над Кунгурской пещерой было выполнено площадное электропрофилирование на постоянном токе с разносами АВ = 250 и АВ = 500 м. Длина профилей составляла 1000—1200 м при расстоянии между ними 50—100 м. Результатом этих работ стала карта изоом для разноса АВ = 500 м, которая была сопоставлена с планом пещеры [283]). Электро-

разведочные исследования проводились по системе параллельных профилей с азимутом 110°, проложенных примерно вкрест простирания пород и основных карстовых нарушений.

При исследованиях были использованы различные модификации электропрофилирования и электрического зондирования. Профилирование проводилось с помощью установок симметричной АА'МNB'В, комбинированной АА'МNB'В. Разносы питающих электродов выбраны равными 200, 500 и 750 м. Длина измерительной линии менялась от 30 до 50 м при шаге профилирования 10 м. Симметричное зондирование с разносами АВ = 1000 м выполнялось примерно через каждые 100 м. В точках максимальных и минимальных сопротивлений было построено несколько трехэлектродных КВЭЗ.

В результате обработки полевых материалов были построены карты сопротивлений, геоэлектрические разрезы и разрезы кажущихся сопротивлений (рис. 15.4—15.5). Наиболее четко результаты исследований представлены на карте сопротивлений для разноса АВ = 500 м и на разрезах кажущихся сопротивлений. Повышенные сопротивления обусловлены влиянием карстовых нарушений. Изолинии кажущихся сопротивлений 400 Ом·м и более удовлетворительно оконтуривают участки расположения основных гротов Кунгурской пещеры. К востоку и западу от известных полостей пещеры наблюдаются зоны подобных аномалий, вероятно, это крупные карстовые полости, которые после обрушения соединительных ходов выделились в самостоятельные зоны. На карте изоом можно выделить три аномальные зоны: центральную, восточную и западную.

Центральная зона объединяет аномалии, обусловленные влиянием полостей Кунгурской пещеры. Самый южный профиль IV—IV проходит через гроты Данте, Полярный, Западный и Вышка. Над ними наблюдаются повышенные значения сопротивлений. В 100 м юго-восточнее грота Вышка отмечается аномалия над полостью, которая протягивается на северо-восток и соединяется с аномалией над гротом Геологов, где наблюдается узел аномалий ( $\rho_k = 800—900$  Ом·м). Отсюда полоса высоких сопротивле-

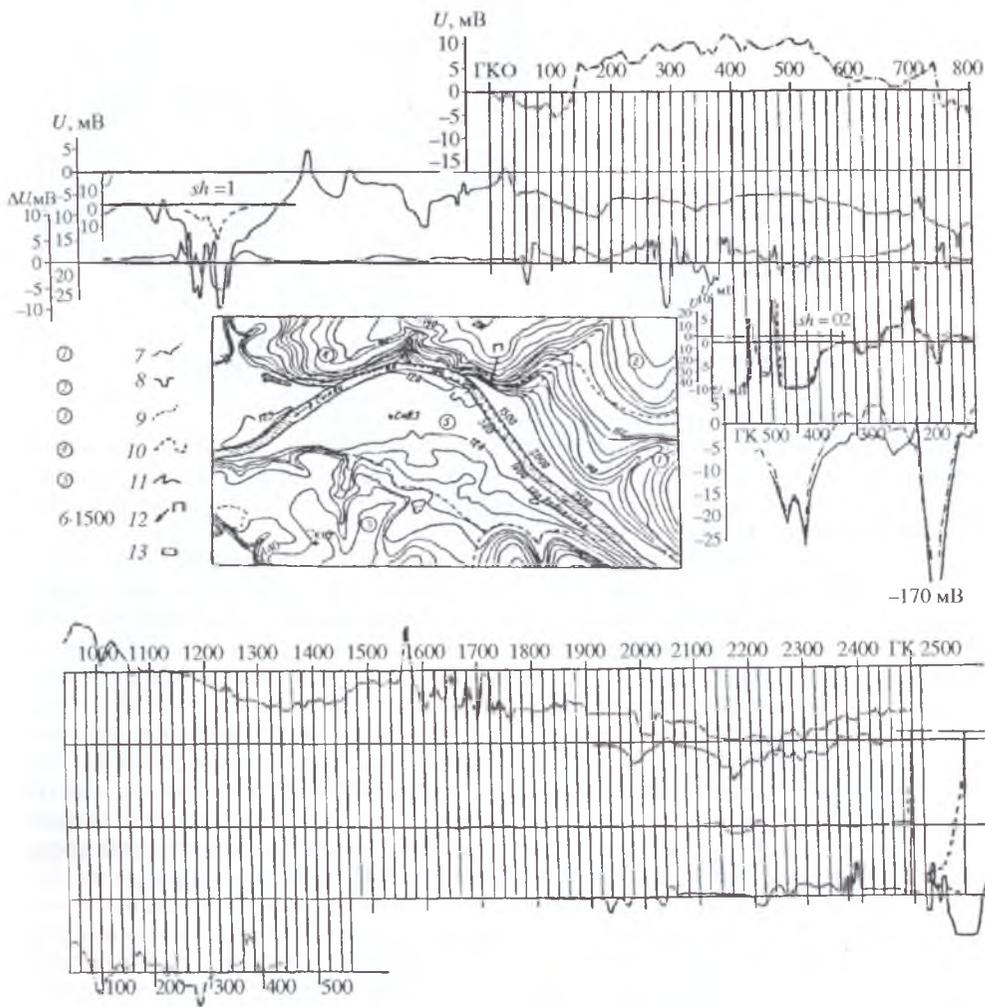


Рис. 15.3. Профили естественных потенциалов по руслу р. Сылвы [371].  
 1 — известняки, 2—4 — гипсоангидриты, 5 — четвертичные отложения; 6—11 — точки наблюдений методом естественных потенциалов: 6 — привязки, 7 — наземных исследований, 8 — русловых исследований, 9—11 — повторных исследований; 12 — вход в пещеру, 13 — водокачка

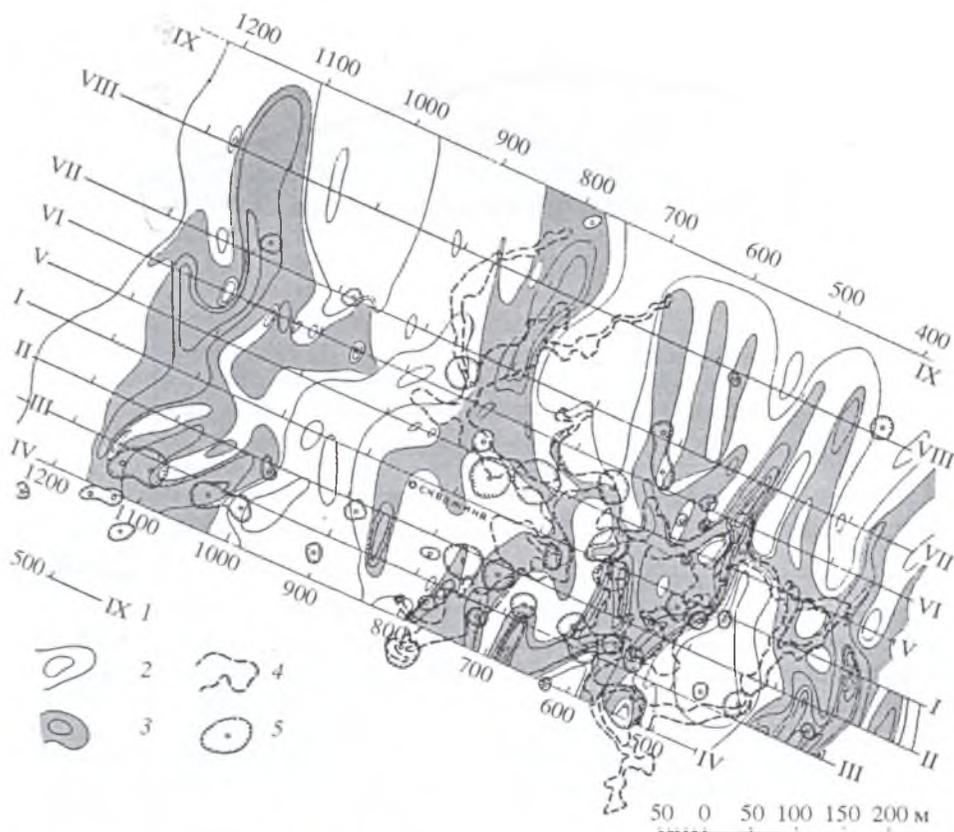


Рис. 15.4. Карта изоом с нанесенными на нее контурами пещеры [323].

1 — линии профилей с нанесенными на них пикетами; 2 — изолинии кажущихся сопротивлений; 3 — участки высоких кажущихся сопротивлений (400 Ом·м и более); 4 — контуры пещеры; 5 — карстовые воронки

ний (400 Ом·м и более) протягивается на юг и проходит над гротами Грозный, Западный. Далее полоса аномалий идет в двух направлениях: на север — к гроту Дружбы Народов и на северо-восток через гроты Смелых, Колизей — к большой аномалии над гротом Эфирный.

Все аномалии прослеживаются и за пределами разведанной части пещеры. Особенно большая аномалия в виде узкой полосы тянется от грота Эфирного на северо-восток и достигает максимума на 20—30 м северо-восточнее его центра. Поэтому можно полагать, что грот Эфирный является частью более обширной карстовой полости. Целики слабозакарстованных пород между гротами Геологов, Дружбы Народов, Эфирным и Колизеем отличаются низкими сопротивлениями (300—200 Ом·м). Аномалия над гротом Вышка прослеживается на северо-востоке в виде полосы высоких сопротивлений (400 Ом·м и более). Эта полоса протягивается над гротом Великан, затем резко поворачивает на север и, расширяясь, соединяется с областью высоких сопротивлений над гротом Географов.

Высокие сопротивления отмечаются почти над всеми известными гротами и галереями заозерной части пещеры, за исключением гротов Грыз-

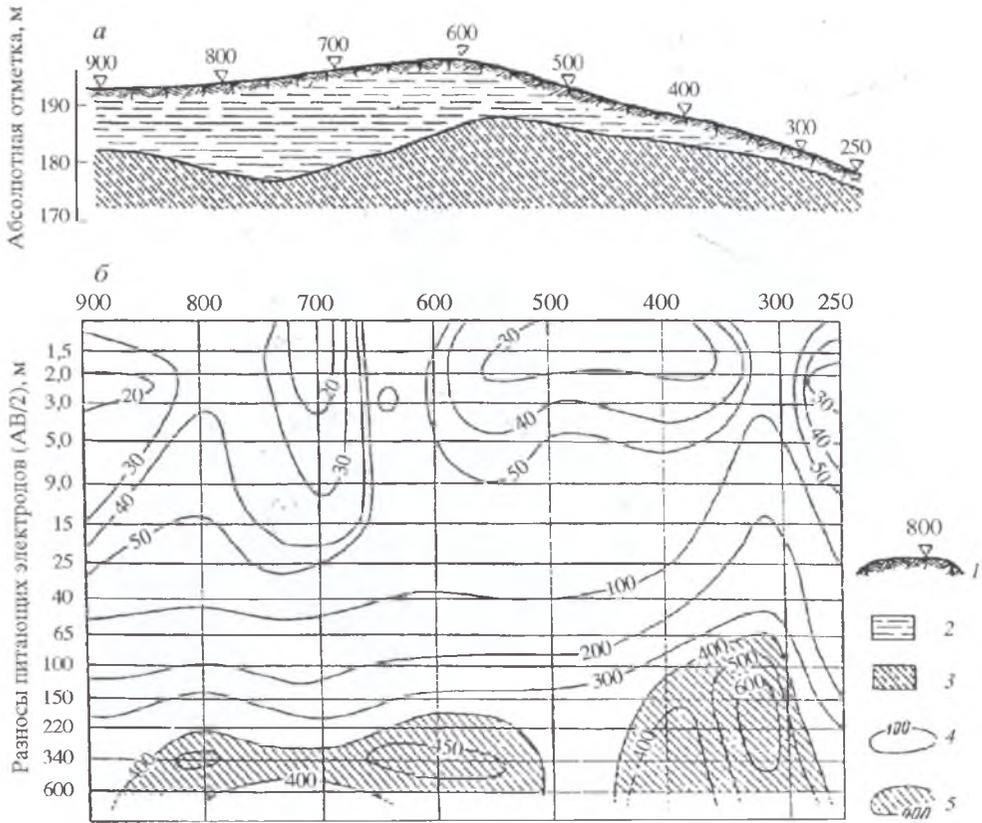


Рис. 15.5. Геоэлектрический разрез (а) по профилю I-I (мощность суглинков установлена по данным электрических зондирований) и разрез кажущихся сопротивлений по тому же профилю (б).

1 — рельеф поверхности и номера пикетов; 2 — четвертичные суглинки и их среднее сопротивление ( $\rho = 24 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ); 3 — толщина гипсоангидритовых пород; 4 — изолинии кажущихся сопротивлений; 5 — участки высоких кажущихся сопротивлений (400 Ом·м и более)

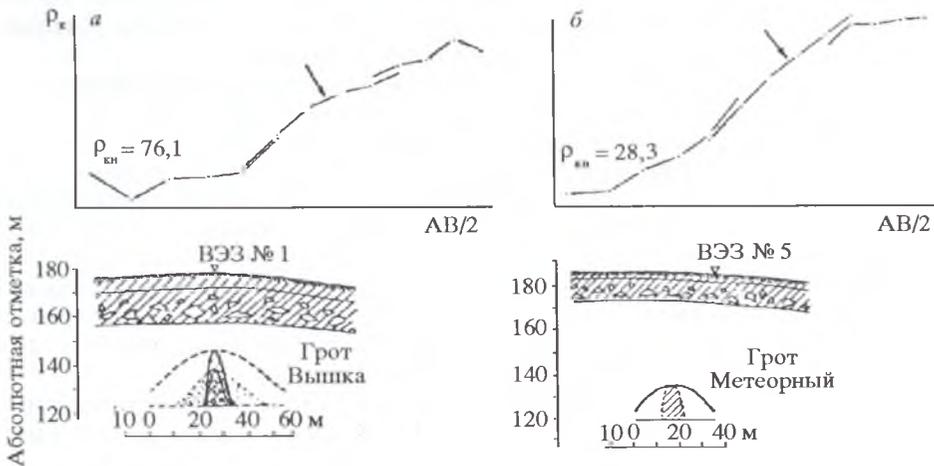


Рис. 15.6. Кривые ВЭЗ над гротами Вышка (а) и Метеорный (б)

ный и Близнецы. От грота Географов на юг ответвляется другая полоса высоких сопротивлений, оконтуренная изолинией 400 Ом-м. По форме и величине сопротивлений она сравнима с аномалиями над известными гротами пещеры.

*Западная зона* аномалий отделена от центральной полосой низких сопротивлений, соответствующих слабозакарстованным породам. Ее ширина колеблется от 100 до 150 м. Западная зона высоких сопротивлений простирается на СВ до профиля VII—VII, а затем круто поворачивает на север и на профиле IX—IX уже не отмечается. Однако по данным электрического зондирования она тянется за пределы разведанной части пещеры. Аномалии западной зоны, вероятно, обусловлены влиянием системы карстовых полостей, размеры которых сопоставимы с Кунгурской пещерой.

*Восточная зона* аномалий отделена от центральной узкой 50-метровой полосой низких сопротивлений, простирающейся в северо-восточном направлении. Аномалии сопротивления частично приурочены к известным гротам пещеры: Коралловому, Метеорному, Морское Дно, Скульптурному. Наибольшие значения сопротивлений (700—1000 Ом-м) наблюдаются к югу и северо-востоку от грота Метеорного и вызваны влиянием крупных карстовых нарушений.

Анализ электроразведочных материалов позволяет сделать вывод о том, что западнее пещеры находится мощная закарстованная зона (система карстовых полостей). Этот вывод подтверждается наличием крупных карстовых воронок, расположенных цепочкой в южной части выделенной зоны, вдоль склона Ледяной горы. Здесь, в районе Медвежьего лога, вероятно, находится неразведанная западная часть пещеры. Для ее поисков необходимо провести более детальные геофизические работы [284]. Геоэлектрический разрез свидетельствует о сложном рельефе кровли коренных отложений в районе пещеры (рис. 15.5).

Наряду с электропрофилеированием на всех профилях было проведено симметричное зондирование с максимальными разносами АВ до 2000 м. Точки ВЭЗ располагались через 80—100 м друг от друга. На некоторых аномальных участках были выполнены несимметричные круговые ВЭЗ, но расшифровка их результатов оказалась весьма трудной. Кривые ВЭЗ, полученные непосредственно над известными полостями, имеют характерный вид: начиная с некоторого разноса их правые ветви круто поднимаются вверх под углом большим чем  $45^\circ$  и образуют выпуклый изгиб. Резкое повышение кажущихся сопротивлений обусловлено увеличением плотности тока над полостью, обладающей практически бесконечно большим удельным электрическим сопротивлением.

Большинство кривых ВЭЗ имеют сложный вид и не поддаются количественной интерпретации с помощью теоретических палеток. Удалось обработать только их левые ветви, в результате чего были получены мощности четвертичного покрова и построены геоэлектрические разрезы (рис. 15.6). По ним можно составить представление об изменении мощностей покровных отложений на всей территории закарстованного участка.

В 1958 г. кафедра геофизики МГУ применила для изучения влияния подземных полостей Кунгурской пещеры и целиков породы на распространение радиоволн методы высокочастотной электроразведки [410]. Радиокomпарационный метод (“радиокип”) основан на изучении полей широко-

вещательных радиостанций. Методика наблюдений сводится к измерению напряженности этих полей на поверхности земли и в пещерах. Для проведения измерений используется чувствительный батарейный радиоприемник с магнитной антенной на входе и индикатором напряженности на выходе. Этим требованиям удовлетворяют выпускаемые промышленностью измерители радиопомех ИП-12М или ИП-25, а также специально разработанный полупроводниковый измеритель напряженности поля (ПИНП).

Применение магнитных или ферритовых антенн позволяет измерять разные составляющие радиополя. Установив рамочную антенну горизонтально, измеряют вертикальную составляющую поля ( $H_z$ ), установив рамку вертикально и вращая ее вокруг вертикальной оси до получения максимального сигнала, получают максимальную горизонтальную составляющую поля ( $H_p$ ). Эти компоненты поля измеряли на каждой точке.

Структура и интенсивность электромагнитного поля длинноволновой радиостанции при расстояниях свыше 100 км определяется электрическими свойствами пород верхней части разреза. Чем больше открытая пустотность и закарстованность массива, тем больше кажущееся удельное электрическое сопротивление пород и радиополе несколько глубже проникает в землю. Наличие обводненных полостей, а также трещиноватых пород с глинистым заполнителем приводит к занижению кажущегося электрического сопротивления массива, уменьшению глубины проникновения энергии и интенсивности поля в породах.

Просвечивание проводилось с помощью маломощного генератора, работающего на частотах 150, 300, 1200 и 2500 кГц с использованием радиостанции на волне 1980 м (г. Уфа). Были установлены три генератора — в гротах Заозерный, Геологов и Смелых. Напряженность поля измеряли через 5—15 м во всех соседних гротах между ними с помощью измерителя радиопомех ИП-12М и рамочной антенны. Для уменьшения влияния обходной волны, создаваемой осветительной линией, замеры брали на расстояниях до 2—3 м от проводов.

Радиопросвечивание пород между Заозерным гротом и серией гротов от Эфирного до Грозного не дало ярких аномалий напряженности поля. Количественная обработка материалов показала, что наибольшее кажущееся электрическое сопротивление (около 4000 Ом·м) и наименьшая относительная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) получены между гротами Колизей и Заозерный. Это объясняется большой закарстованностью гипсов между этими гротами. Наилучшее прослушивание станции “Уфа” наблюдалось в гротах Геологов, Метеорном и Колизей. Напряженность поля оказалась меньше в увлажненных и небольших гротах: Морское Дно, Грозный, Западный и др.

Между гротами Заозерный и Смелых кажущееся сопротивление оказалось ниже (2000—3000 Ом·м), а кажущаяся диэлектрическая проницаемость достигла 10, что свидетельствует о меньшей пустотности и большей увлажненности гипсов. Просвечивание из грота Геологов в грот Смелых дало примерно те же результаты, а целик породы между этими гротами в электрическом отношении характеризуется однородностью. Измерение в гротах Смелых, Западном и Метеорном показало плавное возрастание напряженности, поэтому заметных аномалий на кривых напряженности поля выделить не удалось.

Зимой 1964 г. кафедра геофизики МГУ выполнила комплексные геофизические работы внутри Кунгурской пещеры: радиоволнового просвечивания (радиокип), ПРКИ (подземной регистрации космического излучения) и микросейсморазведки [5]. Их задачей было опробование новых измерительных приборов ПИНП-2.

**Метод радиокип.** Часть пещеры, оборудованная для экскурсий, мало пригодна для исследований из-за наличия проводов осветительной сети, поэтому результаты получены лишь в ее Заозерной части. Значительное отклонение радиопеленга станции “Уфа” (до 30—40°) отмечено в отдельных точках наблюдений севернее грота Грязный и входа в грот Географов, а также в ряде точек в гроте Вышка I, причем изменение радиопеленга сопровождалось увеличением  $H_z$  и  $H_p$  в 5—7 раз. Изменение радиопеленга могло быть связано с экранирующим влиянием расположенных поблизости больших полостей, а увеличение интенсивности сигнала объясняется наличием крупного разрывного нарушения между экскурсионной и заповедной частями пещеры.

**Метод ПРКИ** разработан А. Г. Тарховым и В. М. Бондаренко для изучения локальных плотностей неоднородностей и определения средней плотности вышележащей толщи. При изучении пещер он использован впервые. При опробовании метода в пещере стояли две задачи: получение данных для градуировки прибора и изучение влияния карстовых пустот на интенсивность космического излучения. Профиль длиной 250 м был проложен от грота Дружбы Народов до грота Смелых, а замеры произведены в семи точках по профилю.

На основе полученных данных построены графики зависимости интенсивности космического излучения от места наблюдения. Все графики нормированы на максимальное значение интенсивности в пункте № 7—8 близ входа в пещеру и совмещены с вертикальным разрезом пещеры (рис. 15.7). На кривых отчетливо прослеживаются общее уменьшение интенсивности космической радиации по мере продвижения в глубь пещеры (точки 2, 5 и 6); локальные экстремумы интенсивности, характеризующие зоны различной сохранности и средней плотности пород; уменьшение интенсивности в средней части профиля (точки 1—4), свидетельствующее о меньшей закарстованности этой части массива; влияние рельефа невелико (кривые 8 и 10); кривая, соответствующая апертурному углу 36°, наиболее четко отмечает плотностные аномалии, связанные со степенью закарстованности. По локальным максимумам интенсивности космического излучения можно выявить местонахождение неизвестных карстовых пустот и разрушенных зон.

При апертурном угле 36° оптимальное количество частиц, необходимых для получения погрешности не более 10 %, равно приблизительно 100. Из-за большой средней плотности покрывающих пород (2,4 г/см<sup>3</sup>) и их значительной мощности (до 75 м) для регистрации такого количества частиц необходима экспозиция прибора от 1,5 до 2 ч, поэтому производительность метода невысока.

**Метод микросейсморазведки.** В Кунгурской пещере были проведены опытные работы по опробованию одноканальной сейсмической установкой ОСУ-2м с ударным возбуждением колебаний, разработанной на кафедре геофизики МГУ. Решались две задачи: изучение разрезов под гро-

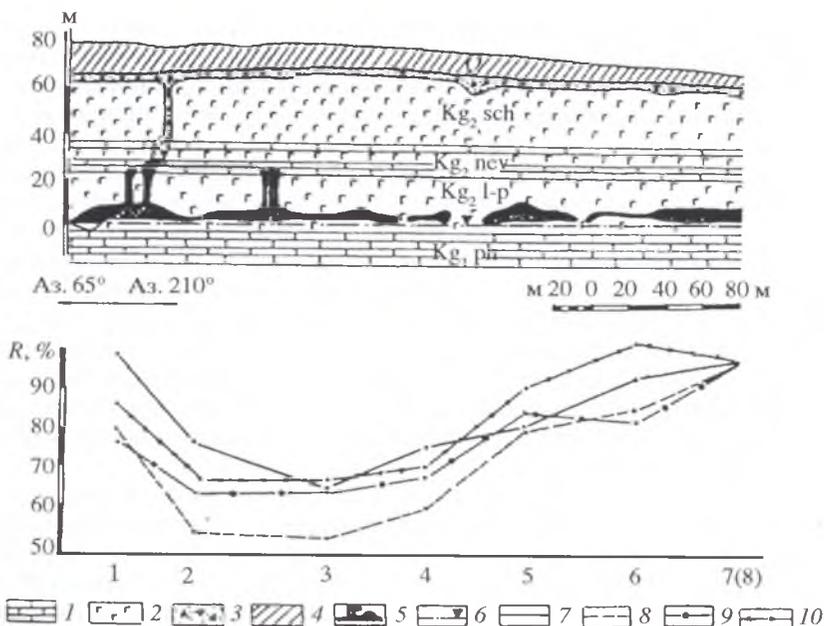


Рис. 15.7. Сопоставление кривых регистрации космического излучения с геологическим разрезом Ледяной горы.

1 — известняки и доломиты; 2 — гипсы и ангидриты; 3 — карстовая брекчия; 4 — четвертичные отложения; 5 — карстовые полости; 6 — уровень подземных вод; кривые ПРКИ для апертурного угла: 7 — 36°, 8 — 66°, 9 — 110°, 10 — 66° с поправкой на рельеф

тами пещеры и определение глубины залегания доломитов филипповской свиты. Методика работ состояла в определении времени добегания сейсмических волн от пункта возбуждения до сейсмоприемника, который передвигали вдоль профиля. В качестве источника сейсмических колебаний использовался удар кувалдой весом 5 кг. Волновая картина наблюдалась на экране электроннолучевой трубки.

Работы проводили в гроте Дружбы Народов, где был разбит профиль длиной около 30 м. Так как породы здесь залегают почти горизонтально, интерпретировать данные можно по одиночному годографу, а он свидетельствует о наличии трех слоев со скоростями в них 200, 1400 и 4000 м/с: верхний слой (1,7 м) соответствует обломочному материалу со слабо уплотненным глинистым заполнителем, средний (6,3 м) — обводненному обломочному материалу, нижний — кровле филипповских доломитов.

Для определения степени сохранности и прочностных свойств пород производилось сейсмическое “просвечивание” целиков между гротами Дружбы Народов и Центральный, Дружбы Народов и Заозерный. Скорость распространения продольных волн по целикам равна 3600 м/с, а поперечных — 2100 м/с. Измерения в лаборатории на образцах с помощью сейсмоскопа ИПА показали, что скорости продольных волн во всех случаях выше, чем по результатам полевых работ (4900 и 5500 м/с). Это можно объяснить значительной раздробленностью массива [5]. Методы сейсморазведки позволяют определить мощность рыхлых и обломочных отложений на дне пещеры. Для грота Дружбы Народов она равна 8 м.

В 1964 г. данные геофизических исследований в Кунгурской пещере были несколько уточнены при повторной камеральной обработке материалов. На основе детальной топографической съемки пещеры в масштабе 1:500, выполненной сотрудниками Кунгурского стационара в 1964—1965 гг., произведено новое сопоставление карты изоом с планом пещеры, более полно учитывающее ее морфологию и расположение отдельных гротов. На карте четко выделяются две зоны повышенных сопротивлений (более 400 Ом·м): центральная и западная.

*Центральная зона* шириной 600 м и длиной 500 м приурочена к разведанной части пещеры и удовлетворительно оконтуривает ее известные ходы. Направление простирания “языков” аномалий совпадает с простиранием основных трещиноватых зон. Наиболее высокие значения сопротивлений (до 900 Ом·м) наблюдаются над самыми обширными гротами (Вышка I, Великан, Грязный, Географов, Геологов). Некоторые языки аномалий распространяются значительно дальше известных гротов и, очевидно, связаны с их неразведанными продолжениями. В гротах, расположенных вблизи входа в пещеру, при разnose АВ = 500 м не отмечены повышенные значения  $\rho_k$ , что можно объяснить влиянием рельефа. В этом случае при интерпретации данных профилирования целесообразно построение карты градиентов кажущихся сопротивлений [75].

*Западная зона* расположена в 150—200 м от центральной. Ширина ее составляет примерно 200 м. С северо-запада и юго-востока выходит за пределы участка съемки. По величине кажущихся сопротивлений, форме и направлениям простирания аномалий сходна с центральной. Наличие на поверхности Ледяной горы полей карстовых воронок дает основание предполагать, что она фиксирует закарстованную зону, сходную с разведанной частью Кунгурской пещеры.

В 1966 г. Институт геофизики УФАН СССР начал цикл наблюдений в Кунгурской пещере и на поверхности Ледяной горы.

Гравиметрические исследования. В пещере и на поверхности Ледяной горы проведены опытные наземная и подземная гравиметрические съемки с помощью высокоточного кварцевого гравиметра КВГ [378]. Установлено, что породы Ледяной горы имеют разную плотность (табл. 15.2). Расчетная средневзвешенная плотность пород разреза  $2,4 \text{ г/см}^3$ , замеры на поверхности дали среднюю величину  $2,3 \text{ г/см}^3$ , что

Таблица 15.2  
Плотность пород Ледяной горы (по данным гравиметрических наблюдений в воронках на поверхности)

Пачка, свита	Порода	Средняя мощность, м	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>
Четвертичные	Суглинки, глины	10	1,9
	Крупные глыбы	10	2,3*
Шалашнинская	Гипс	27	2,3
Неволинская	Доломит, известняк	4	2,7
Ледянопещерская	Ангидрит, гипс	10	2,5
	Ангидрит	18	3,0
Филипповская	Доломит, известняк	50	2,7

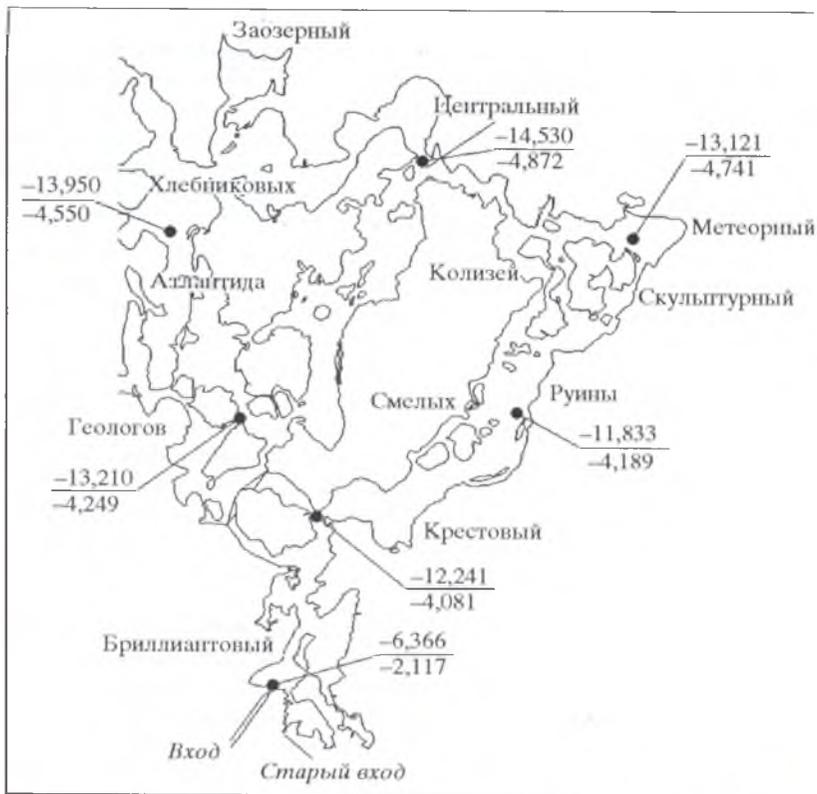


Рис. 15.8. Результаты гравиметрических работ в Кунгурской пещере.

● — опорные пункты гравиметрических наблюдений (приращение силы тяжести: числитель — на поверхности, знаменатель — под землей)

близко к расчетной. Наличие пустот должно сказаться на результатах, при условии если полости располагаются выше или ниже уровня наблюдений.

Для выявления подземных полостей в разрезе проведены гравиметрические работы в пещере и на поверхности Ледяной горы. Наблюдениями была охвачена вся ближайшая часть к бровке склона пещеры. Опорные пункты образовали четыре полигона (рис. 15.8) и наблюдения на них проводились трехкратно (невязки не превышали 0,057 мгл, средняя ошибка приращения сторон  $\pm 0,03$ ). Рядовые пункты наблюдений располагались между опорными, и измерения проводились однократно (ошибка  $\pm 0,05$  мгл).

Пункты подземных наблюдений были вынесены на поверхность, где работы проводились однократно (ошибка менее  $\pm 0,10$  мгл). Наземные и подземные наблюдения были приведены к одному уровню. За расчетный принят средний меженный уровень р. Сылвы.

По данным поверхностной съемки пещерные полости в разрезе не отмечаются. Подземные наблюдения показали, что крупные гроты образуют аномалии до 0,5 мгл. Для расчета величины пустотности Ледяной горы

между двумя уровнями наблюдений (1 — на поверхности и 2 — под землей) использована формула

$$\sigma = (\Delta g_{1-2} + 0,3086h)/0,0836h, \quad (15.1)$$

где  $\sigma$  — средняя плотность между уровнями 1 и 2;  $\Delta g_{1-2}$  — разность наблюдаемых ускорений силы тяжести на уровнях 1 и 2;  $h$  — разность высот уровней 1 и 2 (м). Весь исследуемый участок характеризуется средней плотностью  $2,01 \text{ г/см}^3$ , что ниже расчетной. Плотности пород по линиям, удаленным от склона, составляют  $2,06$ — $2,11 \text{ г/см}^3$ , по линиям, расположенным ближе к склону —  $1,91$ — $2,02 \text{ г/см}^3$ . Вариация плотностей везде незначительна ( $0,009$ — $0,044 \text{ г/см}^3$ ). Средняя расчетная плотность по западной и центральной линиям составляет  $2,09 \text{ г/см}^3$ , разность между расчетной и фактической плотностями —  $0,21 \text{ г/см}^3$ , что обусловлено наличием пустот в разрезе. Степень пустотности составляет  $9,0\%$ , мощность разреза по западной и центральной линиям —  $67 \text{ м}$ . Если считать, что пустоты заполнены только воздухом (плотность  $0,001 \text{ г/см}^3$ ), то их высота не должна превышать  $6 \text{ м}$ , что соответствует средним размерам гротов пещеры.

Средняя плотность пород разреза несколько меньше минералогической плотности, что указывает на загипсованность ангидритов на участке пещеры. Уменьшение средней плотности от водораздела к склону горы в периферийных частях разреза обусловлено разрушенностью пород и наличием глинистого материала, в центральной — наличием полостей Кунгурской пещеры.

Температурные наблюдения. Высокочувствительным термографом ( $0,002 \text{ }^\circ\text{C}$  на  $1 \text{ мм}$  смещения записи на фотобумаге) в глубинной части пещеры обнаружены сезонные и суточные колебания температуры, связанные с экскурсионным посещением, а также прогрессирующее похолодание [375].

Наклономерные наблюдения. В 1966 г. в гроте Геологов была оборудована наклономерная станция [376]. Два горизонтальных маятника установили на вырубленной полке в  $70 \text{ м}$  от земной поверхности; ориентация маятников СЮ и ВЗ (рис. 15.9). Чувствительность маятников к наклонам составляла  $0,06 \text{ с}$  дуги на  $1 \text{ мм}$  записи на фотобумаге ( $10^{-7}$ ). В результате 10 лет непрерывной фоторегистрации выявили вековой ход наклона земной коры, лунно-солнечные приливы и слабые землетрясения, случающиеся еженедельно.

Непрерывные медленные движения маятников состоят из линейной и периодической



Рис. 15.9. Наклономерная станция "Кунгур" (фото В. И. Солухи)

частей. Линейное движение (“вековой” ход) происходит в ССЗ направлении со скоростью около 9 с дуги в год. Если считать, что этот вид движения обусловлен медленными тектоническими движениями верхней части земной коры, то такая большая величина скорости не может сохраняться длительное время (движение должно быть периодическим — через 20—30 лет). Не исключен вклад в вековой ход “сползания” нуля приборов.

Периодические движения маятников имеют годовой и полугодовой ход с амплитудами 0,9 и 1,8 с дуги. Годовой ход маятников следует за годовым ходом температуры на поверхности. Природа полугодового хода не установлена. Кроме того, выявлены непериодические изменения колебаний маятников с периодом от нескольких дней до нескольких месяцев. В отдельных случаях они коррелируются с изменениями атмосферных нагрузок. Колебания маятников в течение нескольких часов и дней часто предшествуют обвалам в пещере.

Быстро затухающие колебания маятников имеют различный характер по форме записи, но ввиду малой развертки (3 мм/ч) анализ волновой картины невозможен. Часто они обусловлены обвалами в пещере и взрывами в близлежащих карьерах. Резкие изменения (скачки) происходят редко, но всегда одновременны с быстро затухающими колебаниями, и к прежнему положению маятники уже не возвращаются. Такие изменения обусловлены перераспределением напряжений в массиве Ледяной горы в результате обвалов.

В январе 1974 г. Кунгурский стационар начал наблюдения за температурой горных пород в пещере (продолжались до 1986 г.). Один раз в месяц (13—17 числа) проводили измерения с помощью почвенных электротермометров (точность отсчета 0,1 °С). В горизонтальные и вертикальные шпуров на глубину 0,1 и 2,0 м попарно заложили 8 датчиков. Шпуров были пройдены в гипсах (стена грота Бриллиантовый), ангидритах (стена грота Руины), глыбово-глинистых мерзлых отложениях (пол грота Бриллиантовый) и в многолетнем льду (грот Бриллиантовый). Результаты наблюдений изложены в гл. 12.

В 1976 г. В. М. Шувалов [429] провел переинтерпретацию материалов наблюдений 1956—1957 гг. Кроме новой карты сопротивлений, была построена карта вычисленных параметров  $\alpha$ . рис. 15.10). Участки заполненных и незаполненных карстовых пустот отмечаются повышенными значениями кажущихся сопротивлений и увеличением значения параметра  $\alpha$ , а низкие сопротивления соответствуют менее разрушенным целикам.

Участки повышенных сопротивлений на смежных профилях позволяют восстановить контуры карстовых полостей. Для этого была выбрана линия нормального поля, представляющая среднее значение  $KС = \approx 300$  Ом·м для всех профилей электрического поля. Аномалии, выявленные по этим графикам (более 500 Ом·м; 2,5  $\alpha$ ), соответствуют карстовым полостям.

В 1979 г. отряд КамГИСИЗа выполнил изыскания на Ледяной горе методом ВЭЗ. Один профиль был проложен у основания горы, три — на ее поверхности. Принципиально новой информации эти работы не дали [285]. В 1990 г. отряд Пермского университета разбил на поверхности Ледяной горы полигон для регулярных геофизических наблюдений и биолокационной съемки. В 1994 г. Б. К. Матвеев [285] подвел итоги геофизического ис-

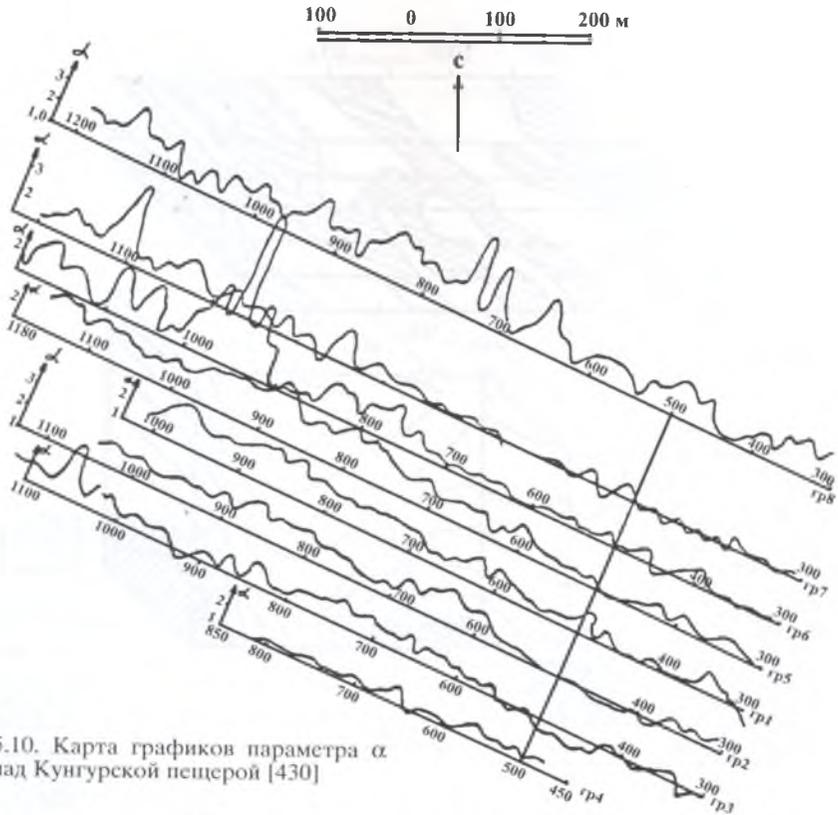


Рис. 15.10. Карта графиков параметра  $\alpha$  над Кунгурской пещерой [430]

следования района Кунгурской пещеры. Он отметил высокую эффективность метода ВЭЗ при изучении глубоко залегающих полостей, что объясняется наличием вертикальных каналов и трещин, создающих “ореольный эффект” над крупными полостями (рис. 15.11).

В 1997 г. В. В. Семенов и И. А. Лавров выполнили подземные наблюдения электрического поля фильтрации, позволившие конкретизировать представления о путях фильтрации и местах разгрузки карстовых вод пещерного массива [286]. В период летней межени в юго-восточном углу грота Длинный (ПК 100) была выбрана исходная точка, потенциал которой условно принимался за нуль. Потенциалы остальных точек измеряли вдоль всех троп. Работы проводились при выключенном освещении в пещере. Всего было выполнено 300 измерений с шагом 10 м. В качестве датчиков поля использовались неполяризующиеся электроды системы ВИРГ.

По результатам наблюдений была построена карта изолиний потенциалов фильтрации, на которой выделились два основных направления подтока подземных вод: северо-западное и северо-восточное, что согласуется с основными направлениями трещиноватости. Первый водоток узко локализован и пересекает гроты Грязный и Географов, сливаясь в районе гротов Переслегина, Близнецы, Длинный. На участке слияния наблюдаются восходящие источники. Второй водоток имеет более широкий фронт — от грота Заозерный до Метеорного, затем разветвляется на два языка, вытянутых на юго-запад

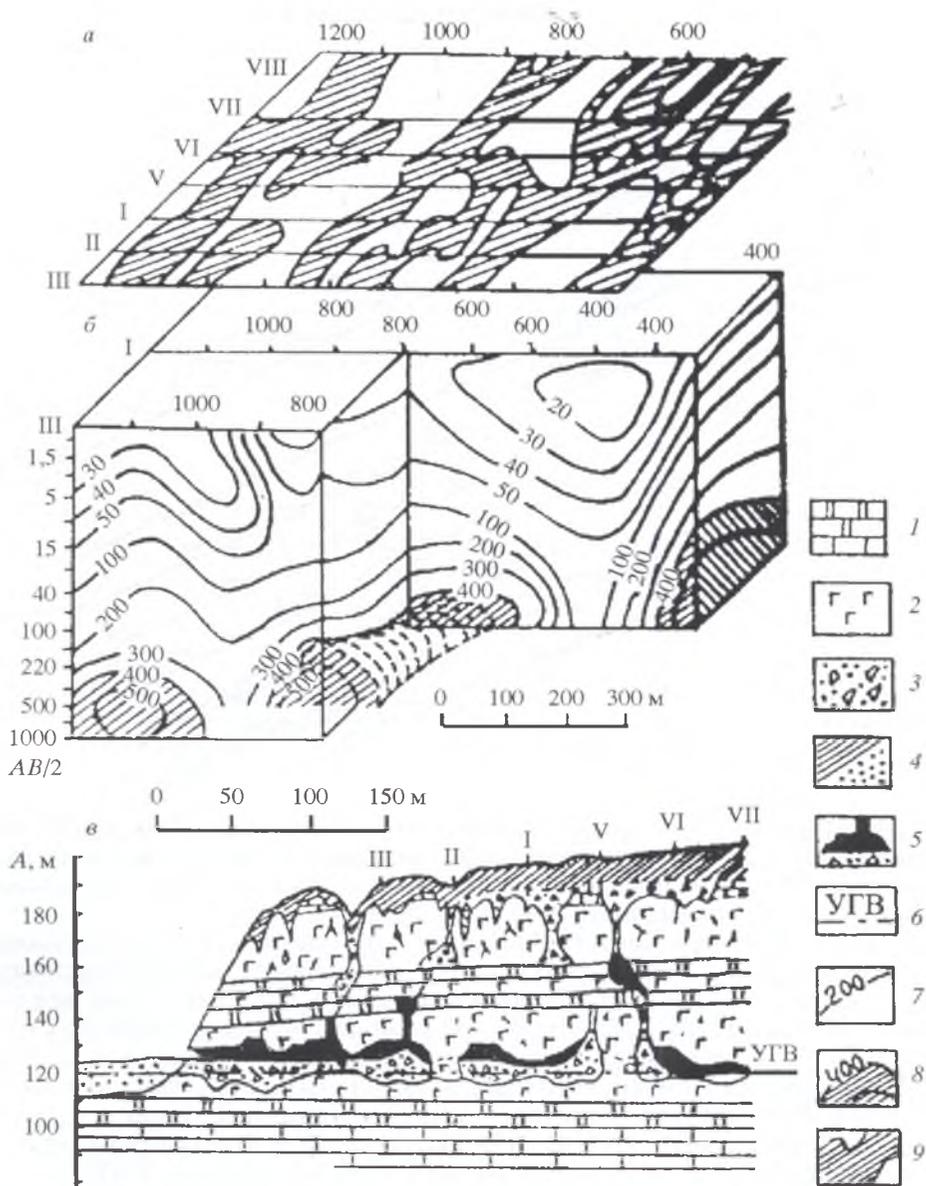


Рис. 15.11. Кунгурская пещера и ее "отражение" в данных электроразведки [285].  
*a* — план изом по результатам электропрофилеирования  $AB/2 = 250$  м,  $MN = 10$  м; *б* — блок-диаграмма кажущихся сопротивлений по данным ВЭЗ; *в* — меридиональный разрез через Ледяную гору: 1 — известняки и доломиты, 2 — гипсы и ангидриты, 3 — обвалы отложения, 4 — глина и песок, 5 — карстовые полости, 6 — уровень водоносного горизонта; 7 — изолинии кажущегося сопротивления на разрезе; 8 — высокие, 9 — низкие кажущихся сопротивления.



Рис. 15.12. Уровень микросейсмических шумов в гротах Полярный и Геологов

между известными галереями и гротами. Таким образом, основные пути фильтрации проходят не через полости пещеры, а между ними, по так называемым “целикам”. Общее направление потоков юго-западное, в сторону р. Сылвы, где на участке реки южнее и западнее грота Вышка в период летней межени наблюдается основная зона разгрузки подземных вод.

Подземный вариант съемки, несмотря на некоторые технические трудности, представляется более надежным по сравнению с наземным, поскольку градиенты потенциала близким по величине ЭДС фильтрационного потока. В данной ситуации ЭДС в среднем составляла 2 мВ/м. Опыт электрометрических подземных наблюдений может быть использован для детальных исследований динамики трещинно-карстовых вод в Кунгурской пещере в различные периоды и организации режимных измерений.

В гроте Смелых 22.04.2003 г. была установлена трехкомпонентная система сейсмических датчиков, а в здании Кунгурского стационара — комплект аппаратуры региональной сейсмической станции “Кунгур” с непрерывным режимом записи [280]. Предварительно была выполнена количественная оценка микросейсмических шумов в месте расположения датчиков в Кунгурской пещере и для гротов Полярный и Геологов построены спектры мощности микросейсмических шумов (рис. 15.12). Суммарный спектр мощности микросейсмического шума сравнивался с соответствующими спектрами для других региональных сейсмостанций (на территории Пермского региона работают одна федеральная и три региональные сейсмические станции). Интенсивные колебания в диапазоне 0,1—0,3 Гц с мощностью  $10^{-9}$ — $10^{-8}$  (см/с)<sup>2</sup>/Гц представляют собой штормовые микросейсм, возникающие в результате передачи энергии океанических волн в земную кору. Энергия штормовых микросейсм для различных станций отличается несущественно, что указывает на высокую достоверность результатов оценки уровня микросейсмического шума (рис. 15.13).

Корректность работы сейсмических датчиков подтвердила запись

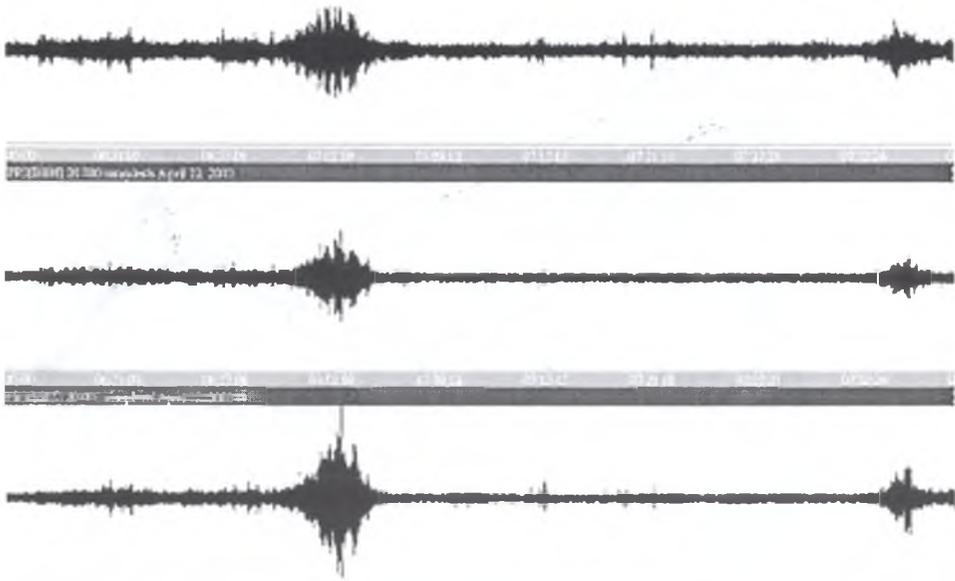


Рис. 15.13. Запись микросейсмического шума от прохождения поезда (с помощью региональной сейсмостанции "Кунгур")

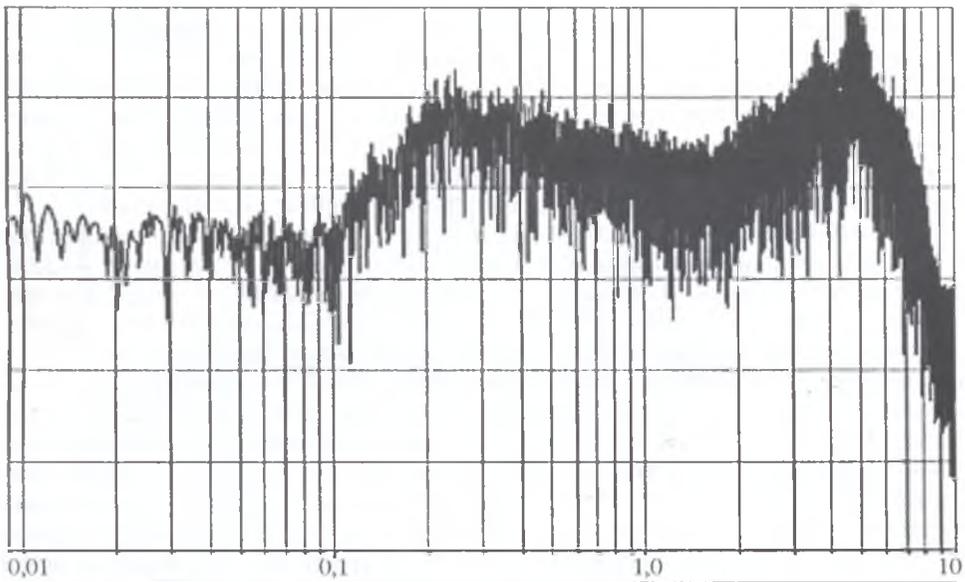


Рис. 15.14. Запись землетрясения в районе Гренландии (с помощью региональной сейсмостанции "Кунгур", фрагмент)

22.04.2003 г. в 8:34 землетрясения с магнитудой  $M = 4,5$  и эпицентром в районе Гренландии. Наличие шума не помешало правильному выделению землетрясения (рис. 15.14).

## 15.2. ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФИЦИТА НАСЫЩЕНИЯ КАРСТОВЫХ ВОД

Дефицит насыщения — это способность природных вод растворять горную породу [393]. Для Кунгурской пещеры массовые определения агрессивности воды по данным анализов за 1975—1980 гг. впервые выполнил Ю. И. Шутов с помощью переработанного им графика Кристофера [441]. Моляльность воды (моль/дм<sup>3</sup>) определяли по номограмме [141], затем рассчитывали величину индекса агрессивности  $\Delta M = (\text{сумма анионов минус содержание ионов } \text{Ca}^{2+} \text{ и } \text{SO}_4^{2-})$ . При значениях  $\Delta M$  от +0,050 до -0,050 вода метастабильна (находится в равновесии с сульфатной породой), при более низких отрицательных значениях — агрессивна, а более высоких положительных — неагрессивна.

Вода атмосферных осадков рек Сылвы и Шаквы сильно агрессивна к сульфатным породам (от -1,200 до -0,800), вода поверхностных водотоков и талых льдов — слабо агрессивна (от -0,150 до -0,050), вода капли и подземных озер равновесна (от -0,050 до +0,050). В озерах, имеющих связь с р. Сылвой, в период половодья вода приобретает слабую агрессивность, уменьшающуюся в глубь массива (от 0,200 до -0,100).

Выявлен годовой ход индекса агрессивности (рис. 15.15). Однако следует иметь в виду, что его абсолютная величина не имеет расчетного значения (т. е. индексы агрессивности -0,500 и -0,050 не означают, что первая проба агрессивнее второй в 10 раз).

Установлено наличие корреляционной связи между величиной минерализации воды и дефицитом насыщения (рис. 15.16). При минерализации воды менее 2,1 г/дм<sup>3</sup> она агрессивна, 2,1—2,4 — равновесна, более 2,4 — неагрессивна. Статистически значимые зависимости между знаком и величиной дефицита насыщения, температурой воздуха и воды, количеством осадков и другими параметрами атмосферы и гидросферы пещеры не установлены.

Дефицит насыщения вод района Кунгурской пещеры по данным анализов 1983—1985 гг. определяли сотрудники ПГУ [88]. Для этого они использовали методику В. П. Зверева [159], составленную В. П. Костаревым номограмму для вод с минерализацией менее 3 г/дм<sup>3</sup>, а также методики А. И. Климаса [187] и А. В. Лехова [214]. Расчеты производились на ЭВМ “Искра”. Данные, полученные указанными авторами и Ю. И. Шутовым, часто расходятся (рис. 15.17).

Причины расхождений убедительно раскрыли украинские карстоведы С. Д. Аксем и А. Б. Климчук [3]. Они выполнили важные исследования сульфатных равновесий, которые во многом изменили сложившиеся в научной и нормативной литературе взгляды [290, 327, 374]. Неадекватная оценка состояния системы “сульфатные породы — природные воды” связана в основном с константами равновесия (рис. 15.18). Поэтому С. Д. Аксем и А. Б. Климчук провели термодинамические расчеты. Оказалось, что используемые в отечественной практике константы резко выпадают из поля наиболее часто встречающихся в литературе величин в интервале тем-

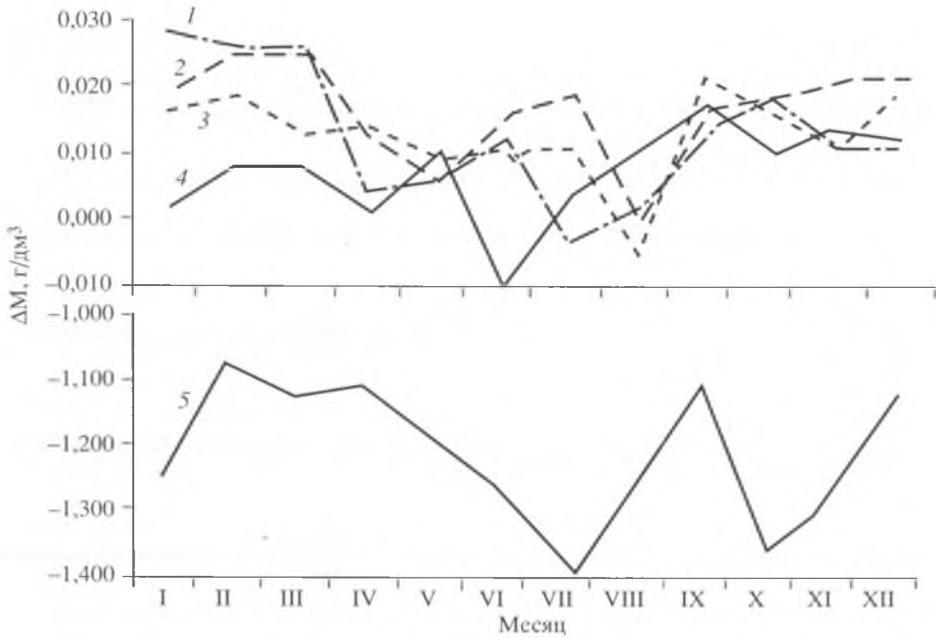


Рис. 15.15. Годовой ход индекса агрессивности вод района Кунгурской пещеры. Озера в гротах: 1 — Дружбы Народов, 2 — Длинный; скважины в гротах: 3 — Руины, 4 — Коралловый; 5 — вода в р. Сылве

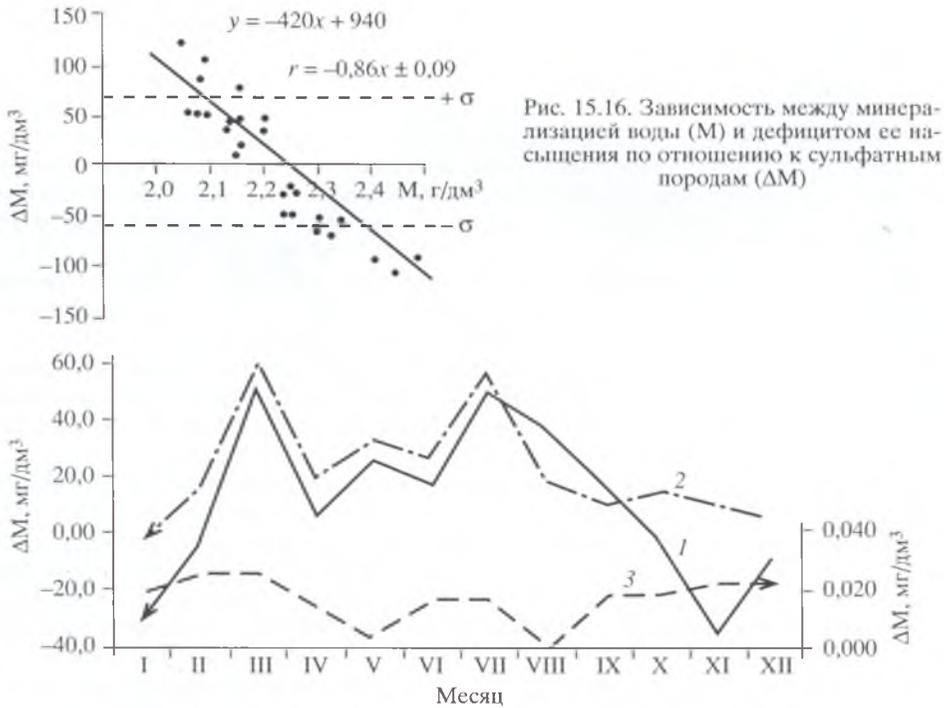


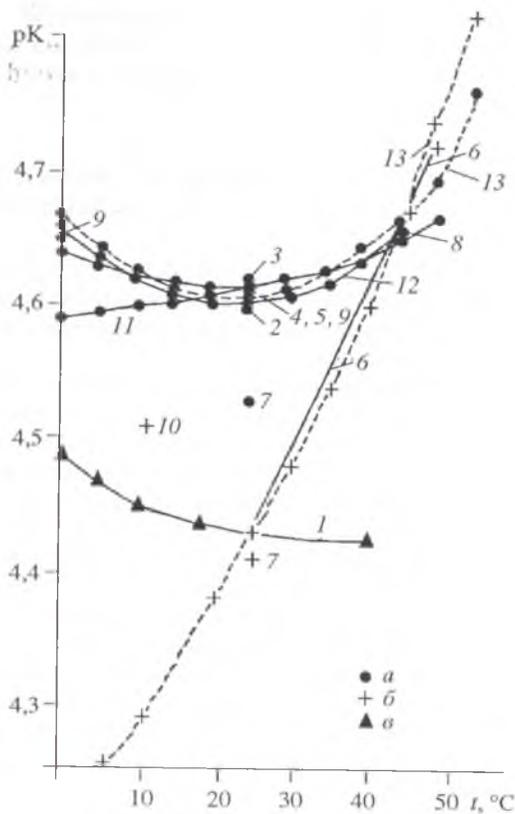
Рис. 15.16. Зависимость между минерализацией воды (M) и дефицитом ее насыщения по отношению к сульфатным породам ( $\Delta M$ )

Рис. 15.17. Годовой ход дефицита насыщения ( $\text{мг/дм}^3$ ) и индекса дефицита насыщения в гроте Длинном (среднее за 1982—1985 гг.) по методам В. П. Зверева (1), А. В. Лехова (2) и Ю. И. Шутова (3)

Рис. 15.18. Значение констант равновесия реакций растворения сульфатных минералов и пород ( $-\lg K$ ) при разной температуре [3].

Константы равновесия: *a* — для гипса, *b* — для ангидрита, *в* — для сульфата кальция.

Источники данных (цифры на рисунке): 1 — Зверев, 1967; 2 — Nakayama, 1867; 3 — Garreets, McKenzie, 1967; 4 — Заводнов, 1979; 5 — Handbook of Chemistry, 1978; 6 — Наумов и др., 1971; 7 — Зверев, 1982; 8 — Wigley, 1971; 9 — Ford, Williams, 1989; 10 — Roy, 1998; 11 — Ю. И. Шутов (Дублинский и др., 1984); 12 — Wigley, 1973; 13 — Аксем, Климчук, 1991



ператур, обычных для природных вод в сульфатном карсте.

Почти все расчеты, выполненные ранее, дают плохо сопоставимые результаты и нуждаются в пересмотре. Подобный пересмотр всего массива химических анализов по Кунгурской пещере вряд ли целесообразен, так как анализ воды проводился по полевой методике (ион натрия рассчитывался по разности сумм анионов и катионов), что делает невозможным точное определение ионной силы раствора. Кроме того, вода всех водопроявлений пещеры представляет собой не гомогенный раствор, а смесь в разных пропорциях инфильтрационных, конденсационных, подземных и речных вод. Здесь в полной мере проявляется коррозия смешивания, расчеты которой производятся по иным методикам [146].

Имеющиеся данные следует осторожно применять и для балансовых расчетов. В практике карстологических исследований широко используется понятие об ионном стоке, характеризующем количество растворенных солей, вынесенных из массива подземными водами. Прямой расчет количества растворенной породы по ионному стоку правомерен только для карбонатного и соляного карста. Гипсовый карст имеет важную особенность: гипс представляет собой кристаллогидрат, содержащий в своем составе две молекулы кристаллизационной воды. Его концентрация в растворе выражается массой безводного вещества в определенном объеме раствора. Масса кристаллогидрата может быть определена по формуле [200]

$$B = (A \cdot Z) / \{1 - [A(Z - 1)] / 1000\}, \quad (15.2)$$

где *A* — концентрация безводного вещества в растворе, г/кг; *B* — масса кристаллогидрата, которая должна быть растворена в 1 кг воды для получения раствора с концентрацией *A*, г;  $Z = M_k / M$ , где  $M_k$  — молеку-

лярная масса кристаллогидрата;  $M$  — молекулярная масса безводного вещества. Пересчет  $\text{CaSO}_4$  на  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  производится с коэффициентом 1,265. Расчет без коэффициента занижает данные на 26,5 % [3].

### 15.3. ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ГИПСА И АНГИДРИТА

В 1957—1985 гг. Кунгурский стационар и Пермский госуниверситет неоднократно проводили эксперименты по изучению скорости растворения карстующихся пород района Кунгурской пещеры в лабораторных и естественных условиях.

**Лабораторные условия.** В 1957—1958 гг. В. С. Лукин провел эксперименты по определению скорости растворения разных горных пород, отобранных в Кунгурской пещере и филипповском карьере. Сведения о них содержатся в рабочем журнале, сохранившемся в фондах стационара. Сконструированная установка состояла из 6 трубок с площадями сечений по  $1,5 \text{ см}^2$ . Всего проведено 18 экспериментов. Первые три имели вспомогательный характер: были определены скорости движения воды через трубки без загрузки породой и установлена хорошая сходимость их фильтрационных параметров; в 15 экспериментах выясняли влияние на растворимость скорости движения воды, массы навески, продолжительности эксперимента, размера фракций, состава и структуры породы, наклона поверхности образца. Отдельно изучали скорость растворения образца в дистиллированной, речной и пещерной воде. Эксперименты В. С. Лукина носили качественный характер и использовать полученные результаты для расчетов нельзя.

В 1980-е гг. А. В. Маклашин [251—253] на протяжении восьми месяцев исследовал растворимость гипсов и гипсоангидритов из стен выходного тоннеля в гроте Вышка. Образцы исследовали под микроскопом в отраженном свете, описывали их цвет, минеральный состав, определяли структурные и текстурные особенности, размер зерен, вторичные минеральные образования, количество микротрещин и их заполнитель. Таблетки площадью  $1—3 \text{ см}^2$  и толщиной  $1—2 \text{ мм}$  выпиливали параллельно плоскостям напластования и приклеивали к предметному стеклу так, чтобы растворению подвергалась только поверхность образца.

Скорости растворения таблеток гипсов и ангидритов исследовали на специальном приборе, состоящем из 5-литрового резервуара и системы регулирования подачи воды. Чтобы в процессе опыта насыщение воды сульфатом кальция было минимальным и не влияло на процесс растворения, был использован большой объем дистиллированной воды. Скорость движения воды выбирали с учетом природных условий и скоростей, при которых проводили опыты другие исследователи. Скорость растворения сульфата кальция изучали в неподвижной воде (в термостате РЦ-1125 МУ-42 при температурах  $3—30 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а также при турбулентном движении воды (со скоростями от  $0,0$  до  $38,2 \text{ м/мин}$ ).

Из рис. 15.19 видно, что скорость растворения сульфатных пород повышается с увеличением скорости движения воды и ее температуры. При температуре воды более  $25—30 \text{ }^\circ\text{C}$  рост скорости растворения породы за-

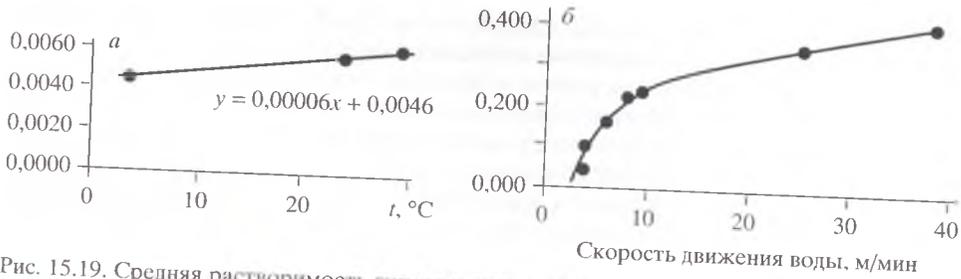


Рис. 15.19. Средняя растворимость гипсов и ангидритов (г/сут) из штольни в гроте Вышка в дистиллированной воде в зависимости от температуры воды (а) и скорости движения при 16 °С (б) (данные А. В. Маклашина переработаны авторами)

медляется. При одинаковых режимах скорость растворения сульфатных пород зависит от их состава и свойств.

Н. Г. Максимович [388] сконструировал установку, позволяющую изучать растворение путем фиксации увеличения расхода воды через канал, просверленный в пластинке гипса или ангидрита толщиной 15 мм (первоначальный диаметр канала 1 мм). Подача воды осуществлялась снизу вверх с постоянным расходом до 1 л/ч (ошибка замера 2%). Проанализировано 10 образцов, в том числе два из Кунгурской пещеры (гипс светло-серый, сахаровидный, крупнозернистый из грота Руины — продолжительность анализа 16 ч; ангидрит голубоватый из грота Вышка — 51 ч). К сожалению, интересно задуманный эксперимент не был завершен — отсутствуют данные о конечном диаметре контрольного отверстия и изменениях минерализации воды в начале и конце опыта. Сведения о ходе эксперимента приведены на рис. 15.20. Видно, что при низких скоростях движения воды первые семь суток эксперимента растворение пластинки из ангидрита происходило быстрее, чем из гипса; после увеличения контрольного отверстия гипс стал растворяться быстрее. По характеру кривой нарастания расхода можно судить о наличии разных этапов растворения: капельном (1—6-е сут) и струйчатом (7-е сутки и последующие).

**Естественные условия.** В 1957 г. В. С. Лукин провел опыты по изучению скорости растворения пород в озере грота Дружбы Народов [109]. Из гипса выпиливали образец в форме куба с длиной ребер 15 см, грани выравнивали и шлифовывали. Затем образец взвешивали и подвешивали в воде озера. Через год его вынимали, высушивали при 50—60 °С и вновь взвешивали.

Эксперимент дал следующие результаты: при объеме куба 3375 см<sup>3</sup> (15×15×15 см) и массе 7762,5 г (при плотности гипса 2,3 г/см<sup>3</sup>) годовая потеря в

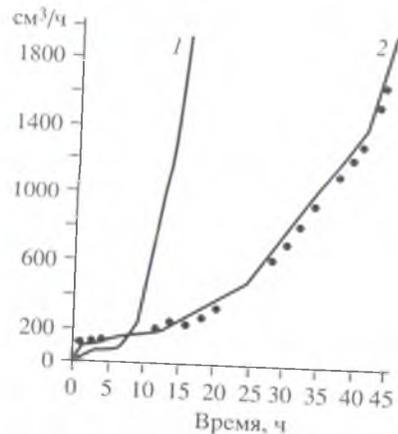


Рис. 15.20. Увеличение пропускной способности канала в пластинке из гипса (1) и ангидрита (2) (по [388], переработано авторами)

массе составила 473,5 г (6,1 %), или 78,9 г на грань. Отсюда скорость растворения гипса в воде подземного озера составляет 0,2160 г/сут.

В 1983 г. Пермский университет и Кунгурский стационар начали исследования условий растворения образцов гипса и ангидрита карстовыми водами, близкими к насыщению их сульфатом кальция. Было отобрано пять монолитных штуфов невыщелоченных и невыветренных гипсоангидритовых пород иренского горизонта кунгурского яруса. Минеральный состав образцов определен рентгенометрически. Описание штуфов выполнено З. А. Созыкиной.

Образец I. Ангидрит (90 %) с примесью гипса (10 %), голубовато-серый, отобран из обнажения вблизи пос. Посад. Структура гетеробластовая, радиально-лучистая; состоит из различных по величине зерен ангидрита. Наиболее крупные призматические зерна группируются вокруг некоторых центров. Гипс образует тонкие прожилки, состоящие из тонкоигольных индивидов. На поверхности образца местами выделяются более темные пятна и микротрещины, залеченные гипсом.

Образец II. Гипс (100 %), белый с редкими светло-серыми прожилками, отобран из обнажения в районе пос. Полазна. Структура радиально-лучистая. Состоит из мелких (длина до 0,06 мм) игольчатых кристаллов.

Образец III. Ангидрит (82 %) с примесью доломита (18 %), голубовато-серый пятнистый из скважины в с. Усть-Кишерть, с глубины 85—90 м. Структура гетеробластовая, порфиробластовая с различной величиной зерен (наиболее крупные до 2 мм). Редкие призматические порфиробласты выполнены буроватым в проходящем свете гипсом. Он имеет игольчатые включения ангидрита вдоль спайности, агрегаты и единичные зерна карбоната размером 0,02—0,03 мм. Основная масса породы состоит из брусковидных зерен ангидрита размером 0,1—0,5 мм, имеющего включения доломита.

Образец IV. Ангидрит (92 %) с доломитом (8 %), голубовато-серый пятнистый из скважины в г. Кунгуре. Структура гетеробластовая, состоит из разных по величине зерен ангидрита. 50—60 % массы образца состоит из мелких (0,01—0,02 мм) зерен ангидрита, в ней отмечаются зерна и агрегаты ангидрита размером до 3 мм. Форма зерен неправильная, реже призматическая, удлиненная, брусковидная. Доломит в виде пылеватой агрегатной массы располагается вдоль трещинок.

Образец V. Ангидрит (92 %) с небольшой примесью гипса (8 %), голубовато-серый, отобран из обнажения вблизи пос. Посад. Структура гетеробластовая, радиально-лучистая; состоит из различных по величине зерен ангидрита. Гипс образует тонкие прожилки из тонкоигольных индивидов.

Из штуфов было выпилено 22 пластинки размером 5×5×1,5 см (площадь 72—82 см<sup>2</sup>), которые разместили над поверхностью земли (+1,0 м, растворение атмосферными осадками) на Кунгурской метеостанции, на Ледяной горе закопали в почвенный покров (−0,1 м, растворение почвенными водами), а также поместили в Кунгурской пещере (гrotы Лукина, Великан, Длинный, Дружбы Народов — на поверхности (растворение конденсационными водами) и под водой (на глубине 0,5—0,7 м, растворение карстовыми водами)).

Эксперимент начался 01.VI.1983 г. и продолжался до 04.X.1993 г. (10,3 года). Средняя его продолжительность составила 2877 дней ( $CV = 0,19$ ). По-

Таблица 15.3  
 Результаты длительных (1983—1993 гг.) опытов по определению скорости растворения пластинок горных пород в районе Кунгурской пещеры

Фаза	Порода	Количество		Длительность эксперимента, сут	Скорость растворения	
		образцов	циклов взвешивания		г/сут	CV
Воздух наземный	Гипс	1	12	2876	0,0136	0,74
	Ангидрит/доломит	1	13	3241	0,0112	0,43
Почва	Гипс	2	8	2520	0,0161	1,32
	Ангидрит/доломит	1	13	3241	0,0095	0,56
Воздух подземный	Гипс	2	10	2743	0,0007	1,80
	Ангидрит	3	11	2957	0,0009	2,20
	Ангидрит/доломит	1	13	3241	0,0112	0,43
Вода подземных озер	Гипс	4	14	3143	0,0090	0,70
	Ангидрит	5	11	2515	0,0110	0,41
	Ангидрит/доломит	2	17	3795	0,0156	0,35
	Всего	22	122	—	0,0988	—
	Среднее	—	—	2877	0,0099	—
	CV	—	—	0,19	—	—

сле снятия образца и одно-двухдневного высушивания при комнатной температуре проведено 122 цикла взвешиваний на аналитических весах с точностью до 0,0001 (табл. 15.3). Однако некорректное планирование эксперимента (разная повторность опытов и циклов взвешивания и пр.) привело к тривиальным выводам: потеря массы таблеток в ходе эксперимента уменьшается на 27—43 % [84—86, 295].

При обработке материалов наблюдений за весь период эксперимента авторами применен иной метод. Каждая из выборок была подвергнута статистической обработке, из нее исключены дефектные данные (случай, когда взвешивание дало не уменьшение, а прирост массы), а также замеры, не прошедшие проверку на однородность ( $\tau$ -критерий), и лишь затем данные были осреднены (см. табл. 15.3), построены графики (рис. 15.21) и на основании их анализа получены четыре основных вывода:

1. Потеря массы таблеток в наземном воздухе и почве имеет случайный характер с очень высокими скоростями растворения (0,0112—0,0161 г/сут) и коэффициентами их вариации (до 1,60); конденсационная коррозия минимальна (0,0008 г/сут, CV = 1,50); вода озер имеет высокую скорость растворения (в среднем 0,0120 г/сут) и низкий коэффициент вариации (CV = 0,50).

2. Скорость растворения пород во всех ситуациях выше летом и меньше зимой, однако коэффициент вариации, напротив, несколько ниже летом.

3. Карстующиеся породы по скорости растворения образуют ряд гипс—ангидрит—ангидрит/доломит. Для конденсационных вод скорость растворения ангидрит/доломитов в 15 раз выше, чем гипсов и ангидритов, а для воды подземных озер — в 1,5 раза. Таким образом, впервые на экспериментальном материале доказано, что толщи переслаивания сульфатных и карбонатных пород растворяются лучше, чем чистые сульфатные породы [134]. В этом же направлении снижается коэффициент вариации: 1,21

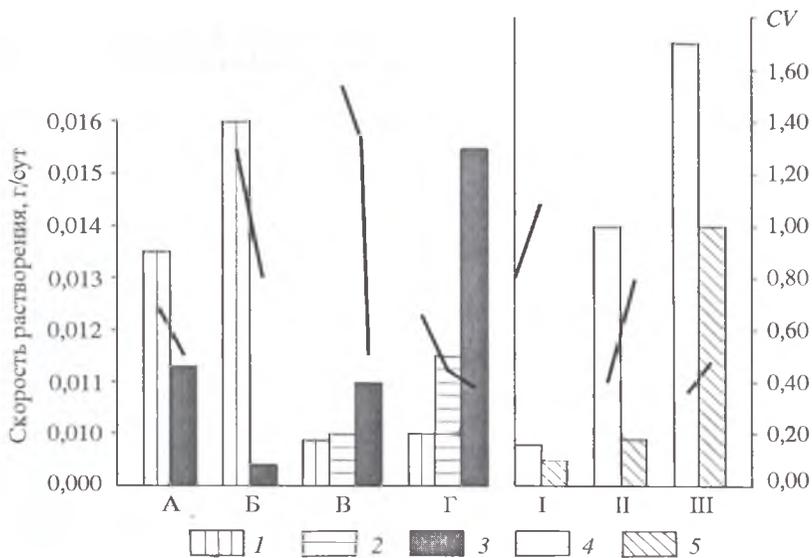


Рис. 15.21. Скорость растворения горных пород в районе Кунгурской пещеры (по К. А. Горбуновой и др. [86], переработано авторами).

Условия растворения: А — атмосферный воздух, Б — почва, В — воздух пещеры (конденсация), Г — вода подземных озер.

Порода: 1 — гипс, 2 — ангидрит, 3 — ангидрит (80%)—доломит (20%). Сезон: 4 — теплый, 5 — холодный

(гипс) — 0,97 (ангидрит) — 0,44 (ангидрит/доломит). Это одна из важнейших особенностей Кунгурской пещеры.

4. По скорости растворения между озерами в разных гротах существует статистически значимая разница: для конденсационной коррозии она в 3 раза выше в гроте Дружбы Народов, а для озерной — в 1,5 раза выше в гроте Длинный. Очевидно, это связано с подтоком в озеро грота Длинный более пресных вод из р. Сылвы.

При незначительных скоростях движения воды в результате избирательного растворения, контролируемого структурой, текстурой, составом минеральных зерен и включением менее растворимых минералов, на поверхности породы появляются микрокарры, увеличивающие площадь соприкосновения ее с растворителем, что активизирует процесс. Одновременно с растворением протекают процессы гидратации ангидрита, гидрогенного минералообразования и залечивания микротрещин. На уровне карстовых вод и в зоне колебаний их уровня в условиях, близких к насыщенности вод сульфатами, процесс растворения не прекращается. Он активизируется в весенне-летний период, особенно на участках влияния на подземный сток речных вод [83], однако имеющих данные для их количественной характеристики недостаточно.

В 1985 г. Е. П. Дорофеев отобрал в гротах Вышка и Великан штуфы голубовато-серого ангидрита, а в гроте Длинный — сетчатого гипса из 1-го и 4-го слоев ледянопещерской пачки. В них были забурены под разными углами штыри из дюралюминия диаметром 10 мм. Замеры производились микрометрическим глубиномером в пространстве между штырями. Штыри, расположенные снизу штуфа, имитируют растворение сводов, сбоку —

на наклонных площадках. Штуфы со штырями были подвешены в озерах гротов Великан, Длинный, Дружбы Народов: в озере Длинном на глубине 1, 2 и 3 м размещена гирлянда штуфов, один из штуфов заложен в глину озерца на выходе в грот Великан. Штуфы периодически вынимали и производили замеры. К сожалению, результаты замеров не сохранились. Записи в журнале, сделанные 04.III и 04.VII.1988 г., дали прирост массы четырех штуфов в среднем на +1,82 г ( $CV = 0,43$ ), а в одном шпуре — убыль на 0,52 г ( $CV = 1,20$ ). Визуально отмечено, что поверхность гипсов стала более шероховатой с блестками мелких отпрепарированных кристаллов гипса. Вокруг дюралюминиевых штырей образовались кольцевые углубления диаметром 20 мм и глубиной до 4 мм; менее растворимые доломитовые включения выступили на 1—2 мм, а из шпуров за счет гидратации ангидрита выдавилась светлая гипсовая масса, твердая на трех и рыхлая на одной паре реперов.

На нескольких штуфах ангидрита сделаны распилы, имитирующие трещины, которые залечиваются гидратацией. Через год после начала эксперимента от места распила начался рост призматических удлиненных и прозрачных игольчатых кристаллов гипса длиной 3 см и толщиной до 0,2 см. К сожалению, этот интересный эксперимент не был завершен.

В 1990—2000 гг. исследователи Кунгурской пещеры неоднократно отмечали возникновение в разных частях пещеры впадин в глыбовом навале и глине. Это свидетельствует об активном прохождении карстового процесса ниже уровня пещерных галерей. Е. П. Дорофеев в своем рабочем журнале отмечал провальные впадины с поперечником до 1 м в глинистой осыпи грота Длинный, воронки с поперечником 0,5 м в глине северной части грота Геологов, подточенные в основании и обламывающиеся под тяжестью человека глыбы в озере грота Географов. К сожалению, инструментальные наблюдения за проседаниями на дне пещеры организованы не были.

В 2001 г. по инициативе авторов были измерены смещения швеллерных балок, установленных в 1985 г. в гроте Вышка<sup>12</sup>. Всего смещено 44 балки, расположенные вдоль южной и восточной стенок грота Вышка. Сведения о направлениях и величине смещений приведены в табл. 15.4.

Анализ размещения опор, испытывающих смещения в разных направлениях, свидетельствует о наличии блоковых подвижек по ортогональным (0 и 90°) направлениям. Смещения опор происходят в основном за счет растворения обломочного материала, накопившегося на дне грота, при ежегодном вторжении пресных вод из Сылвы (возможно, некоторую роль играет и таяние льда, образовавшегося между глыбами после сооружения выходного тоннеля). Имеющиеся данные позволяют оценить величину растворения.

Примем следующие размеры блока, оседающего вместе с опорой: длина 470 м, ширина 2 м (от внешнего до внут-

Таблица 15.4  
Смещение опор в гроте Вышка

Количество балок	Направление смещения	Среднее смещение, м	CV
19	В	0,25	0,13
17	З	0,23	0,15
8	С	0,21	0,28
Среднее	—	0,23	0,21

<sup>12</sup> В 2003 г. все швеллерные балки, не выполняющие функций опоры сводов, были удалены из пещеры.

ренного края опалубки вместе с пешеходной тропой), глубина 3 м (по средней мощности глыбовых накоплений в пещере). Объем блока равен 2820 м<sup>3</sup>. Средняя годовая величина оседания опор за 16 лет составляет 0,014 м/год, что эквивалентно объему 470×2×0,014 м (13,2 м<sup>3</sup>) или при плотности гипса 2,3 т/м<sup>3</sup> — 30,4 т (30,4·10<sup>6</sup> г). Таким образом, годовой вынос материала из грота Вышка составляет 0,5 % от объема блока, или 83 тыс. г/сут.

#### 15.4. КАЧЕСТВЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА КОНДЕНСАЦИЕЙ

В 1960-е гг. В. С. Лукин установил наличие конденсации влаги в Ледяной горе и других гипсово-ангидритовых массивах Уфимского плато [219, 223]. Процессы конденсации играют заметную роль в формировании их водного баланса. Однако эти общие соображения базировались только на микроклиматических данных.

В 1978 г. в 10 гротах пещеры были установлены стандартные метеобудки, в которых размещались термометры и самописцы. Наблюдатели обратили внимание на то, что на их внешних поверхностях происходит конденсация капель воды или сублимация ледяных кристаллов. Е. П. Дорофеев начал наблюдения за конденсацией на метеобудках в 1978 г. и вел их 13 лет. Всего выполнено свыше 1,3 тыс. наблюдений. При обработке этих материалов они сведены нами к четырем ситуациям: С — сухо, В — влажно (незначительная конденсация), К — капли воды (сильная конденсация), Кр — ледяные кристаллы. Это позволило составить годичные таблицы наблюдений и провести их математическую обработку (табл. 15.5).

На протяжении 1978—1990 гг. наблюдалось снижение количества сухих (с 45 до 20 %) и влажных (с 15 до 8 %) будок и резкое возрастание количества случаев сильной конденсации (с 5 до 60 %). Образование ледяных кристаллов отмечено в 5 % случаев (рис. 15.23). Так как многолетний ход температуры воздуха на поверхности подобных тенденций не выявляет, причины надо искать в режиме эксплуатации пещеры (открытые двери, сооружение выходного тоннеля и пр.).

Таблица 15.5

##### Пример обработки годичных данных по наблюдениям за конденсацией на метеобудках

Грот	1978 г.						Повторяемость ситуаций, %			
	15.VI	15.VII	15.IX	15.X	15.XI	15.XII	С	В	К	Кр
Бриллиантовый	С	—	С	—	С	С	100	—	—	—
Великан	С	—	С	С	В	С	80	20	—	—
Вышка	С	—	—	С	Кр	Кр	—	50	—	50
Данте	—	Кр	Кр	Кр	С	С	40	—	—	60
Длинный	—	—	К	С	С	С	75	—	25	—
Дружба Народов	С	С	С	С	С	С	100	—	—	—
Коралловый	—	—	В	В	С	С	50	50	—	—
Крестовый	В	В	В	В	К	В	—	83	17	—
Руины	—	—	В	В	В	В	—	100	—	—
Скульптурный	—	—	В	В	В	В	—	100	—	—
Всего	45 замеров						51	33	5	11

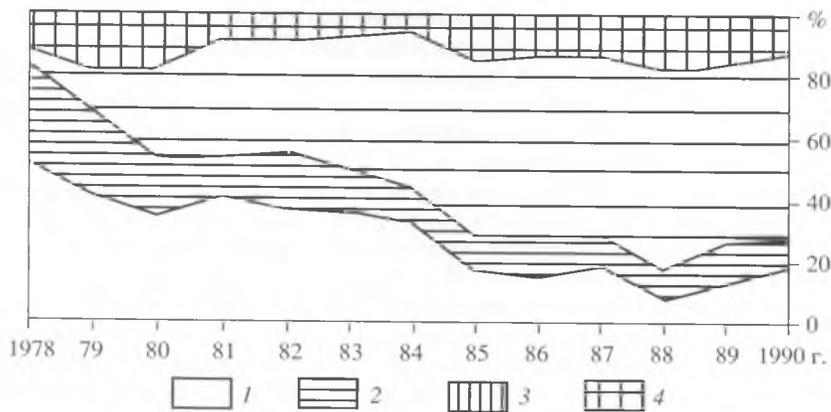


Рис. 15.22. Многолетний годовой ход конденсации на метеобудках.  
 1 — сухо; 2 — влажно (незначительная конденсация); 3 — капли воды (сильная конденсация);  
 4 — ледяные кристаллы

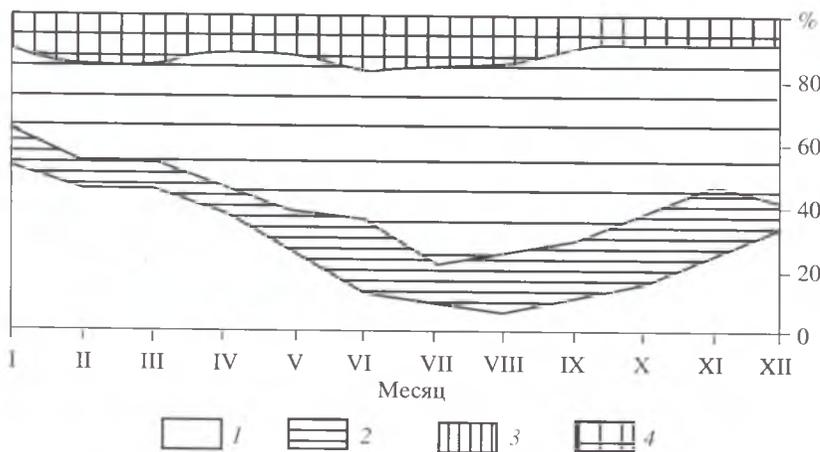


Рис. 15.23. Месячный многолетний ход конденсации на метеобудках.  
 1 — сухо; 2 — влажно (незначительная конденсация); 3 — капли воды (сильная конденсация);  
 4 — ледяные кристаллы

В месячном ходе конденсации также выявлены четкие тенденции (рис. 15.24): с сентября по январь количество сухих будок увеличивается с 10 до 45 %, к июню снижается до 10 %. Минимальное количество сухих будок (8 %) отмечено в июле и августе. Количество влажных будок возрастает с июля по ноябрь (с 10 до 20 %), снижается в декабре—апреле (до 6—8 %) и снова возрастает к июню (до 20 %). Конденсация влаги в виде капель возрастает с января до сентября (с 20 до 60 %), а затем несколько уменьшается к декабрю. Ход роста кристаллов льда на метеобудках на протяжении всего года испытывает незначительные колебания (9—18 %) с максимумом в июне.

Величина конденсации разных видов уменьшается в глубь пещеры, хотя испытывает значительную вариацию (от 50 % в гроте Данте до 95 % в Скульптурном). Ледяные кристаллы образуются только в гротах Бриллиантовый (80 %), Данте (35 %), Вышка (40 %) и Великан (1 %), что согласуется с наблюдениями за распределением льда в пещере. Распределение конденсации на будках в отдельных гротах в разные годы сложное.

Наблюдения за конденсацией влаги на метеобудках существенно дополняют данные приборных наблюдений за температурой и влажностью воздуха в разных гротах Кунгурской пещеры [35].

## 15.5. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА КАПЕЛЬЮ

Сведений об условиях формирования и составе капли из пещер немного [408]. Первые наблюдения за капелью со сводов и из органных труб Кунгурской пещеры были произведены 7—17.VIII.1935 г. Количество капель замеряли на протяжении 5 мин: объем капли составлял примерно 0,25 мл, водоприток в гроте Дружбы Народов — 21 мл/мин, в гроте Руины — 9 мл/мин. Периодические замеры 5 и 16 апреля 1985 г. в гротах Вышка, Великан, Длинный, Дружбы Народов, Мокрая Кочка, Романтиков, Руины, Хлебникова, Эфирный дали водоприток от 7,5 тыс. (Длинный, свод) до 3,6 тыс. мл/мин (Великан, трещина в своде). Температура капели составляла 2,0—5,4 °С. Декадные замеры в холодный период 1987—1998 г. (с 23.XI по 11.I) в гротах Грозный и Морское Дно дали водоприток из трещин от 0 до 3,9 тыс. мл/мин.

Эти кратковременные наблюдения, не увязанные с метеообстановкой на поверхности и под землей, дали лишь общее представление о величине капели в пещере.

В 1975 г. в связи с изучением влияния лунных приливов в Кунгурском стационаре была смонтирована схема, позволяющая вести дистанционную регистрацию частоты капель за счет электрических импульсов, возникающих в цепи при каждом ее замыкании попадающей на электроды датчика капель [154, 155, 421]. Датчик представляет собой два платиновых электрода с расстоянием между ними 5—7 мм. При замкнутой цепи переменный ток 220 В преобразуется в выпрямителе в постоянный и дает импульс, регистрирующийся на счетчике перемещением стрелки на одно деление. Так как при разбрызгивании капель на отрицательном электроде датчиков кристаллизуется кальцит, то через сутки менялась их полярность. Визуальная регистрация частоты капели с циферблатов счетчика производилась ежедневно по сигналам точного времени. Точность измерений изучаемого параметра  $\pm 1$  капля.

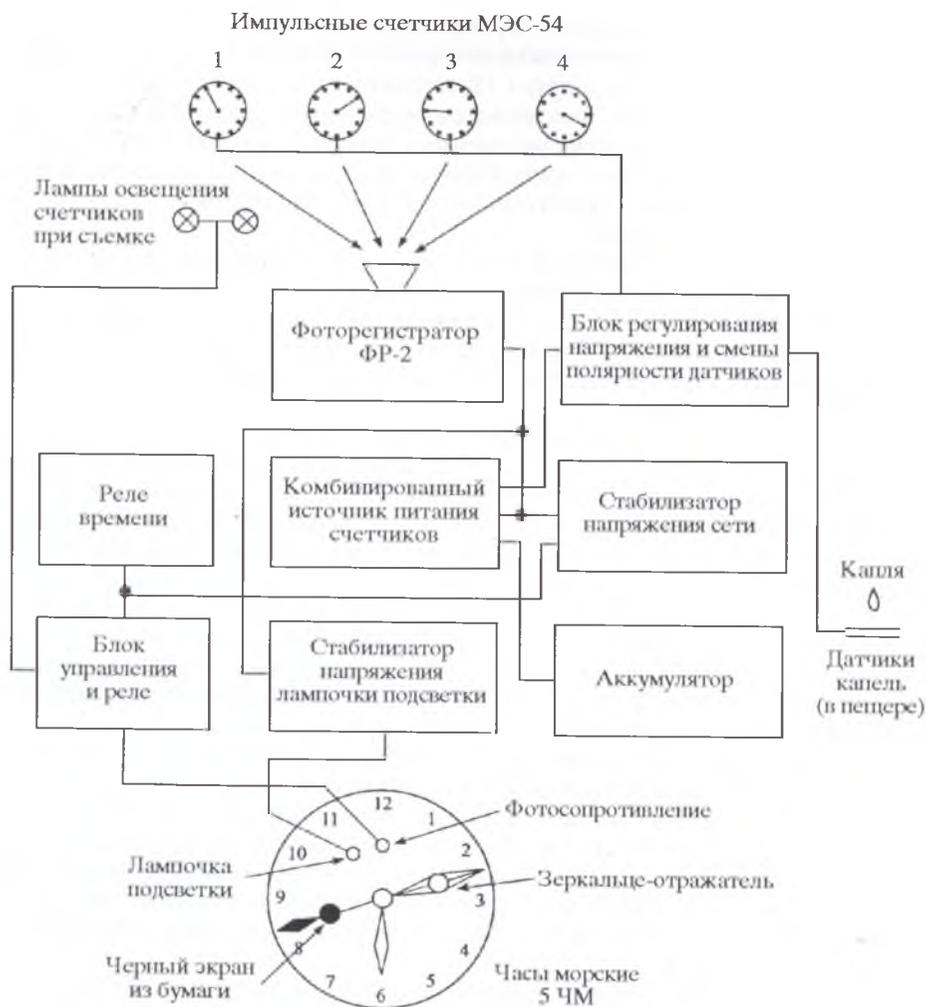


Рис. 15.24. Схема аппаратуры по измерению частоты капли в Кунгурской пещере [421]

Автоматический режим обеспечивался установкой, в которую входили импульсный счетчик, фоторегистратор, блок регулировки напряжения, источник питания (основной — сеть 220В, 50Гц, включаемая через стабилизатор, резервный — аккумулятор), блок управления и реле, стабилизатор напряжения лампочки подсветки, часы с центральной секундной стрелкой и реле времени (рис. 15.24). Фоторегистратор ФР-2 работал с объективом “Мир-1” и заряжался негативной киноплёнкой 24×36 мм. Частоту капли регистрировали ежечасным фотографированием циферблатов импульсных счетчиков. Фоторегистратором управляли часы, включающие его каждый час (точность  $\pm 1$  с).

На переднем стекле часов укреплены лампочка подсветки и фотосопротивление. Световой луч, отражаясь от зеркала на минутной стрелке,

попадает на фотоспротивление. Срабатывает фотореле, включая лампы освещения счетчиков и подготавливая к работе фоторегистратор. Секундная стрелка часов, дойдя до цифры 12, перекрывает луч от лампочки подсветки. Фотоспротивление затемняется, и фотореле возвращается в первоначальное состояние, производя съемку счетчиков капель. Возвращение схемы в исходное положение происходит с задержкой в 20 с, необходимой для устранения ложного срабатывания фоторегистратора. Результаты фиксируются на киноплёнке.

В 1975—1978 гг. наблюдения проводили на протяжении 20 неполных месяцев в гротах Великан, Геологов (опытная и 4 рабочих установки) и Смелых (табл. 15.6), а в 1976 г. с 21 января по 31 мая. В это же время вели синхронные наблюдения за атмосферным давлением (барограф установлен в стационаре, лента расшифрована на 8 сроков). Всего было выполнено около 40 тыс. замеров.

Качественный анализ полученных графиков (рис. 15.25) позволил сделать следующие основные выводы [154]: капель в гротах Кунгурской пещеры является следствием инфильтрации (отчасти — конденсации); в ее интенсивности прослеживается ритмичность, которую можно объяснить приливной пульсацией трещинно-порового пространства Ледяной горы; в колебаниях интенсивности капли существует квазиполусуточная (волны  $M_2$ ,  $S_2$  и  $N_2$ ) и квазисуточная (волны  $O_1$  и  $K_1$ ) периодичность, обусловленная изменением лунно-солнечного потенциала; изменение взаимного расположения Земли, Луны и Солнца (лунные фазы) определяет двухнедельное неравенство в колебании интенсивности капли. В сизигиях интенсивность капли в пещере увеличивается по сравнению с фазами квадратур.

К сожалению, сконструированный прибор не проходил метрологическую проверку; 70 % наблюдений проведено в холодные месяцы, когда на Ледяной горе лежит снег и инфильтрационная капель невозможна; во время наблюдений менялись пункты установки приборов; ни по одному месяцу и году наблюдений нет полного ряда; оценка носит качественный характер. Создание Банка данных по Кунгурской пещере позволило заново обработать имеющиеся материалы. Проверка состояла из нескольких последовательных операций.

**Оценка характера капли в разных гротах.** Для оценки месячного хода капли использованы данные по датчикам в гротах Геологов (№ 1, 2, 3) и Смелых. Из всего объема материала выбраны месячные зимний (17.I—17.II.1978 г.) и летний (21.VII—21.VIII.1978 г.) интервалы, имеющие непрерывный ряд наблюдений (см. табл. 15.6). Капель имеет различный ход (коэффициенты корреляции между замерами на разных датчиках зимой 0,02—0,03, летом — 0,07—0,14). Для оценки суточного хода использованы данные за 5.V.1978 г. Корреляция между данными по установкам в гротах Геологов (№ 1, 2) и Смелых отсутствует (коэффициенты корреляции — 0,08—0,13 ± 0,27).

Таким образом, в разных точках Кунгурской пещеры интенсивность капли имеет разную величину (10—22 мл/мин), что связано с характером водопритока (ширина трещины и пр.). Однако ее суточный и месячный ход также различаются (коэффициенты корреляции 0,02—0,14 ± 0,25), что косвенно свидетельствует об отсутствии влияния на нее каких-либо общих внешних факторов.

Наблюдения за капелью в Кунгурской пещере

Таблица 15.6

Грот и установка	Год	Месяц										
		1	2	3	4	5	6	7	8	11	12	
Великан Геологов-опытная	1977											
	1975				+	+			+	+	+	+
Геологов-1	1976	+										+
	1976		+	+							+	
Геологов-2	1977										+	+
	1978	+	+					+	+			
Геологов-3	1976			+	+	+					+	+
	1977										+	+
Геологов-4	1978	+	+	+	+	+	+		+			
	1976		+	+								
Смелых	1978	+	+									
	1977										+	+
	1978	+	+	+	+	+	+				+	+

Примечание. Данные за сентябрь—октябрь отсутствуют.

Средние значения интенсивности капли (мл/мин) и их статистики для разных фаз Луны

Таблица 15.7

Месяц	Полнолуние	Новолуние	1-я четверть	4-я четверть
I	131	159	128	122
II	128	132	132	138
III	140	141	107	138
IV	137	140	140	141
V	143	143	143	144
VI	146	171	144	141
VII	143	150	146	144
VIII	150	146	147	152
IX	—	—	—	—
X	—	—	—	—
XI	152	141	147	149
XII	153	143	153	152
Среднее	142	147	139	142
CV	0,06	0,07	0,10	0,06
<i>F</i> -критерий	0,66		1,33	
	0,58			

Результаты химических анализов капли в гроте Морское Дно, мг/дм<sup>3</sup>

Таблица 15.8

Фазы Луны	Кол-во анализов	Минерализация			σ	CV
		средняя	макс.	мин.		
Полнолуние и новолуние	18	638	669	616	20,0	0,03
1-я и 3-я четверти	24	634	659	610	19,2	0,03

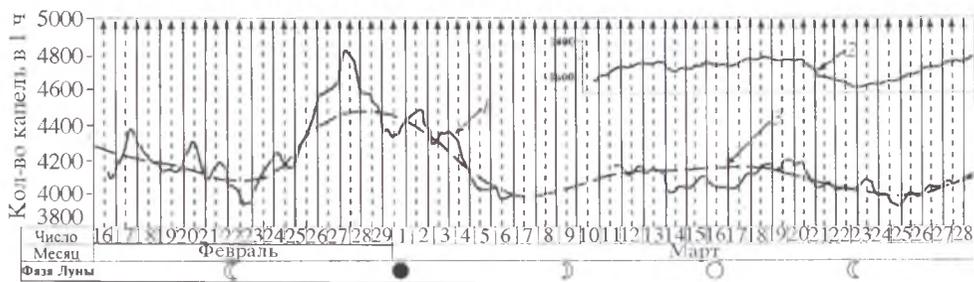


Рис. 15.25. Колебание количества капель в 1 ч из трещин в своде грота Геологов 02.03.1976 г. [155].

1—2 — графики капли, снятые 1-м и 4-м датчиками; 3 — усредненный график 1-го датчика; вертикальные сплошные линии со стрелками — моменты верхних кульминаций Луны для г. Кунгура, пунктирные — нижних кульминаций. Фазы Луны: последняя четверть, новолуние, первая четверть, полнолуние, последняя четверть.

**Оценка связи капли с приливными ритмами.** Для сопоставления хода капли с лунно-солнечными приливными силами были рассчитаны лунные пульсационные моменты для г. Кунгура. Связь между интенсивностью капли и солнечно-лунными ритмами была оценена статистически (табл. 15.7). Для 10 синодических месяцев 1976—1978 гг. получены осредненные значения капли по четырем установкам в гроте Геологов. Затем были рассчитаны значения  $H$ -критерия для пар полнолуние + новолуние и 1-я + 4-я четверти. Как и следует из теории приливов, они показали отсутствие различий между интенсивностью капли (0,66 и 1,33 меньше критического значения 1,96). Следовательно, наличие связи между интенсивностью капли в Кунгурской пещере и солнечно-лунными ритмами фактически данными не подтверждается.

**Оценка связи минерализации капли с приливными ритмами.** В работе Ю. А. Ежова и В. С. Лукина [153] содержатся данные о наличии связи между солнечно-лунными ритмами, минерализацией и химическим составом капли.

Для проверки этого предположения нами использованы две группы химических анализов. В гроте Смелых пробы капли отбирали четыре раза в сутки на протяжении 11 дней — с 1 по 18.01.1974 г. (до начала режимных наблюдений за капелью). Всего отобрано 43 пробы, которые были проанализированы в химической лаборатории стационара (ошибка анализа составила 5 %). Статистическая обработка полученных данных дала следующие результаты: средняя минерализация 597 мг/дм<sup>3</sup>,  $CV = 0,015$ . При ошибке анализа 5 % возможны отклонения от среднего в пределах  $\pm 30$  мг/дм<sup>3</sup>. Реальные максимум и минимум для всех отобранных проб составляют 578 и 612 мг/л и лежат в пределах ошибки анализа (567—627 мг/дм<sup>3</sup>). Таким образом, утверждать о наличии их связи с любыми природными процессами некорректно.

В гроте Морское Дно на протяжении 1988—1989 гг. пробы отбирали ежемесячно. По астрономическому календарю определили даты полнолуний, новолуний, 1-й и 3-й четвертей на эти сроки. Затем были составлены две выборки (табл. 15.8).

Таким образом, все зафиксированные отличия в минерализации капли также лежат в пределах ошибки анализа, и приписывать им какое-то иное

происхождение нет оснований. К аналогичному выводу пришел В. Н. Андрейчук [25], который отметил пульсирующий характер изменений минерализации воды без четко выраженных сезонных или погодных ритмов. Этот вывод подтвердился и при сопоставлении минерализации карстовых вод с приливной пульсацией трещинно-порового пространства Ледяной горы. Коэффициенты корреляции между максимумами и минимумами минерализации и меридиональных наклонов составили  $0,12 \pm 0,15$ , а широтных наклонов —  $0,15 \pm 0,18$ . Низкие значения коэффициента корреляции и высокие — его ошибки свидетельствуют об отсутствии связи между рассматриваемыми компонентами.

### 15.6. КАПЕЛЬ И ИСКУССТВЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОРОД

В гроте Геологов 3 и 14 марта 1977 г. были произведены экспериментальные взрывы. Предполагалось выяснить, окажут ли они влияние на режим капели из трещин в сводах гротов. В обоих случаях взрывы были накладными (взрывчатка располагалась в нише северной части грота). В моменты взрывов функционировали четыре датчика — № 1, 2 и 4 в гроте Геологов (20—25 м от места взрыва), № 3 — в гроте Великан (85 м от места взрыва). Регистрацию капели производили на протяжении 20 дней (10 дней — до взрыва, 10 — после него), сразу после взрыва в течение 5 ч отсчеты осуществляли вручную каждые 15 мин.

В гроте Геологов первый взрыв (5 кг взрывчатки) дал пик на всех графиках, однако его величина существенно отличается: по первому датчику он составил  $94 \text{ см}^3/\text{мин}$ , по второму —  $240 \text{ см}^3/\text{мин}$ ; в гроте Смелых, отделенном от пункта взрывов мощным целиком гипсов и ангидритов, датчик № 3 на взрывы не реагировал. Второй, несколько более мощный взрыв (6 кг взрывчатки), дал прирост количества капели на  $200\text{—}250 \text{ см}^3/\text{мин}$ . После резкого увеличения количества капели отмечался постепенный спад с приходом через 6 ч к первоначальному уровню.

Таким образом, масштаб и направленность деформации горных пород вследствие взрывов влияют на режим капели в гротах. Характер этого влияния различен, что объясняется закарстованностью гипсов и ангидритов. Следовательно, режим капели может являться индикатором для прогнозирования землетрясений и горных ударов.

## ИЗМЕНЕНИЯ В СОСТОЯНИИ КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ

### 16.1. МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Многолетние наблюдения позволяют установить тренд — медленное изменение случайной переменной в течение рассматриваемого периода [416]. Обычно это делают в связи с изучением многолетних изменений климатических элементов (температура, осадки и пр.), уровней или расходов поверхностных и подземных вод [191, 290]. Насколько нам известно, на примере анализа различных микроклиматических и гидрогеологических параметров карстовых полостей этот вопрос рассматривается впервые.

Несмотря на отмеченную выше некоторую неполноту материалов режимных наблюдений по Кунгурской пещере, в целом их можно успешно использовать для выявления тенденций изменения за длительный срок (до 50 лет), особенно если учесть, что Камский бассейн почти не охарактеризован многолетними данными по поверхностному и подземному стоку [71, 191]. Район Кунгура входит в Баренцовский район Арктической группы климатических районов России, для которого кривые годовых сумм температур и осадков идут согласно кривой солнечной активности, а кривые сезонных сумм осадков противоположны им [396].

Все данные о режимных наблюдениях по Кунгурской пещере и прилегающей территории можно разделить на две группы: с длинным (1950—1994 гг., 44 года, рис. 16.1) и коротким (1974—1996 гг., 22 года, рис. 16.2) рядами. Сравнение этих данных свидетельствует о том, что за последние 50 лет все они испытывали периодические колебания, на фоне которых четко прослеживается общее повышение их абсолютных значений (положительный тренд, см. рис. 16.1). Для осадков (мм) он описывается уравнением  $Y = 0,12X + 520$  (а, 0,1 мм в год); для среднемесячных значений температуры (°C) —  $Y = 0,008X + 1,35$  (б, 0,04 °C в год); для уровней р. Сылвы (м) —  $Y = 0,005X + 116,7$  (в, 0,005 м в год [60]). Ход осадков обычно сдвинут на 1—3 года по отношению к температуре, а ход уровней — на 1—2 года по отношению к осадкам. Положительный тренд выявлен в ходе уровней в колодце у пещеры и в озерах гротов Дружбы Народов и Длинный (г, д, е, 0,01 м/год), а также в ходе их минерализации (ж, з, 3 мг/дм<sup>3</sup> в год).

Аналогичный положительный тренд отмечен по короткому ряду показателей микроклимата Кунгурской пещеры (см. рис. 16.2). Он прослеживается в многолетнем ходе температур ангидритов в шпурах грота Руины (а — 0,1 °C/год), а в гроте Бриллиантовый для гипсов и льдов — 1,2 °/год (б, в). Температура воздуха в гротах Полярный и Бриллиантовый возраста-

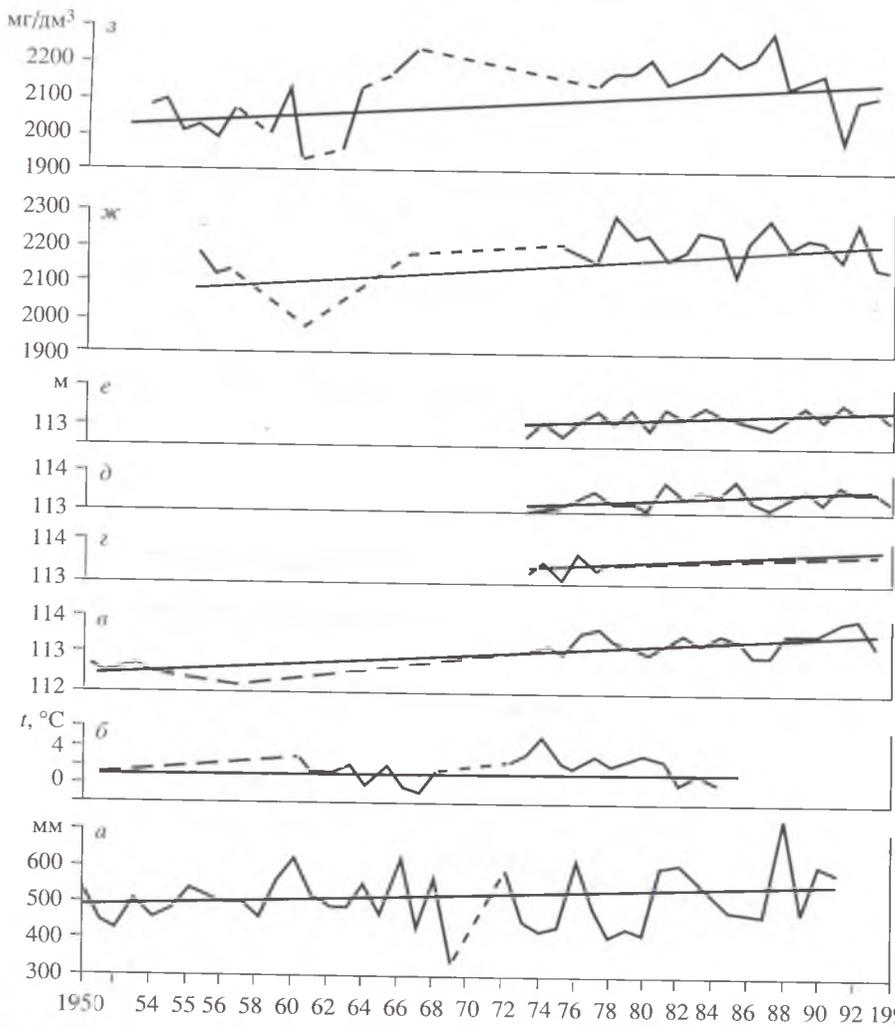


Рис. 16.1. Многолетний ход климатических и гидрологических компонентов района Кунгурской пещеры (длинные ряды).  
*а* — атмосферные осадки по м/с Кунгур; *б* — температура воздуха по м/с Кунгур; уровни воды, м: *в* — в р. Сылье, пост у Кунгурской пещеры; *г* — в колоде у Кунгурской пещеры; *д* — озера в гроте Дружбы Народов; *е* — озера в гроте Длинный; минерализация воды, мг/дм<sup>3</sup>: *ж* — в озере грота Длинный; *з* — в озере грота Дружбы Народов

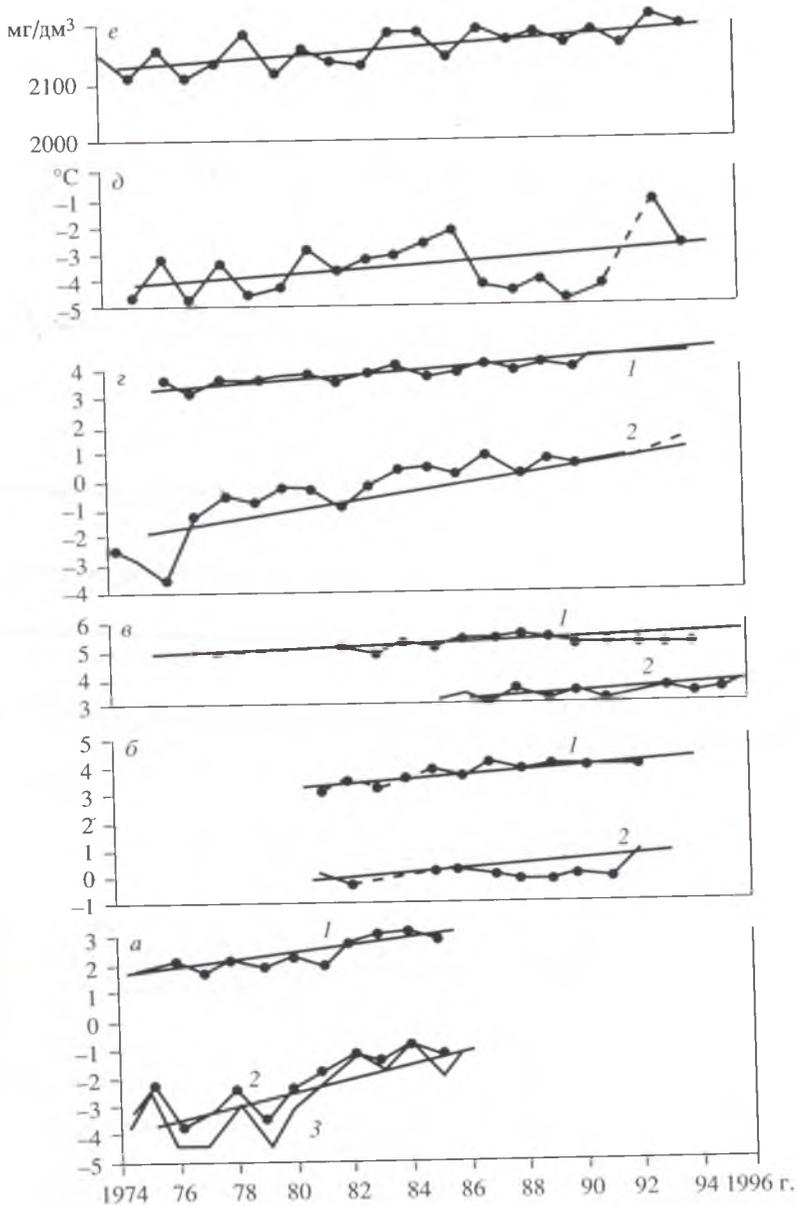


Рис. 16.2. Многолетний ход микроклиматических и гидрологических компонентов района Кунгурской пещеры (короткие ряды).  
*a* — температура в гроте Бриллиантовый по вытяжным термометрам: 1 — коренные породы (ангидриты), 2 — лед, 3 — гипс; *б* — температура пород по электротермометрам: 1 — грот Дружбы Народов, 2 — грот Руины; *в* — температура воды: 1 — грот Дружбы Народов, 2 — грот Руины; *г* — температура воздуха в гроте Полярный: 1 — верх, 2 — низ; *д* — температура воздуха в гроте Бриллиантовый; *е* — минерализация воды в гроте Крестовый, шурф

ет с интенсивностью  $0,15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$  ( $z, d$ ), а минерализация в озере грота Крестовый —  $4 \text{ мг}/\text{дм}^3\cdot\text{год}$  ( $e$ ). Таким образом, четко отмечается общее отепление пещеры, которое не может не сказаться на ее оледенении.

## 16.2. НАКОПЛЕНИЕ И АБЛЯЦИЯ ЛЬДА

Снежно-ледяные образования (СЛО) — основная достопримечательность Кунгурской пещеры. Режим СЛО определяется соотношением между накоплением и расходом вещества. При положительном балансе массы льда в пещере происходит усиление оледенения, при отрицательном — его деградация, при нулевом — оледенение стабильно. Разнообразие соотношений компонентов баланса массы СЛО затрудняет изучение балансов отдельных гротов и пещеры в целом. Накопление льда в пещере связано с ростом в ней конжеляционных и сублимационных льдов.

Накопление конжеляционного льда. Потенциальную возможность оледенения Кунгурской пещеры обеспечивает аккумуляция в ней зимнего холода (см. раздел 13.6), возможность аккумуляции льда — количество поступившей в нее воды. Водопритоки в пещере обладают малой водообильностью, так что под ними образуются в основном *сталактиты* и *сталагмиты*. Под органическими трубами чаще формируются *покровные наледы*.

В 1985—1986 гг. общий объем аккумуляции конжеляционного льда в пещере составлял  $4,6 \text{ м}^3$  (здесь и далее в водном эквиваленте). В гроте Крестовый прирост льда происходил за счет увеличения мощности наледи (150 мм за зиму).

Накопление сублимационного льда. Сублимация льда происходит при наличии градиента влажности воздуха пещерной атмосферы и поверхности льда, отрицательной температуре воздуха и при температуре предмета, на котором растет лед, ниже точки росы. При сублимации образуется *изморозь*. На формирование пещерной изморози влияют температура воздуха, степень его пересыщения влагой, скорость поступления влаги, а также интенсивность отвода тепла от места сублимации.

При понижении температуры воздуха от  $-0,5$  до  $-20,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . происходит смена одних форм кристаллов другими (путем нарастания на предыдущие), а при последующем повышении температуры воздуха — обратная смена форм [111]. По массе скоплений преобладают сублимационные кристаллы пирамидальной (гексагональной) и прямоугольной форм. Наибольшие скопления изморози приурочены к участкам полостей с движением воздуха. При слабом движении воздуха растут хорошо ограненные кристаллы изморози. Ветровые условия образования пещерной изморози изучены слабо. При ограниченном поступлении влаги (в виде пара) в полостях растут скелетные кристаллы изморози, а при обильном — сферические формы, состоящие из сростков пластин, игл, дендритов. При смешении потоков теплого влажного и холодного сухого воздуха происходит массовое образование сублимационных кристаллов льда (грот Бриллиантовый).

Максимум образования сублимационного льда приурочен к периоду минимальных температур внешнего воздуха, поступающего в пещеру (февраль—март). При резких похолоданиях все сечение пещерной галереи занимает поток сухого холодного воздуха, что приводит к испарению субли-

матов. Так как изморозь растет с расширением от основания, наиболее уязвимы для испарения и таяния именно места прикрепления кристаллов к своду. Поэтому в Кунгурской пещере в это время часто наблюдается осыпание кристаллов, которые испаряются или участвуют в образовании осадочно-метаморфического льда на полу (гроты Бриллиантовый и Полярный [259]).

Сублимационные кристаллы — как правило, сезонные образования, стаивающие весной или в начале лета. Но в тупиковых ходах, нишах, трещинах изморозь перелетовывает. Летняя (VIII—IX.1985 г.) сублимация льда происходит на ледяных поверхностях (на наледях) и идет в меньшем объеме, так как определяется только зимним запасом холода во льду. При этом образуются пластинчатые кристаллы льда до 5 мм в поперечнике, которые растут на ледяных кристаллах в соответствии со штриховкой Фореля (каждая пластинка сублимационного кристалла является как бы продолжением базисной плоскости кристалла субстрата). Летом сублимационные кристаллы под воздействием теплого воздуха местами озерняются и образуют значительные скопления плотного метаморфического льда на стенах и сводах.

В гроте Бриллиантовый проводились наблюдения за изменениями массы ледяного монолита, подвешенного на нити, для измерения интенсивности сублимации льда. На основе измерений удалось оценить, что в 1985—1986 гг. здесь накопилось около 0,7 м<sup>3</sup> сублимационного льда (в пересчете на воду). Средняя интенсивность сублимации составила 0,2 мм/сут, однако скорость сублимации оказалась непостоянной во времени.

Изучение интенсивности накопления СЛО в пещерах показывает, что в среднем для конжеляционных льдов оно составляет до 50 г/см<sup>2</sup>, для сублимационных — около 2 г/см<sup>2</sup> в год. Образование конжеляционных льдов отражает изменчивость водопритока, связанную с накоплением внешних твердых и жидких осадков, а сублимационных — зависит от температуры и влажности воздуха на поверхности и под землей.

Абляция (убывание) льда в пещере складывается из его таяния и испарения.

Таяние льда. Таяние СЛО в условиях пещер происходит без участия солнечной радиации, при слабом или отсутствующем движении воздуха [243]. На участках пещеры без движения воздуха таяние происходит при температурах не менее 0 °С и при влажности, близкой к 100 % (таяние льда в условиях конденсации влаги на нем). Совместное влияние температуры и влажности воздуха на таяние СЛО можно учесть, используя предложенное В. П. Пузановым понятие о реальной эквивалентной температуре воздуха. Оценить скорость таяния СЛО в пещерах можно при наличии данных по температуре и влажности или только по температуре воздуха в них [242].

Рассмотрим динамику таяния льда в гроте Крестовый (табл. 16.1). В модельном 1985 г. продолжительность периода таяния льда здесь составила 10 мес., средняя температура воздуха 0,5 °С, суммарное годовое таяние льда 198 мм. Измеренная речным способом абляция составила около 180 мм (ошибка 10,5 %). Расчеты показали, что в 70-е гг. (до оборудования выходного тоннеля) она была невелика; затем началось увеличение таяния. С 80-х гг. температура воздуха в пещере резко повысилась, и в насто-

Таяние льда в северной части грота Крестовый

Таблица 16.1

Показатель	Год				
	1970	1975	1980	1985	1990
Продолжительность теплого периода, мес	1	4	6	10	8
Средняя температура воздуха, °С	0,1	0,2	0,1	0,5	1,0
Суммарное таяние льда, мм слоя воды	9,6	49,2	62,2	198,0	259,0

ящее время льда в гроте почти не осталось. Это связано в первую очередь не с климатическими причинами, а с изменением антропогенного воздействия на климат полости.

Величина таяния льда в отдельных гротах пещеры весьма изменчива и растет при удалении от входа.

**Испарение.** Испарение СЛО происходит в пещере в зимнее время, когда абсолютная влажность поступающего в полость воздуха немного ниже влажности воздуха у поверхности льда, а также при отсутствии солнечной радиации и небольших скоростях ветра (т. е. турбулентный тепло- и влагообмен невелики).

Для исследования испарения льда в пещере применяли реечный и весовой методы [245]. В последнем случае из наледного льда вырезали монолиты размерами 8×7×6 см. На исследуемых высотах на капроновой леске подвешивали по два монолита. Измерения температуры, влажности воздуха и скорости его движения производили на уровне подвеса. Испарение с монолита моделировало испарение сталактитов и сталагмитов, а испарение с поверхности наледей имитировал тонкостенный алюминиевый стакан, заполненный замороженной пещерной водой. Стакан устанавливался в лунку так, чтобы уровни льда в стакане и наледи совпадали.

В Кунгурской пещере интенсивность испарения льда измеряли только во входных гротах, где заметны суточные колебания температуры воздуха и дефицита влажности. В гроте Бриллиантовый максимум испарения льда приходится на январь-февраль, когда ветры в пещере наиболее сильны, а дефицит влажности воздуха максимален. Характер испарения льда по длине пещеры меняется: от входа в глубину пещеры оно растет, а далее стабилизируется.

Межгодовой характер испарения льда в пещере различен и зависит от интенсивности проветривания пещеры. На участках, где стены пещеры и воздух имеют постоянные отрицательные температуры, испарение льда является основным агентом абляции, а в отдельные годы — всего баланса массы льда. Это хорошо видно на массивах многолетнего конгелационного льда, которые на протяжении многих лет отрезаны от источников водного питания. Наблюдения за многолетней ледяной колонной в гроте Полярный показали, что в 1961—1985 гг. на высоте около 1 м от пола с нее испарился слой льда толщиной около 40 мм (0,2 г/см<sup>2</sup>). В Крестовом гроте испарение льда в отдельные годы достигало 180 мм/год, а в других гротах было немного меньше. По мере углубления в полость процесс становится менее интенсивным.

Наибольший вклад в абляцию в Кунгурской пещере вносит таяние, суммарная величина которого может достигать несколько сантиметров в год, тогда

как годовое испарение льда измеряется миллиметрами. В 1970—1990 гг. убыль льда в пещере за счет таяния в среднем составляла около  $12,5 \text{ м}^3$ , а за счет испарения —  $4,4 \text{ м}^3$ . Компоненты абляции разнесены во времени: таяние происходит в теплый период года, испарение — в холодный.

### 16.3. ЭВОЛЮЦИЯ ОЛЕДЕНЕНИЯ

За 300 лет с момента появления первых описаний Кунгурской пещеры многие исследователи отмечали изменчивый характер ее подземных льдов, периодически перекрывавших входное отверстие. Несмотря на нерегулярность наблюдений, в общем сложилось верное представление о накоплении зимнего холода в пещере. Е. П. Дорофеев [120] отмечал, что эволюция ледяных образований происходит в зависимости от изменений температуры и влажности воздуха на поверхности и в пещере.

Особенности развития оледенения пещеры можно проследить, используя три метода: визуальный, микроклиматический и балансовый.

**Визуальный метод** заключается в сравнении описаний пещеры, составленных в разные годы. До 1720 г. на плане пещеры ледяные образования не изображались [162], а при описании пещеры не упоминались [390]. В. Н. Геннин [64] при характеристике пещеры за 1722—1734 гг. отмечал “иней, висящий с потолка курioзными видами на поляршина”, “великие пирамиды изо льда”, “заплывшие льдом и ставшие непроходимыми ответвления пещеры”.

Пещера является воздухопроводящей системой, самыми нестабильными элементами которой считаются привходная часть, где идет накопление льда, и верхние концы вертикальных расщелин и каналов, в некоторые из которых сползает рыхлый грунт, увлажняющийся талой водой и конденсационной влагой. Если вход иногда расчищался ото льда и глыб, то вертикальные каналы всегда ограничивали активную циркуляцию воздуха. Лишь очень редкие события в истории пещеры — провалы, резко меняли условия: возрастали воздухообмен и зимнее накопление холода. Именно такое событие отметил В. Н. Татищев [390] в 1720—1730 гг.: “...в бытность мою учинился над оной на поле великой провал, и когда внутрь посылал осматривать, то явилось, что оное обвалилось в ту пещеру”.

Оледенение пещеры достигло максимума к 1770 г., когда многолетние льды были встречены в районе Метеорного грота [213]. Холодный режим Кунгурской пещеры сохранялся до 20-х гг. XX в., затем началось потепление. Интенсивное охлаждение полости породило процессы, тормозящие циркуляцию воздуха: скопления льда уменьшали сечение ходов или перекрывали их полностью; обильная конденсация влаги усиливала перемещение грунта, закрывающего вертикальные каналы; вход в пещеру заваливался и зарастал льдом на длительный срок.

В начале XX в. естественный режим пещеры был нарушен сооружением входной двери. Накопление холода стало зависеть от того, на какое время она открывалась для зимней вентиляции. Еще более нарушил нормальный круговорот воздуха входной тоннель, сооруженный в 1937 г. Поступающий через него поток морозного воздуха препятствовал росту сублимационных ледяных кристаллов в Бриллиантовом гроте. Поэтому тоннель был закрыт шлюзовыми дверями, а запас холода по-прежнему

пополнялся через Старый вход, который открывался на зиму и закрывался летом.

С 1952 г. Кунгурский стационар начал круглогодичную регистрацию температуры, влажности, направления и скорости воздушных потоков. Теория накопления зимнего холода была подтверждена расчетом теплового баланса полости [223]. При этом обнаружилась сложная картина эволюции пещерных льдов, для объяснения которой недостаточно учитывать только внешние климатические изменения [114]. К началу 1960-х гг. оледенение в пещере удалось восстановить, и она продолжала радовать посетителей своим ледяным убранством.

В 1973 г. был сооружен выходной тоннель. Возникла сквозная система циркуляции воздуха, и в 80-е гг. начался процесс деградации оледенения в пещере. В 1974 г. устье Телячьего ходка, откуда выходил увлажненный воздух, затекло льдом, и количество образующихся в гроте Бриллиантовый кристаллов резко уменьшилось. В 1976 г. Телячий ходок был расчищен, но интенсивность потока увлажненного воздуха не восстановилась. В 1978 г. Е. П. Дорофеев составил проект восстановления условий роста ледяных кристаллов.

Одним из факторов деградации оледенения в пещере стало катастрофическое наводнение на р. Сылве в 1979 г., которое затопило ближние гроты и поглотило часть накопленного в ней холода.

В 1983 г. Старый вход был засыпан глыбами, сорвавшимися со скалы, а следующий за ним узкий проход заполнен льдом до свода. Чтобы охладить пещеру, пришлось открывать в морозы двери входного тоннеля, что нанесло существенный ущерб ледяным кристаллам Бриллиантового грота. Для усиления вентиляции пещеры шахтеры из г. Березники отбойными молотками расчистили Старый вход от обломков пород и льда. Несмотря на это, в последующие годы потепление пещеры продолжалось.

Лишь в августе 1985 г. выходной тоннель был герметизирован, однако регулярное проветривание пещеры зимой вообще не проводилось, а дверь в тоннель открывалась только для пропуска посетителей. В результате в 1986 г. зоны многолетнего и сезонного оледенений у выходного тоннеля сократились; на сводах грота Вышка впервые с 1973 г. не появились ледяные кристаллы.

К началу XXI в. оледенение в пещере значительно уменьшилось, граница постоянного льда в ней придвинулась ко входу, достигнув грота Данте. Большую часть года здесь происходило таяние льда, хотя в 1960—1970-е гг. здесь круглогодично была отрицательная температура. Летом 2001 г. в гроте Бриллиантовый температура воздуха поднялась до положительных значений; растаяли сублимационные кристаллы на своде грота, и он потерял свою былую красоту. Чтобы восстановить оледенение пещеры, в ней был проведен комплекс профилактических работ (возобновлено зимнее проветривание пещеры; восстановлена, а затем регулярно подновлялась ледяная перемычка между гротами Бриллиантовый и Полярный; сооружена решетчатая дверь во входном тоннеле, позволяющая наладить зимнее проветривание). В результате зона сезонного промораживания зимой 2002/03 гг. переместилась до грота Морское Дно, а количество натечного льда в пещере существенно увеличилось. Для восстановления сублимационных кристаллов в Бриллиантовом гроте зимой 2004 г. была произведена

расчистка от льда и глыб Старого входа на участке протяжением 10 м до сечения 1.0 (высота)×0.7 (ширина) м. Удалено скопление льда и глыб в центральной части Бриллиантового грота. Для улучшения циркуляции увлажненного воздуха выполнена расчистка Телячьего хода до сечения 1,3 м.

Проведение регулярных микроклиматических съемок в этой части пещеры и всех перечисленных выше мероприятий позволит в какой-то мере управлять процессом оледенения пещеры в будущем. Для сохранения количества льда в пещере, близкого к постоянному, и устойчивости сводов, которая зависит от их промороженности, желательно создать такие условия проветривания пещеры, чтобы граница зоны постоянно отрицательных температур воздуха оставалась год от года на приблизительно одном и том же месте. Как показала практика предыдущих работ по зимнему охлаждению пещеры, наиболее благоприятное место границы зоны отрицательных температур проходит по южной или средней части Крестового грота. Анализ рис. 16.3 свидетельствует о том, что наиболее близко ко входу в пещеру северная граница постоянного оледенения находилась в 1950, 1987 и 2002 гг. (200 м от бровки склона), а наиболее далеко — в 1967 г. (400 м). Самый дальний пункт пещеры, где по литературным данным в 1770 г. отмечено оледенение, — это грот Метеорный. Площадь многолетних льдов в пещере сократилась практически вдвое (рис. 16.4).

Зимой в пещере образуются натечные ледяные образования: сталактиты, сталагмиты, колонны, которые возникают в зоне сезонного оледенения. Здесь инфильтрационные воды проникают в охлажденные зимой (ниже 0 °С) подземные полости, формируя причудливые скульптуры натечного льда, исчезающие в летний период. Распространение разных форм льда показано на рис. 13.18. За пределами зимней изотермы 0 °С начинается обширная теплая часть пещеры [24, 459].

Данные об обледенении пещеры за 300 лет свидетельствуют о том, что в нем существует ритмичность, обусловленная климатическими причинами.

Короткопериодические (суточные) колебания. Суточные колебания температуры воздуха вне пещер оказывают влияние на характер циркуляционных процессов в полости. Смена температур воздуха вне пещеры проявляется в форме сталагмитов (появление “пережимов” на палкообразных формах), слоистости натечков (чередование слоев прозрачного и молочно-белого льда), интенсивности конденсационных процессов (разная толщина слоев) и пр.

Среднепериодические (недельно-месячные) колебания вызывают изменения объема накоплений льда, их формы и химического состава. Проявляются в таянии СЛО, их повторном образовании (сублимационные льды, льды водоемов, некоторые разновидности наледей и пр.), изменениях структуры поверхностных слоев и пр.

Сезонные и годовые колебания проявляются в формировании перелетовывающих форм, изменениях в их структуре, загрязненности, химическом составе, в накоплении и деградации льда. Наиболее четко прослеживаются в конжеляционных (многолетние наледи) и осадочно-метаморфических (снежники в пещерах) льдах.

Многолетние ритмы колебаний динамики накопления льда в Кунгурской пещере не доказаны.

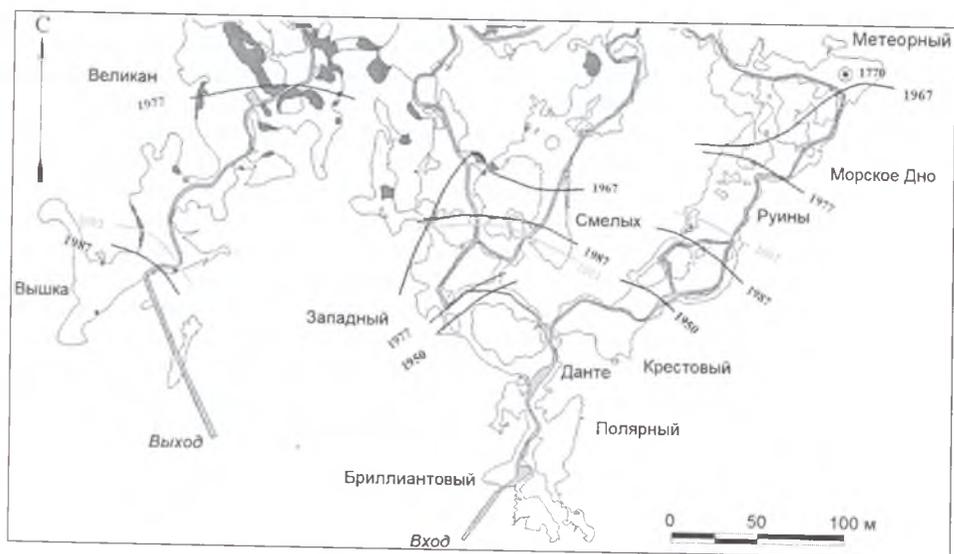


Рис. 16.3. Изменения зимнего положения границ оледенения в ближней части Кунгурской пещеры



Рис. 16.4. Расположение многолетних льдов в Кунгурской Ледяной пещере.  
*а* — в 1967 г. по плану Е. П. Дорюфесса (1020 м<sup>2</sup>), *б* — в 2001 г. по данным О. И. Кадебской (530 м<sup>2</sup>)

Так как накопление и деградация льда в пещерах определяются не только климатическими причинами, но и их морфологией, возможны “аритмичные” процессы оледенения, обусловленные заполнением всего или части объема полости льдом. После этого пещера “выключается” из общего ритмического процесса, обусловленного сезонными и годовыми циклами колебаний температуры воздуха и увлажненности. Примеры таких проявлений льдообразования имеются и в Кунгурской пещере. Под органными трубами в ней располагаются поднимающиеся под потолок осыпи. Из органных труб всю зиму капает вода, которая замерзает на склонах осыпей в виде наледей. Со временем наледи поднимаются до сводов и смыкаются с ними. Дальнейший рост наледей становится невозможным, поскольку холодный воздух уже не может больше попадать к текущей воде. После этого начинается деградация льда (летом — из-за таяния, зимой — из-за испарения льда), которая продолжается до тех пор, пока не возобновится доступ воды из органных труб к наледям. Наблюдения за льдом с 1978 по 2000 г. в гротах Бриллиантовый, Полярный, Скандинавский и Данте показали, что такие циклы наледеобразования могут продолжаться многие десятки лет.

Приведенные выше данные дают качественную характеристику динамики оледенения Кунгурской пещеры. Для ее количественной оценки следует использовать микроклиматический и балансовый методы.

**Микроклиматический метод** заключается в оценке положения изотерм среднегодовой температуры воздуха  $0,1$ — $0,2$  °С (граница постоянного оледенения) и  $1,5$  °С (граница сезонного оледенения) [198]. На рис. 16.5 показан многолетний ход среднегодовой и среднезимних температур воздуха на метеостанции Кунгур и в гротах пещеры с оледенением. Видно, что температура хорошо коррелирует со среднезимними отрицательными температурами воздуха.

Среднегодовая температура воздуха в гротах Бриллиантовый и Данте на протяжении всего периода наблюдений была ниже  $0,1$  °С, т. е. гроты находятся в пределах зоны постоянного оледенения; в гроте Крестовый в 1984 г. она достигает  $0,1$  °С, а в 1992—1995 гг. температура превосходит пороговое значение, а оледенение в гроте становится сезонным; в гроте Руины температура воздуха в 1974—1980 гг. сохраняется ниже пороговой для сезонного оледенения, а с 1980—1992 гг. — выше. По всем температурным кривым четко виден положительный тренд — возрастание температуры с 1969 по 1995 гг. Оледенение пещеры чутко реагирует на изменения внешних условий. При внешнем похолодании протяженность промороженной зоны увеличивается, при потеплении — уменьшается. Расчеты показывают, что при понижении среднегодовой и среднеянварской температур воздуха вне пещеры на  $1,0^\circ$  величина зоны отрицательной температурной аномалии в пещере возрастает в среднем на 140 м, а на  $2,0^\circ$  — на 225 м [223].

Таким образом, микроклиматические наблюдения подтверждают визуальные данные. Отрицательные температуры послужили причиной возникновения оледенения у Старого входа в пещеру (гроты Первый, Бриллиантовый, Полярный, Скандинавский, Данте). Поскольку режим проветривания пещеры в разное время различен, то и масштабы оледенения в пещере меняются во времени [120]. В зимнее время происходят

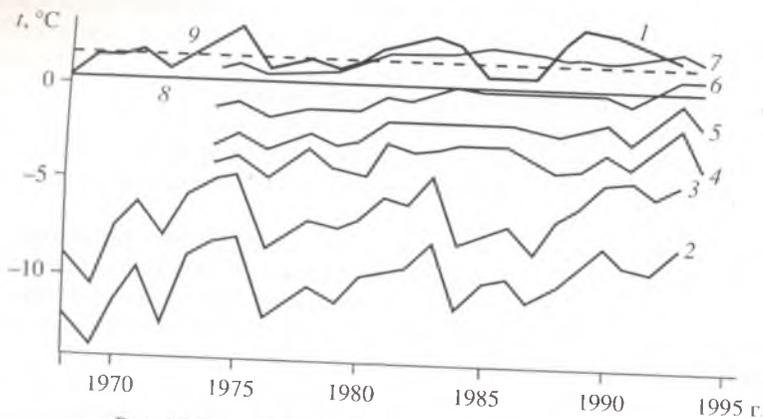


Рис. 16.5. Многолетний ход температуры воздуха: на метеостанции Кунгур: 1 — среднегодовой, 2 — среднезимней (период ниже 0,0 °С), 3 — среднезимней (за X—IV); 4—7 — среднегодовой температуры воздуха в гротах: 4 — Бриллиантовый, 5 — Данте, 6 — Крестовый, 7 — Руины; границы оледенения: 8 — постоянного, 9 — сезонного

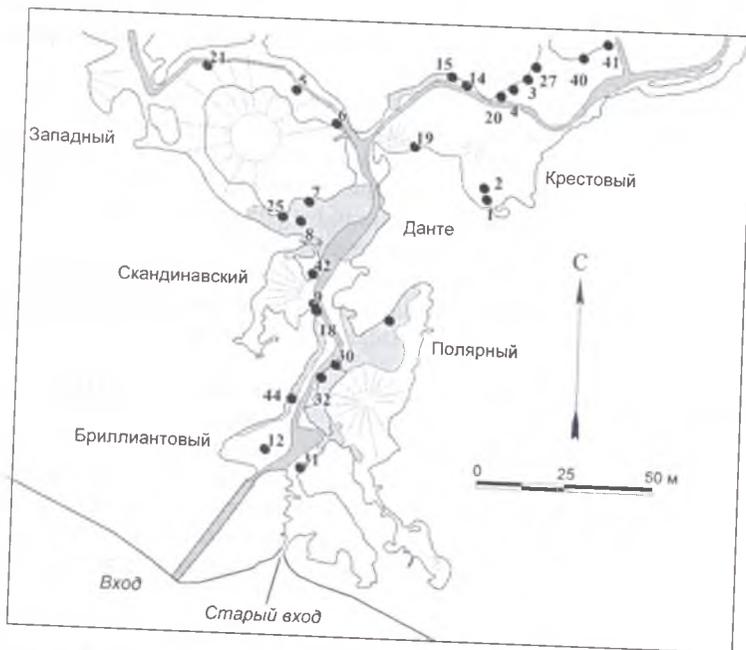


Рис. 16.6. Места заложения реперов (обозначены цифрами) во льду юго-восточной части Кунгурской пещеры (1985—1990 гг.)

накопление холода в пещере и рост ледяных образований. Весной накопление холода в ней почти не отмечается, но накопление льда продолжается за счет уже существующего запаса холода. Летом тепло выносится в зону оледенения из глубины пещеры, что вызывает таяние ледяных образований и уменьшение зоны оледенения в пещере. Осенью вынос тепла из пещеры сокращается, и процесс таяния льда затухает. При устойчивом оледенении в пещере этот процесс повторяется из года в год, а границы постоянного и сезонного оледенений колеблются около некоторых средних значений.

Благодаря отрицательной температуре пород вокруг привходовой зоны пещеры здесь часть года или весь год сохраняется отрицательная температура воздуха и развиты многолетние льды. В тех местах, где промерзание пород носит сезонный характер, а частично в местах с постоянно промерзшими стенами, развиты однолетние льды.

В 1980-е гг. в пещере начались существенные изменения микроклимата, которые выразились в повышении среднегодовых температур воздуха почти во всех частях пещеры. Это привело к уменьшению оледенения, особенно в северной части грота Крестовый. Изменилась и граница сезонного оледенения пещеры. Если в 1968 г. оно достигало грота Метеорный, то теперь даже на юге грота Руины отмечается лишь кратковременное появление льда. Исчезли многолетние наледи в северной части Крестового грота, почти исчез многолетний лед в ходе грота Толстяков, существенно сократилось количество льда в гроте Данте.

**Балансовый метод.** В 1984—1985 гг. Кунгурский стационар и Институт географии АН СССР провели<sup>13</sup> детальные исследования аккумуляции и абляции льда в пещере (рис. 16.6, табл. 16.2). В пяти гротах во льду были пробурены отверстия, в которые установили около 50 реперов (деревянные или пластмассовые стержни). Длина их выступающей надо льдом части периодически измерялась. Ее увеличение свидетельствовало об убыли льда, а уменьшение — о его нарастании. Полные данные этих наблюдений не сохранились (часть реперов вытаяла, другие нарушены), поэтому ограничимся выводами, сделанными за те годы, по которым имеются данные [133, 243, 245].

Многолетний баланс массы льда в пещере за 1984—1985 гг. (алгебраическая сумма годовой аккумуляции и абляции льда [245]) составляет  $-11,6 \text{ м}^3$ . В табл. 16.2 приведены данные о таянии льда по 8 реперам в разных пунктах пещеры, а в табл. 16.3 — средние значения удельного баланса массы льда по отдельным гротам. Видно, что от грота Бриллиантовый к гроту Крестовый он увеличивается почти в 9 раз: от  $-0,6$  до  $-5,2 \text{ г/см}^2\text{-год}$ , т. е. деградация оледенения усиливается с удалением от входа.

Изучение баланса массы льда по отдельным участкам пещеры показало, что, несмотря на его общее отрицательное значение, в ней имеются разные зоны: в ближней части он положительный, в центральной — близок к нулю, в дальней — отрицательный (табл. 16.4).

<sup>13</sup> В 1955—1962 гг. реперные наблюдения проводились в гротах Бриллиантовый и Полярный [220], но данные не сохранились.

Абляция по реперам в ближней части пещеры

Таблица 16.2

Грот* и № репера	Дата замера		Абляция			Дата замера		Абляция		
	H, мм		$\Delta H$ , мм	мм/год	г/см <sup>2</sup>	H, мм		$\Delta H$ , мм	мм/год	г/см <sup>2</sup>
	21.I.1987 г.	15.I.1990 г.				19.XII.1990 г.	16.XII.1992 г.			
Б-12	14	28	14	4,7	-0,4	40	60	20	10,0	-0,9
Б-23	34	53	19	6,3	-0,6	72	105	33	17,5	-1,6
Б/П-44	18	44	26	8,7	-0,8	46	61	15	7,5	-0,7
П/Д-18	52	120	68	22,7	-2,1	126	140	24	12,0	-1,1
Д-7	20	59	39	13,0	-1,2	70	90	20	10,0	-0,9
Д-8	19	49	30	10,0	-0,9	65	79	14	7,0	-0,6
Д-25	37	64	27	9,0	-0,8	75	93	18	9,0	-0,8
К-19	108	145	45	15,0	-1,4	151	165**	14	14,0	-1,3

\* Гроты: Б — Бриллиантовый, П — Полярный, Д — Данте, К — Крестовый.

\*\* Дата замера 16.XII.1991 г.

Изменение удельного баланса массы льда\* в Кунгурской пещере [133]

Таблица 16.3

Грот	Измерения		Удельный баланс, г/см <sup>2</sup> ·год
	начало	конец	
Бриллиантовый	29.IX.1985	16.XII.1992	-0,6
Полярный	04.VIII.1985	16.XII.1992	-0,7
Скандинавский	14.VIII.1985	16.XII.1992	-1,3
Западный	04.VIII.1985	16.XII.1992	-2,1
Крестовый	29.IX.1985	16.XII.1992	-5,2

\* Удельный баланс массы льда — отношение годового баланса массы льда к площади распространения льда.

Баланс массы льда в Кунгурской пещере по отдельным участкам (1985—1986 гг.)

Таблица 16.4

Компонент баланса	Длина участка, м								
	0—50	51—75	76—100	101—125	126—150	151—175	176—200	201—225	226—250
Накопление конжеляционного льда, м <sup>3</sup>	0,08	0,39	0,01	0,12	1,60	0,10	0,70	0,40	0,01
Накопление сублимационного льда, м <sup>3</sup>	0,01	0,48	0,12	—	—	—	—	—	—
Сумма, м <sup>3</sup>	0,09	0,87	0,13	0,12	1,60	0,10	0,70	0,40	0,01
Таяние, м <sup>3</sup>	—	—	—	—	0,15	1,62	6,88	2,86	1,00
Испарение, м <sup>3</sup>	0,02	0,39	0,27	0,07	0,75	0,40	0,40	0,05	0,01
Сумма, м <sup>3</sup>	0,02	0,39	0,27	0,07	0,90	2,02	7,28	2,91	1,01
Баланс массы льда	+0,07	+0,48	-0,14	+0,05	+0,70	-1,92	-6,58	-2,51	-1,0
Удельный баланс, г/см <sup>2</sup>	1,59	0,62	-0,31	0,05	0,42	-2,9	-10,89	-17,57	-18,2

## 16.4. ПРИЧИНЫ ДЕГРАДАЦИИ ОЛЕДЕНЕНИЯ

Для объяснения деградации оледенения Кунгурской Ледяной пещеры выдвигают разные точки зрения [114, 123, 124, 151, 221 и др.]. Для выявления природных и антропогенных факторов в изменении климатических закономерностей на прилегающей к пещере территории были проанализированы материалы наблюдений по температуре и осадкам метеостанции г. Кунгур. Остальные метеозаписи в работе не рассматриваются, так как их влияние на оледенение в пещере несущественно.

**Изменение климата.** Накопление холода в пещере происходит при отрицательной температуре внешнего воздуха менее  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поэтому наиболее показательны изменения температуры, произошедшие за холодный период времени (октябрь—апрель). Были отобраны данные по средним температурам воздуха за период при  $t < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По этим результатам были получены линейные тренды (рис.16.7), по угловым коэффициентам которых видно нарастание показателя во времени. Угловым коэффициентом в формуле для линейного тренда для среднегодовых температур воздуха при  $t < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  равен 0,021, при  $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  — 0,036; для среднегодовых температур коэффициентом линейного тренда равен 0,014. На рис. 16.8 четко прослеживается уменьшение длительности периода зимней циркуляции воздуха с течением времени.

В целом за последние 60—70 лет изменение климата проявилось в повышении температуры и увеличении осадков. Суровость климата снижается в основном за счет роста среднемесячной температуры воздуха в зимний период. Количество осадков увеличивается и в теплое, и в холодное время года.

Характер изменения масштабов оледенения пещер при вариациях внешней температуры воздуха можно оценить по модельным расчетам [242]. Понижение среднеянварской и среднегодовой температур воздуха на

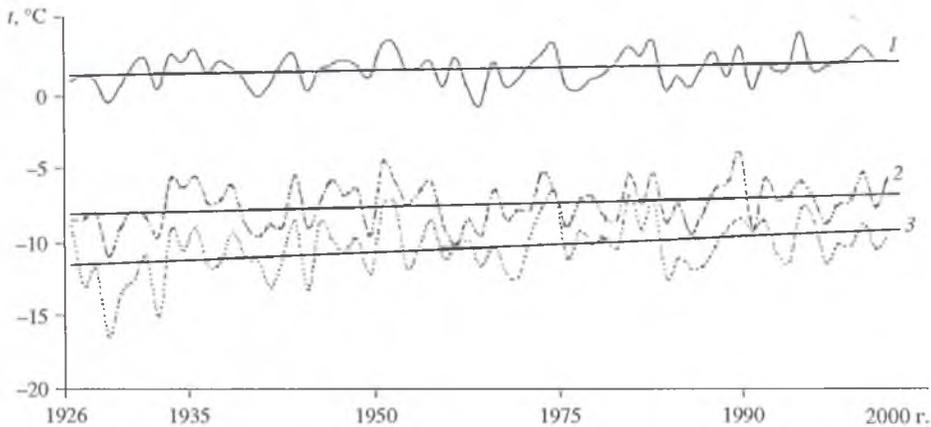


Рис. 16.7. Динамика температуры воздуха на поверхности.

1 — среднегодовая температура воздуха, формула тренда ( $y = 0,014x + 1,2$ ); 2 — средняя температура воздуха за период с  $t < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ( $y = 0,021x - 8,2$ ); 3 — средняя температура воздуха за период с  $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $y = 0,036x - 11,6$ )

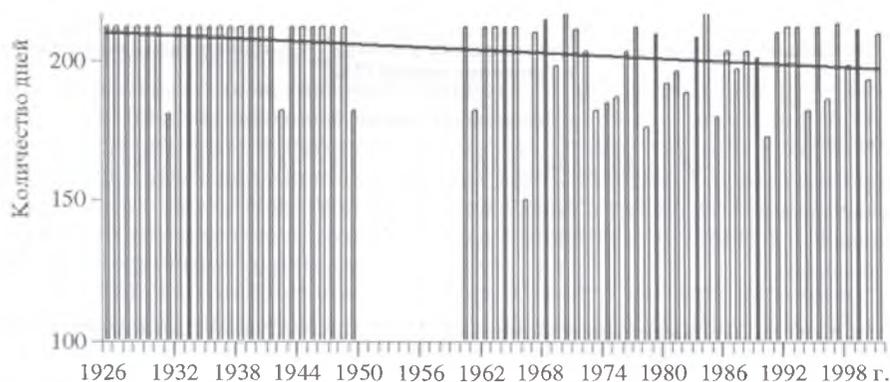


Рис. 16.8. Изменение длительности зимней циркуляции воздуха в Кунгурской пещере с 1926 по 2002 гг.

1 °С приведет к увеличению протяжения зоны отрицательной температурной аномалии в пещере на 140 м (расчеты выполнены для полости в известняках с фиксированными морфологией, теплофизическими свойствами породы и воздуха), т. е. говорить о полном исчезновении зоны оледенения в пещере только по естественным причинам еще рано. Повышение среднегодовой температуры воздуха на поверхности на 0,5 °С при естественном режиме проветривания пещеры привело бы к уменьшению зоны отрицательной температурной аномалии на 60—70 м. Искусственное проветривание пещеры изменяет это соотношение. В табл. 16.5 показаны максимальные значения среднеянварской температуры воздуха вне пещер (при заданной среднегодовой температуре воздуха), при которых еще возможно оледенение пещер.

Таким образом, для пещер, исходя из климата равнинной части России, пределом распространения оледенения в полостях является изотерма среднегодовой температуры воздуха вне пещер около +4,0 °С [242].

**Кольматация путей движения воздуха.** Сведение лесов на поверхности Ледяной горы привело к уплотнению почвы и уменьшению циркуляции воздуха между пещерой и поверхностью.

Незначительные выходы воздуха в зимний период фиксируются в воронках над гротами Эфирный и Мокрая Кочка, а более интенсивные — вдоль бровки склона, только над ближними к склону гротами [223]. В процессе эволюции рельефа происходили активизация и затухание образования воронок, которые являются поглотителями воды и воздуха. Свежие провалы улучшают просачивание воды и поступление воздуха в пещеру. Так, после провала в 2002 г. весной наблюдалось интенсивное просачивание воды в грот Крестовый — расход потока составил 10 л/мин. Со временем провалы под воздействием эрозионных процессов заполняются рыхлым материалом, и доступ воздуха и воды в пещеру существенно уменьшается [109]. Несмотря на то, что на Ледяной горе провалы образуются относительно часто (2 шт/год), непосредственно над пещерой они появляются достаточно редко. В истории жизни пещеры этот фактор сыграл большую роль, но, поскольку это медленный геологический процесс, в современную эпоху его влияние не столь существенно. По

Предельно высокие температуры воздуха в январе (°С), при которых возможно оледенение пещер [242]

Тип пещеры	Среднегодовая температура воздуха местности, °С										
	-2,0	-1,0	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Горизонтальная	-2,3	-4,7	-7,0	-9,7	-11,7	-14,0	-16,3	-18,7			
Наклонная			-1,0	-1,3	-1,7	-2,2	-2,7	-3,0	-3,3	-3,7	-4,0
Вертикальная			-1,3	-1,7	-2,1	-2,6	-3,0	-3,4	-3,9	-4,3	-4,7

сравнению с другими факторами кольматацию путей движения воздуха можно считать второстепенной.

Влияние растительности на микроклимат пещер изучено недостаточно. Растительность (прежде всего древесная) регулирует снегонакопление (ослабляет метелевое перераспределение снега) [136], делает весенний сход снега более постепенным, закрепляет почву, что препятствует заполнению верхних входов горизонтальных пещер рыхлым материалом. Густая древесная растительность способствует сохранению более низких температур воздуха под кронами деревьев в летнее время. Например, при строительстве горнолыжной трассы некоторые воронки на Ледяной горе были засыпаны, что привело к уплотнению почвы и уменьшению циркуляции воздуха между пещерой и поверхностью [20]. В. С. Лукин предложил устроить искусственную вентиляцию, пробуриив над одним из гротов пещеры одну-две скважины диаметром 300—500 мм и глубиной 75 м. Для проверки этой идеи необходимы термодинамические расчеты.

**Влияние поверхностных водотоков.** Из трех рек, протекающих в пределах исследуемой территории, существенное воздействие на Кунгурскую Ледяную пещеру оказывает р. Сылва (характеристика ее водного режима приведена в первой главе), особенно во время весеннего паводка, когда происходит интенсивное поступление речных вод в карстовый массив. Во время межени наблюдается обратное движение грунтовых вод (в сторону реки).

Изменение климата и вырубка лесов в верховьях бассейна р. Сылвы создали благоприятные условия для пополнения запасов почвенной влаги и подземных вод, увеличения их уровня и годового речного стока. В результате за последние 60 лет значительно возросла величина подъема паводковых вод, что в свою очередь привело к более частым наводнениям. Так, если в 1957—1978 гг. отмечены три высоких паводка (1957, 1965, 1966 гг.), то в последующие девять лет они произошли уже четырежды (1979, 1981, 1985 и 1987 гг.; [152]). В первый промежуток уровень рек Сылвы и Ирени не повышался более 6,5—6,9 м над меженью, а во втором этот подъем превысил 7—7,5 м. Наиболее высокие половодья произошли в 1979, 1987 и 1998 гг., когда уровень рек поднимался на 7,86; 7,46 и 7,6 м соответственно. Во время наводнения в 1979 г. значительная часть пещеры была затоплена водой, которая поступала не только по трещинам, но и через входной тоннель [152].

Во время наводнений паводковые воды способствовали существенному уменьшению запаса холода в пещере. После строительства дамбы в 1985 г.

паводковые воды перестали напрямую через входной тоннель попадать в зону постоянного оледенения.

**Регулирование проветривания пещеры.** Морфология пещер на таяние снежно-ледяных образований влияет опосредованно — через температуру и влажность воздуха, поскольку для каждого типа полостей характерен свой температурно-влажностный режим [245]. Изучение и регулирование искусственного проветривания пещеры началось после изменения ее морфологии, что привело к нарушению естественной вентиляции и возникла проблема сохранения ледяного убранства.

Строительство искусственных сооружений в пещере изменило движение воздушных потоков и приток воздуха в пещеру. В начале XX в. естественный режим пещеры был нарушен сооружением входной двери. Накопление холода стало зависеть от того, на какое время она открывалась для зимней вентиляции. Еще более изменился нормальный круговорот воздуха после сооружения входного тоннеля в 1937 г. До проходки тоннеля воздух в пещеру попадал через естественный Старый вход и по извилистому пути, проходя через Первый грот, из низкого лаза попадал в грот Бриллиантовый, создавая зону разряжения. Сбоку из Телячьего ходка, расположенного на север от Бриллиантового грота, подсасывался более теплый влажный воздух, поэтому в гроте создавались наиболее благоприятные условия для образования сублимационных кристаллов, которыми издавна славилась Кунгурская Ледяная пещера. Циркуляция же через входной тоннель отчасти препятствует росту сублимационных ледяных кристаллов в Бриллиантовом гроте, так как поток морозного воздуха поступает сразу в грот с южной стороны, при этом изменялись площадь потока и скорость поступления воздуха. Когда открываются двери, струя морозного воздуха уже не создает зоны разряжения, а направляется навстречу тепловому воздуху в Телячий ход, подпруживая его. Поэтому запас холода пещеры решено было пополнять через Старый вход, который открывался на зиму и закрывался летом. Диаметр сечения пещерного тоннеля определяет сопротивление движению воздуха: чем меньше диаметр, тем больше сопротивление, тем меньше скорость ветра, меньше охлаждение полости, и наоборот. Сопротивления в горизонтальных пещерах могут быть рассчитаны по формуле

$$\xi = \frac{2fL}{D} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{h}{L} \left( \frac{D}{d} \right)^5 \right\}, \quad (16.1)$$

где  $f = 0,04—0,1$ ;  $L$  — длина прохождения воздуха по пещере;  $h$  — перепад высот;  $D$  — диаметр горизонтального хода;  $d$  — диаметр вертикальных каналов. Если  $f = 0,1$ ;  $L = 700$  м;  $h = 80$  м;  $D = 2$  м;  $d = 1$  м, то  $\xi = 198$ . При уменьшении диаметра нижнего тоннеля вдвое (при неизменном  $d$ ) сопротивление увеличивается в 1,6 раза, а скорость ветра уменьшается на 20 %. Естественно, чем меньше диаметр тоннеля, тем больше холода нужно для оледенения пещеры, и наоборот. Если при одних и тех же климатических условиях вне пещеры, постоянной ее форме и неизменной скорости ветра менять диаметр тоннеля, то и минимальная величина протяженности зоны отрицательной температурной аномалии будет ме-

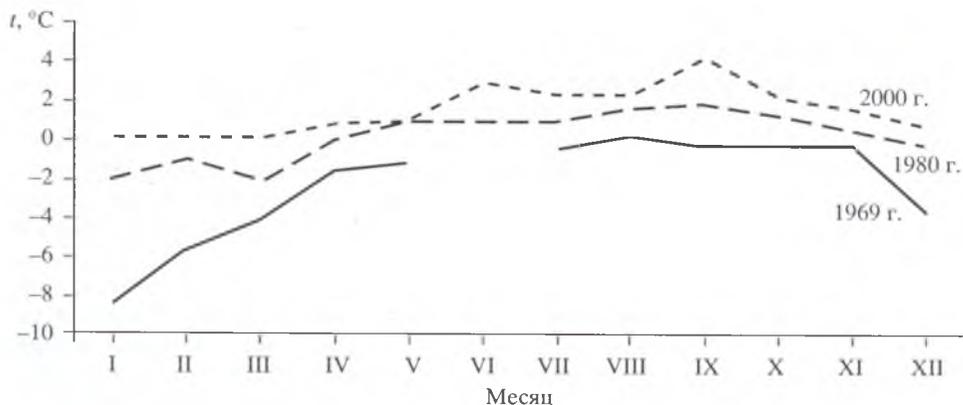


Рис. 16.9. Изменение температуры в гроте Крестовом

няться [242]. Сейчас сопротивление движению воздуха ( $\xi$ ) в естественном ходе в 3,3 раза выше, чем во входном тоннеле ( $D = 2$  м). Его диаметр сегодня составляет 0,5 м, так как ход наполовину заполнен льдом. Естественный ход необходимо расчищать до  $D = 1$  м, поскольку во время зимы его заносит снегом.

Следующей причиной изменения морфологии пещеры стало устройство в 1972 г. выходного тоннеля из грота Вышка. Через тоннель открылся еще один путь для зимней тяги, в результате чего уменьшился поток воздуха, проходящего через первые гроты. В первые годы после его устройства двери тоннеля были открыты зимой на продолжительное время, и в гротах Вышка, Великан выростали многочисленные сталактиты и сталагмиты. Крупные ледяные кристаллы на сводах превосходили украшения Бриллиантового и Полярного гротов. Ожидалось, что со временем, вследствие аккумуляции холода, они станут многолетними. Но поскольку двери в тоннель с 1972 по 1985 гг. были открыты и в летнее время, этого не произошло. Из-за постоянного замерзания и оттаивания льда на стенах гротов усилилось морозное выветривание.

С 1992 по 2000 гг. было прекращено зимнее проветривание пещеры через входной тоннель. Через Старый ход пещера не получала достаточного количества холода, что привело к повышению среднегодовой температуры воздуха во всех гротах, но особенно в зонах сезонного и многолетнего оледенения. Так, в 1969 г. среднегодовая температура воздуха в гроте Крестовом была  $-2,3$  °C, в 1980 г. (после строительства выходного тоннеля)  $+0,2$  °C, а в 2000 г. уже  $+1,5$  °C. Из-за общего повышения температуры воздуха в 2000 г. весь многолетний лед в гроте Крестовом летом 2001 г. растаял. Температурный режим по месяцам в гроте Крестовом представлен на рис. 16.9.

Уравнение регрессии, связывающее интенсивность таяния снежно-ледяных отложений в пещерах со средней суточной температурой воздуха ( $T$ ) в них выглядит следующим образом:

$$A = 0,24 + 0,81T. \quad (16.2)$$

Таблица 16.6

Продолжительность теплого периода ( $\tau$ , сут), средняя температура воздуха ( $t$ , °С) и расчетные значения суммарного таяния льда ( $A$ , г/см<sup>2</sup>) в гроте Крестовом

Показатель	1970	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
$\tau$	30	90	120	90	120	120	120	180	210	210	210
$t$	0,1	0,1	0,2	0,03	0	0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,5
$A$	9,6	28,9	49,2	23,8	28,8	38,5	28,8	62,2	89,5	101	140
Показатель	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	
$\tau$	240	306	306	214	244	246	241	183	214	214	
$t$	0,5	0,5	0,6	1	0,9	1,1	1	1	1,1	1,2	
$A$	163	198	218	226	197	236	259	192	242	259	
Показатель	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
$\tau$	306	275	275	275	275	275	275	275	214	153	
$t$	1,3	1,5	1,5	1,3	1,5	1,7	2	1,5	1,2	0,7	
$A$	396	400	400	356	400	445	512	400	259	123	

Чтобы оценить величину годового таяния снежно-ледяных образований в пещерах, нужно знать продолжительность теплого периода года, когда температура воздуха в пещерах положительная. Таким образом, зная температуру воздуха в пещерах, мы можем оценить величину годового таяния снежно-ледяных отложений [243]:

$$A = (0,24 + 0,81t)\tau, \quad (16.3)$$

где  $t$  — среднелетняя температура воздуха в пещерах,  $A$  — суммарное таяние снежно-ледяных образований в пещерах (мм/год в слое воды).

Оценим величину таяния льда в гроте Крестовом (табл. 16.6, рис. 16.10). Как видим, до 1972 г. (время оборудования второго входа в пещеру) величина годового стаивания льда в гроте невелика; после 1972 г. наблюдается некоторое повышение температуры воздуха в пещере и увеличение суммарного таяния. Начиная с 1980 г. температура воздуха в пещере растет, что ведет к усилению таяния льда. Оледенение, т. е. образование и присутствие льда в любой форме, перешло в Крестовом гроте из многолетнего в сезонное. Расположенная в южной части грота многолетняя наледь сначала перешла в разряд перелетовывающих, т. е. иногда не тающих за лето, а затем — в сезонное образование, обязательно тающее летом. В 2002—2003 гг. после возобновления искусственного режима проветривания в пещере произошло снижение суммарного таяния в гроте. К сожалению, в настоящее время льда в гроте почти не осталось.

Таким образом, без восстановления оптимального режима воздухообмена пещеры с поверхностью произойдет снижение ценности пещеры как уникального природного образования. Пещера как природная геосистема развивается по вполне определенным законам, когда количественные показатели неизбежно вызывают со временем качественные,



Рис. 16.10. Потенциальная абляция льда (А) в гроте Крестовый

необратимые изменения. В отношении микроклимата пещерная среда стоит в настоящее время на пороге необратимых изменений. Это определяет неотложность мероприятий по оптимизации ее воздухообмена с внешней средой.

**Посещаемость пещеры и тепловыделение осветительных приборов, при работах, взрывах.** Посещаемость пещеры сказывается на ее тепловом состоянии преимущественно в теплый период. Пока нет оснований полагать, что она существенно влияет на оледенение в пещере. Количество экскурсантов не столь велико, чтобы ограничивать ее посещение для сохранения ледяных образований, тем более что самые живописные однолетние льды возобновляются каждую зиму. Однако необходимо упорядочить вход, не допуская температурных перегрузок от чрезмерно больших групп в выходные и праздничные дни. Это касается в первую очередь грота Бриллиантовый, среднесуточная температура  $-1^{\circ}\text{C}$  в котором устанавливается обычно в начале июня. С этого времени периодические подъемы температуры выше  $0^{\circ}\text{C}$  сопровождаются таянием и опаданием ледяных кристаллов. Чтобы сделать нагрузку более равномерной, можно продлить время работы пещеры, увеличив количество экскурсоводов.

Вся осветительная сеть пещеры разбита на 17 отдельных участков, включая входной, выходной тоннели и малое кольцо. Управляются участки с выносных пультов с помощью шкафов управления. Рабочее напряжение осветительной сети 127 Вт, получаемое от пусковых агрегатов АП-3,5. На протяжении распределительной сети 380 Вт. Всего на январь 2004 г. на маршруте использовали для подсветки тропы 241 лампу накаливания мощностью 60 Вт, для подсветки гротов — 106 прожекторов, из них 61 мощностью 60 Вт, шесть — мощностью 100 Вт, 11 — мощностью 300 Вт и 28 — 500 Вт. Общее время работы осветительной сети за 2003 г. составило 1900 ч, или 79 суток непрерывной работы в течение года. Особенно сильное влияние оказывают прожектора на снежно-ледяные образования в первых гротах пещеры. Так как влияние этого фактора на микроклимат пещеры значительно, его необходимо учитывать в расчетах теплового баланса.

Взрывы в пещере проводились при прокладке тоннелей и увеличении проходов между гротами. В 1963 г. проходку тоннеля из грота Дружбы Народов в грот Хлебниковых осуществили взрывным способом. В 1971—1973 гг. в гроте Вышка также были проведены взрывные работы — пробит выходной тоннель и произведено обрушение нависших пластов взрывами над новой тропой. В 1981 г. взрывным способом была увеличена высота проходов между гротами Руины — Морское Дно, Скульптурный — Метеорный — Коралловый, Центральный — Эфирный, Мокрая Кочка — Дружбы Народов, Хлебниковых — Романтиков, Длинный — Великан, Крестовый — Руины, Смелых — Грозный. Общая протяженность ходов (включая тоннели), затронутых взрывами, на сегодня составляет 417 м,

— это почти третья часть длины экскурсионного маршрута. После 1981 г. взрывы в пещере не применялись.

Этот фактор повлиял в основном на морфологию пещеры и повлек за собой увеличение числа обрушений в период с 1963 по 1981 гг.

Влияние посещаемости и осветительных приборов на изменение теплового баланса в пещере можно рассчитать по методике, предложенной В. С. Лукиным [223] и скорректированной О. И. Кадебской, с учетом выделения тепла экскурсантами и осветительными приборами.

Общий вынос тепла из пещеры складывается из следующих составляющих:

$$Q = Q_a + Q_h + Q_e - Q_T - Q_p - Q_k, \quad (16.4)$$

где  $Q_a$  — количество тепла, идущее на нагревание атмосферного воздуха, поступающего в пещеру;  $Q_h$  — охлаждение, вызванное уменьшением плотности восходящих потоков воздуха;  $Q_e$  — количество теплоты, поглощающейся в процессе испарения воды и льда;  $Q_T$  — приток тепла в пещеру от работы электроосветительного оборудования;  $Q_p$  — приток тепла от прохождения экскурсантов в пещере;  $Q_k$  — компенсация теплопритока из глубины земли в части пещеры, ограниченной нулевой изотермой (5500 м<sup>2</sup>).

$Q_a$  находим по формуле

$$Q_a = V \cdot \gamma C (t_2 - t_1), \quad (16.5)$$

где  $V$  — средний объем воздуха, протекающего по пещере, м<sup>3</sup>/сут;  $\gamma$  — масса 1 м<sup>3</sup> воздуха, кг;  $C$  — теплоемкость воздуха, кДж;  $(t_2 - t_1)$  — средняя разность температур воздуха, входящего и выходящего из пещеры, °С. Отсюда  $Q_a = 400\,000 \times 1,3 \times 1,00416 \times 11,6 = 6\,057\,093$  кДж/сут.

Охлаждение, вызванное уменьшением плотности восходящих потоков воздуха ( $Q_h$ ), вычисляется по формуле (16.5) и составляет 261 081 кДж/сут.

$Q_e$  находим по формуле

$$Q_e = V[(w_2 - w_1)/1000]q + Sq, \quad (16.6)$$

где  $V$  — средний объем воздуха, протекающего по пещере, м<sup>3</sup>/сут;  $(w_2 - w_1)$  — средняя разность удельной влажности воздуха, поступающего и выходящего из пещеры;  $S$  — испарение воды, компенсирующее расход водяных паров на образование атмосферного льда, кг/сут;  $q$  — скрытая теплота испарения (конденсации), кДж/кг.

Отсюда

$$Q_e = 400\,000[(4,8 - 2,2)/1000]2510,4 + 20 \cdot 2510,4 = 2\,661\,024 \text{ кДж/сут.}$$

Приток тепла в пещеру от работы электроосветительного оборудования находим по формуле

$$Q_T = [(K \cdot 0,9U \cdot p)/1000]t, \quad (16.7)$$

где  $U$  — мощность источника освещения, Вт/ч;  $p$  — количество выделяемого тепла на единицу мощности источника, Дж (~ 3597,59 Дж/Вт);  $t$  — время работы источника, ч.

Отсюда  $Q_T = \Sigma Q_T$  — общий приток тепла от работы всех электроосветительных приборов, кДж.

Приток тепла от прохождения экскурсантов в пещере находим по формуле

$$Q_p = [W \cdot T \cdot K] / 1000, \quad (16.8)$$

где  $W$  — количество тепла, выделяемое 1 человеком в час, Дж/ч;  $T$  — время нахождения экскурсантов в пещере, ч;  $K$  — количество экскурсантов, чел.

Компенсация теплопритока из глубины земли в части пещеры, ограниченной нулевой изотермой (5500 м<sup>2</sup>), по оценке В. С. Лукина [223] составляет 8,37 кДж/(м<sup>2</sup>/ч).

Средняя продолжительность периода, в который происходит вынос тепла из пещеры, т. е. когда температура внешнего воздуха ниже 5 °С, составляет 203 сут.

Итак:

$$Q_a = 6\,057\,093,12 \times 203 = 1\,229\,589\,903 \text{ кДж};$$

$$Q_h = 261\,081,60 \times 203 = 52\,999\,565 \text{ кДж};$$

$$Q_c = 2661\,024,00 \times 203 = 540\,187\,872 \text{ кДж};$$

$$Q_p = 26\,157\,113 \text{ кДж};$$

$$Q_T = 115\,833\,482 \text{ кДж};$$

$$Q_k = 224\,282\,520 \text{ кДж};$$

$$Q = 1\,229\,589\,903 + 52\,999\,565 + 540\,187\,872 - 115\,833\,482 - \\ - 26\,157\,113 - 224\,282\,520 = 1\,456,5 \text{ млн кДж.}$$

Таким образом, общий вынос тепла из пещеры в холодный период с учетом теплопритока от экскурсантов и работы электроосветительного оборудования можно оценить в 1 456,5 млн кДж.

Приток тепла в пещеру начинается, когда средняя температура внешнего воздуха поднимается выше 5 °С. Средняя продолжительность этого периода равна 162 сут. Суммарный приток тепла определяется по формуле

$$Q = Q_a + Q_h + Q_c + Q_s + Q_T + Q_p + Q_k, \quad (16.9)$$

где  $Q_a$  — количество теплоты, которое вносится с атмосферным воздухом и определяется по формуле (16.5);  $Q_h$  — тепло, выделяющееся вследствие уплотнения нисходящих потоков воздуха и определяется по формуле (16.5);  $Q_c$  — скрытая теплота конденсации паров воздуха;  $Q_s$  — скрытая теплота сублимации; величина ( $Q_c + Q_s$ ) определяется по формуле (16.6), где  $Sq$  можно приравнять к нулю;  $Q_i$  — приток тепла от работы осветительного оборудования (формула 16.7);  $Q_T = \Sigma Q_i$  — общий приток тепла от работы всех электроосветительных приборов;  $Q_p$  — приток

тепла от прохождения экскурсантов в пещере (формула 16.8);  $Q_z$  — компенсация теплопритока из глубины земли в части пещеры, ограниченной нулевой изотермой (5500 м<sup>2</sup>), по оценке В. С. Лукина [223] составляет 8,37 кДж/(м<sup>2</sup>/ч).

Отсюда

$$Q = 1\,020\,778\,848 + 103\,983\,013 + 30\,954\,487 + 178\,984\,080 = \\ = 1\,334\,700\,428 \text{ кДж.}$$

Общий теплоприток в теплый период в Кунгурской Ледяной пещере составляет 1 334,7 млн кДж.

Итого отрицательный баланс тепла в Кунгурской Ледяной пещере сейчас составляет приблизительно 121,8 млн кДж/год.

По расчетам В. С. Лукина [223], без учета теплопритока от экскурсантов и электрического оборудования отрицательный баланс тепла в пещере на 1965 г. составлял 336 млн кДж/год. После оборудования пещеры электроосветительными приборами и с учетом теплопритока от экскурсантов (при средней посещаемости 70 000 чел/год) произошло уменьшение выноса тепла на 64 %. Поэтому восстановление и накопление снежно-ледяных отложений происходит гораздо медленнее, чем в 60-е годы.

Расчеты показывают, что предельная для пещеры нагрузка составляет 1500 экскурсантов в сутки, причем группа не должна превышать 25 человек, а интервал между группами — 15—20 мин.

Опыт эксплуатации других экскурсионных пещер мира свидетельствует о необходимости замены ламп накаливания на люминесцентные.

Существенное уменьшение количества льда в пещере сказалось не только на ее привлекательности, но и на безопасности. Промороженные до отрицательных температур своды пещерных галерей очень устойчивы, поскольку все трещины в них заполнены нетающим льдом, который как цемент скрепляет блоки породы. Наименьшая устойчивость сводов отмечается в зоне сезонных колебаний температур вблизи нулевой отметки. Поэтому желательно создать такие условия проветривания пещеры, чтобы граница зоны постоянно отрицательных температур воздуха оставалась год от года на приблизительно одном и том же месте. Практика зимнего охлаждения пещеры показала, что наиболее благоприятное место границы зоны отрицательных температур — южная или средняя части грота Крестовый, где свод высокий, а тропа проходит под устойчивой стеной зала.

В 1970-е гг. при прокладке пешеходных дорожек от входа до середины Крестового грота бетон клали на мерзлый грунт и лед. Повышение температуры в гротах привело к протаиванию грунтов. Поэтому в целях создания безопасных условий эксплуатации пещеры необходимо поддержание зоны постоянно отрицательных температур на одном и том же удалении от входа в пещеру.

Как экстренную меру для поддержания оледенения в пещере можно использовать ее дополнительное охлаждение путем заполнения отдельных участков пещеры блоками льда, выпиленными из р. Сылвы. Однако при внесении льда в пещеру должно обязательно сопровождаться ее зимним охлаждением.

Для стабилизации оледенения в пещере необходимо дальнейшее изучение оледенения пещеры, выявление его закономерностей и динамики. Необходимо продолжить мониторинг температуры воздуха и состояния льда в пещере, который заключается в проведении периодической микроклиматической съемки ближней части пещеры и дополнительных технических действий (регулярная расчистка Телячьего ходка и Старого входа, восстановление ледяной перегородки между Бриллиантовым и Полярным гротами и др.).

Продолжавшаяся долгие годы деградация оледенения наконец-то сменилась периодом восстановления. Оледенение Кунгурской пещеры отныне находится в руках человека. Необходимо очень бережно применять механизм его регуляции, что сделает пещеру не только более привлекательной, но и более безопасной.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ РАЙОНА  
КУНГУРСКОЙ ПЕЩЕРЫ

Для расшифровки истории образования и развития Кунгурской пещеры необходимо оценить основные вехи истории геологического строения региона. Наиболее удобным инструментом для этого является метод палеогеографического анализа [356]. Приведем его результаты в сжатой форме, начиная со времени образования толщ карстующихся пород: для дочетвертичного времени использованы "Атлас..." [33], а также материалы В. Д. Наливкина [310], Г. А. Мизенса [292] и В. П. Ожгибесова [325], а для неоген-четвертичного — обширная литература [41, 69, 100, 101, 181, 182, 215, 296, 364, 365, 428, 436, 457 и др.].

## 17.1. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ

Коренные карстующиеся отложения района Кунгурской пещеры представлены пермскими сульфатными и карбонатными породами. Поэтому рассмотрение геологического этапа начнем с палеозоя.

**Палеозойская эра.** Отложения палеозоя на значительной части Прикамья представлены *нижне- и верхнепермскими* морскими и континентальными толщами [33]. Традиционная точка зрения на условия их образования изложена В. Д. Наливкиным [310]: "в кунгурскую эпоху громадное распространение получают химические осадки горько-соленых лагун и озер — гипс, ангидрит, каменная соль и красноцветы, отлагавшиеся на окружающих лагуны равнинах. Фацис с морской фауной — мергели и доломитизированные известняки, мало распространены" (с. 97).

В 90-е гг. новую модель седиментогенеза региона предложил Г. А. Мизенс [292]. Он полагает, что кунгурские эвапориты откладывались в наиболее прогнутой части Предуральского прогиба в условиях глубокого открытого моря. К формации морских эвапоритов относятся разрезы четырех основных типов: сульфатно-карбонатно-глинистые, глинисто-сульфатно-галогенные, карбонатно-сульфатные с галогенами, галогенные. Одной из главных проблем является взаимоотношение эвапоритов и турбидитов. Их переслаивание в зоне сочленения заставляет предполагать, что сульфаты могли накапливаться и в глубоководных условиях. В мелководье, на западном шельфе прогиба, осаждались главным образом доломиты и ангидриты (гипсов мало), а дальше на восток, по мере углубления бассейна, количество сульфатов увеличивается. Разрастающийся дельтовый конус перекрывал глубоководный бассейн. Вдоль границы его образовалась система баров, что в условиях аридного климата стало решающим фактором повышения солености.

В конце XX в. появились сомнения в справедливости трактовки палеогеографических условий образования кунгурских гипсоангидритовых толщ Приуралья. Объяснение их формирования за счет выпаривания из лагун или химического осаждения из морского бассейна встречает ряд затруднений. В частности, мощности пород и их соотношения в разрезах для различных литологических разностей не соответствуют содержанию веществ в морской воде. Например, для образования сульфатных пород иренской свиты требуется выпарить столб воды мощностью в 250 км.

Экспериментальные исследования ([294] и др.) показывают, что прямая кристаллизация ангидрита и доломита из рапы современных и древних бассейнов невозможна. Синтез доломита происходит при температурах не ниже 100—150 °С. Поэтому В. Ю. Курочкин [205] попытался объяснить их формирование за счет эндогенных флюидов, поступающих по глубинным разломам, несущих материал для образования толщ карбонатных, силикатных, сульфатных, хлоридных пород и создающих условия, необходимые для кристаллизации в водной среде высокотемпературных минералов. По его мнению, об эндогенном (флювиогидротермальном) генезисе этих образований свидетельствует их приуроченность к активизированным разломам; наличие даек, линз карбонатных и внедрений сульфатных эндогенных пород; текстурно-структурные особенности карбонатных и сульфатных пород, фиксирующие флюидалный характер их формирования, а также зональные текстуры, указывающие на закономерный характер распределения минералов в зависимости от соотношения физико-химических параметров флюида и внешней среды.

Согласно геолого-геофизическим исследованиям [292], в позднем протерозое в Среднем Предуралье происходит заложение Сосновской палеорифтовой зоны, пространственно соответствующей Предуральскому прогибу. О ее рифтовой природе свидетельствуют большая протяженность, линейно вытянутая грабенообразная морфология, наличие глубинных разломов, разграничивающих блоки земной коры и контролирующей развитие структуры в плане, проявление основного магматизма и другие признаки, выделенные Е. Е. Милановским [293]. Заложение палеорифтовых зон в позднем протерозое и их активизация в конце карбона и в течение перми являются характерной особенностью эволюции рифтогенеза Восточно-Европейской платформы.

Рифтовая зона Уфимского вала имеет ширину 40—60 км, включает Уфимский вал и примыкающую с востока часть Юрюзано-Сылвинской депрессии и характеризуется в раннепермскую эпоху значительной тектонической активностью, что проявилось в максимальном прогибании примыкающей к валу части депрессии, активизации и заложении разломов, формировании эндогенных образований.

Осадкообразование происходило в условиях последовательной смены состава поступающих флюидов. Можно выделить следующие стадии флюидогидротермального процесса: карбонатную → сульфатную → хлоридную → фторидную → позднюю карбонатную. Изменение состава поступающих флюидов, по-видимому, связано с эволюционной сменой в их составе газов в последовательности  $\text{CO}_2\text{—H}_2\text{S—HCl—HF—CO}_2$ .

Согласно В. Д. Наливкину [310], северная часть зоны активно развивалась в конце артинского-кунгурском веках. Активизация рифтовой зоны

проявилась в мощности и характере разреза, минеральной и геохимической специфике карбонатных, силикатных, сульфатных и хлоридных образований. В составе пород, подвергшихся активизации, присутствуют<sup>14</sup> высокотемпературные формы кальцита, *доломита*, *кварца*, а также аутигенные минералы: сидерит, целестин, барит, ангидрит, флюорит, стронцианит, серицит, ортоклаз, альбит, хлорит, гастингсит, эгирин, диопсид, тальк, *палыгорскит*, асбест, *гидрослюды*, халькопирит, пирит, пирротин, сфалерит, галенит и др. Активизированные породы имеют повышенное содержание **Ba, Sr, Fe, Cu, Ag, Au, Pb, Zn, Co** и примесь вулканокластического материала (в Кунгурской пещере во вмещающих ангидритах и гипсах выявлены повышенные содержания **Sr, Fe, Cu, Ag, Co**, в неволинских известняках — *Sr, Cu, Co*); в прослое, по предположению Е. П. Дорофеева, имеющем вулканокластический генезис, содержатся доломит, кварц, отмечены повышенные содержания **Ba, Sr, Fe, Ag, Co**.

Приведенные выше данные свидетельствуют о необходимости специального, более углубленного рассмотрения вопроса о происхождении пород, вмещающих Кунгурскую пещеру. Они объясняют появление в ней флюорита (в верхней части разреза кунгура на Ледяной горе имелась ныне размытая флюоритоносная туюнская карбонатная пачка) и целестина (поступающие флюиды были обогащены стронцием).

**Мезозойская эра.** На территории Прикамья ранее была суша [33]. В это время здесь преобладали процессы разрушения горных пород. Продукты разрушения выносились речными потоками в море, покрывавшее центральную часть Русской плиты.

В *триасовое время* Уральские горы уже прекратили свой рост и активно разрушались. Это привело к смене позднепермского и раннетриасового аридного климата на мягкий внетропический климат юрского и мелового периодов. Ландшафт, унаследованный от позднего палеозоя, в мезозое становится все более выровненным.

В *юрское и меловое время* палеогеография Прикамья все еще соответствует суше, на которой преобладают процессы денудации. Это был пологий западный склон слабохолмистого Урала, на западе которого существовали мелкие моря. Юрские и меловые континентальные отложения здесь почти не сохранились. Западное Предуралье представляло собою область, где интенсивно протекали процессы эрозии. Интенсивность процесса регулировали колебательные движения. Наиболее крупные реки приспособились к осевым линиям тектонических понижений и прорезали положительные структуры лишь в тектонически и литологически слабых местах. Долины их были подчинены структурным особенностям района и носили консеквентный характер [181]. Однако в триасе—средней юре сформировалась «юрская генерация погребенных долин». Это глубокие (до 50 м) эрозионные врезы шириной до 2 км, выполненные песчано-глинистыми отложениями верхней юры и местами унаследованные современными долинами рек.

Почти до конца мела средняя полоса Русской платформы подвергалась периодическим трансгрессиям с юга. В позднем мелу ее центральная часть не испытывала сильных тектонических движений. Общий наклон поверх-

<sup>14</sup> Полужирным выделены минералы и элементы, присутствующие в породах зоны активизации и в отложениях Кунгурской пещеры.

ности был на юг, и реки, продвигающиеся за регрессирующим морем, ориентировались почти меридионально. Одной из крупнейших из них была палео-Волга.

**Кайнозойская эра.** В палеогеновое время территория Прикамья представляла сушу, на которой аккумуляция песчано-глинистых осадков происходила только в замкнутых карстовых формах рельефа. На месте Уральских гор располагалась слабохолмистая равнина. Палеогеновые трансгрессии из Средиземноморской области не доходили до территории района. Благодаря близости моря и отсутствию гор его климат напоминал климат позднего мезозоя.

На рубеже позднего олигоцена и раннего миоцена Приуралье вступило в геоморфологический (по А. П. Сигову [370] — неотектонический) этап развития.

## 17.2. ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ

В олигоцене-миоцене на территории Прикамья почти все время существовала суша, в понижениях которой местами накапливались маломощные глины, пески, галечники. В среднем миоцене сформировались палеодолины шириной 40—50 км и глубиной вреза 70 м. Таким образом, к началу плиоцена гидрографическая сеть в низовьях р. Камы была достаточно хорошо разработана. Сведения о древней гидрографической сети Пермской области, существовавшей в это время, на картах, помещенных в “Атласе...” [33] отсутствуют, поэтому для расшифровки истории развития эрозийной сети района приходится использовать данные о колебаниях главного и местного базисов эрозии.

Главным базисом эрозии для основной водной артерии региона (р. Волга) является Каспийское море, в русских летописях называвшееся Хвальнским. Оно вытянуто с севера на юг, длина около 1200 км, средняя ширина 300 км. Площадь водной поверхности моря без залива Кара-Богаз-Гол — 395 тыс. км<sup>2</sup>, а водосбор имеет площадь около 3,7 млн км<sup>2</sup>.

Котловину Каспийского моря принято делить по глубине на три части: северная — до 10 м, средняя — 200—790 м, южная — 325—980 м. Соленость вод Каспийского моря колеблется от 0,3‰ в северной части, где происходит их опреснение под влиянием речных вод, до 14‰ в юго-восточной. Соленость вод в заливах значительно выше и достигает 60 ‰, а в заливе Кара-Богаз-Гол даже 300 ‰.

Бассейн р. Волги находится в пределах нескольких природных зон. Северная его часть относится к лесной зоне, южная граница которой проходит через Казань и Уфу. Смешанные, лиственные и хвойные леса занимают обширную площадь юго-западной части этой зоны; на северо-востоке растут хвойные леса. Южнее расположена зона лесостепи. В ее ландшафте лесные массивы чередуются с обширными степными участками. В зоне лесостепи имеется луговая и болотная растительность, приуроченная преимущественно к поймам рек. Южную часть района занимает степь — безлесные пространства, покрытые травянистой растительностью, приспособленной к сухому климату. В Прикаспийской низменности находится полупустыня (чередование ковыльно-полынных степей с участками сыпучих песков).

Важная особенность климата бассейна — сильно выраженное влияние Атлантического океана, которое сказывается в повышении температуры воздуха зимних месяцев и увеличении влажности воздуха, что обеспечивает выпадение значительного количества атмосферных осадков. Отсутствие значительных возвышенностей делает район доступным для поступления воздушных масс с севера, запада и юга. Некоторой защитой от проникновения зимой холодных воздушных масс с северо-востока и востока являются Уральские горы. Местное влияние на климат оказывают Валдайская, Среднерусская и Приволжская возвышенности.

Разная степень увлажненности района определяет различную интенсивность стока поверхностных вод и густоту речной сети. Для рек, текущих на юг, характерна густо разветвленная сеть притоков в верхних и средних частях бассейнов и почти полное их отсутствие в низовьях. В истоках Волги густота речной сети составляет  $0,4 \text{ км/км}^2$ , а в низовьях она снижается до  $0,1 \text{ км/км}^2$ .

Большинство рек бассейна берет начало на высотах 170—260 м над ур. м., их падение составляет от 10 до 30 см на 1 км длины реки. В связи с незначительным падением реки характеризуются спокойным течением, а русла изобилуют меандрами, островами, протоками.

Основная водная артерия региона — р. Волга. Она имеет длину 3530 км, водосборная площадь бассейна — 1360 тыс.  $\text{км}^2$ . Годовой объем стока реки в Каспийское море — около 254  $\text{км}^3$ . По гидрографическим признакам Волгу принято делить на три участка: Верхнюю Волгу — от истока до г. Рыбинска, Среднюю Волгу — от г. Рыбинска до устья р. Камы и Нижнюю Волгу — от впадения Камы до устья.

Крупнейшим левым притоком Волги является р. Кама, которая берет начало на склонах Верхне-Камского плато, на высоте 33 м над ур. м. Длина реки 2030 км, площадь бассейна 522 тыс.  $\text{км}^2$ . На протяжении более 100 км она течет в северо-западном направлении, затем круто поворачивает на северо-восток, протекая по лесистой местности в низких и заболоченных берегах, а ниже устья р. Пильвы поворачивает на юг. Здесь она уже имеет вид широкой, многоводной реки с возвышенным правым и низким левым берегами.

В верхнем течении Кама — типичная равнинная река. Весеннее снеговое половодье начинается в конце апреля и отличается многоводностью, продолжаясь около 1,5—2 мес. Притоки, стекающие со склонов Уральского хребта, приносят в Каму большое количество воды. Это типичные горные реки с большими уклонами и скоростями течения. В среднем и нижнем течении сток Камы зарегулирован водохранилищами Пермской, Воткинской и Нижнекамской ГЭС, а также Куйбышевским водохранилищем на Волге, от которого подпор распространяется по Каме на 300 км. Средний годовой объем стока р. Камы составляет около 130  $\text{км}^3$ . Главные левые притоки Камы — Вишера, Чусовая и Белая, а правый — Вятка. Река Сылва, на которой находится г. Кунгур, является левым притоком р. Чусовой. Город удален от устья р. Волги примерно на 2900 км.

Колебаниям водного режима Каспийского моря посвящено множество работ. Мы воспользуемся сводками [186, 331], в которых обобщены наблюдения многих исследователей.

Размеры бессточных озер практически не зависят от тектонических движений, но на их размеры влияют колебания климата. Если атмосфер-

ные осадки и сток увеличивались, а испарение уменьшалось, то площадь озера и его уровень увеличивались (обычно это происходит во время похолоданий). Большое влияние оказывают изменения водосборных бассейнов.

Анализ условий существования бассейна, занимавшего Каспийскую котловину на протяжении плиоцена-четвертичного времени, не завершен. Определены только отдельные наиболее важные моменты его геологической истории. На режим Каспийского моря оказывает влияние множество факторов: планетарное развитие Земли и ее положение в космическом пространстве, геологические изменения земной поверхности и тектоника, солнечная активность, колебания климата и антропогенное воздействие. Для истории развития Каспийского моря характерна цикличность с периодами от десятков миллионов и сотен тысяч до нескольких тысяч, десятков и нескольких лет в настоящее время.

Заложение и развитие Каспийской впадины обусловлено неотектоническими особенностями этой обширной области. Тектонические движения альпийской геосинклинальной области в неогене привели к полной изоляции морского бассейна Понто-Каспийской области от вод Мирового океана. Судя по распространению и характеру неогеновых отложений [33], в *сарматское время* море занимало территорию современных Каспийского и Черного морей, Предкавказья и Паннонской впадины. После кратковременного восстановления связи с Мировым океаном в *мэотическое время* Понто-Каспийский бассейн вновь превратился в огромный внутренний водоем. Понтийское море раннего плиоцена было последним, площадь которого достаточна для того, чтобы с нее испарилась вся вода, доставляемая атмосферными осадками и стоком с поверхности водосборного бассейна.

Развитие Каспия в качестве изолированного водоема началось глубокой преадакчагыльской (балаханской) регрессией, когда уровень его опускался, возможно, на 300—500 м ниже современного (рис. 17.1), а площадь уменьшалась в 4 раза.

Позднеплиоценово-плейстоценовая история бассейна характеризовалась материковыми и горными оледенениями, трансгрессиями и регрессиями внутренних морей. Геологическая летопись развития Каспия содержит ценную информацию о событиях, происходивших как в пределах самого водоема, так и на сопредельных территориях. Корреляция морских отложений Каспия с аллювиальными отложениями рек бассейна Волги и континентальными образованиями Русской равнины позволяет представить в общих чертах физико-географические особенности Каспийского бассейна.

Наиболее значительная акчагыльская трансгрессия привела к подъему уровня вод Каспия до абсолютных отметок +110 [186]...+125 м [182] и проникновению их до Казани и Уфы. Причины трансгрессии окончательно не выяснены. Можно предположить, что это произошло из-за резкого увеличения площади водосборного бассейна, включающего бассейны рек, ныне текущих в Белое и Баренцево моря. При изучении истории Баренцева моря установлено, что в плиоцене на его месте была суша, а устья рек — предшественниц Северной Двины и Печоры, находились где-то в районе Шпицбергена [182]. Острова Новая Земля, Земля Франца-Иосифа и Шпицберген были покрыты ледниками. Перед их фронтом возникали приледниковые озера, имеющие сток на юг. Основной рекой, питавшей акчагыльский и апшеронский бассейны, была Ергень-река.

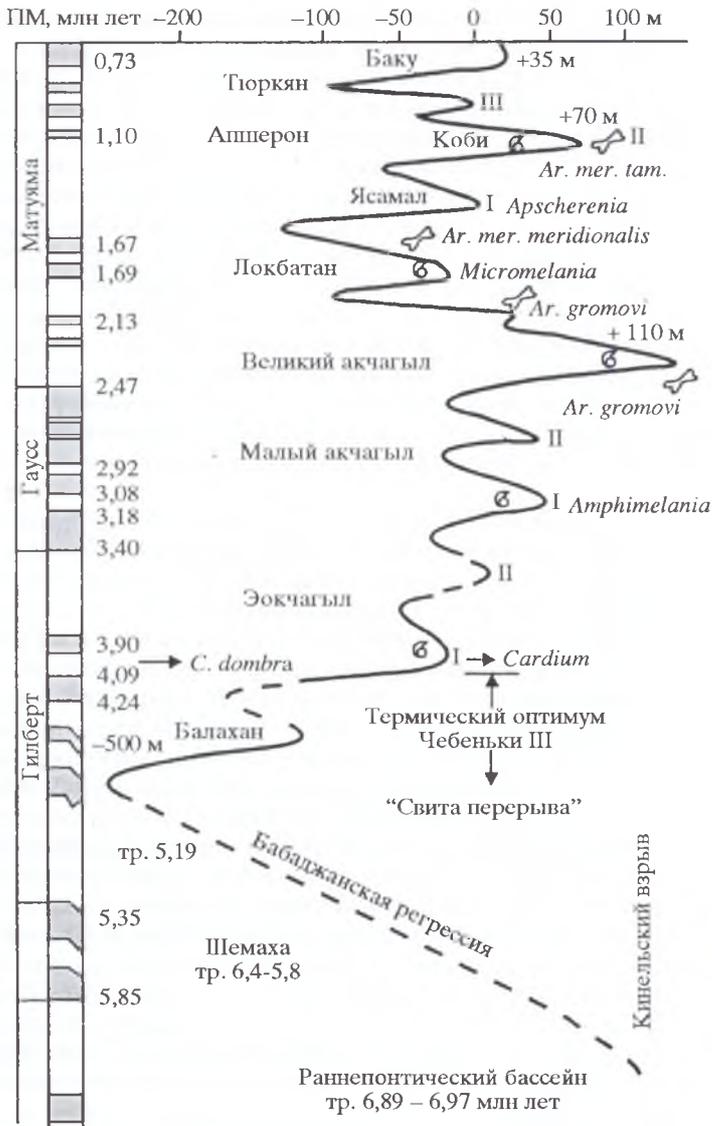


Рис. 17.1. Изменения уровня Каспийского моря [186]

В четвертичное время уровень Каспийского моря минимум трижды опускался до отметок  $-80...-120$  м и неоднократно поднимался до отметок  $+35...+70$  м (рис. 17.1). Такие колебания главного базиса эрозии не могли не вызвать переуглубления долин рек волжского бассейна.

Энергичному врезанию гидросети в *предакчагыльское время* способствовало общее поднятие Восточно-Европейской равнины, достигшее максимума в среднем плиоцене, и понижение уровня воды в Каспии. Особенно интенсивным оно было в бассейне Волги и Камы, где глубина вреза достигла 300 м и более [160, 163]. Крупнейшей рекой этого времени была Кинель-река, включающая в себя палео-Волгу, палео-Каму и палео-Белую. Севернее глубина ее вреза последовательно уменьшается вверх по течению от 327 до 150 м. Кинельский врез представляет собой каньон глубиной 250—300 м и шириной по верху 1,5—3,5 км и несколько сот метров в нижней части. Южнее ширина долины постепенно возрастает до 7 км (Высокое Заволжье), а в пределах Прикаспийской низменности достигает первых десятков километров. В составе кинельских осадков ведущая роль принадлежит глинам, на долю которых приходится до 80 % толщи пород. Лишь в основании кинельской свиты развит горизонт, представленный русловым аллювием.

Следующий эрозионный этап связан с началом плейстоцена и, по данным Г. И. Горецкого [191], состоит из двух основных эрозионных циклов — соликамского и венедского. В бассейне Волги и Камы им соответствуют погребенные корытообразные долины шириной от 15 до 1,5—5 км. Глубина вреза относительно донеогенового рельефа изменяется от 70 до 150 м.

По речным долинам верхи разреза *соликамской и венедской свит* уничтожены современным врезом рек, в связи с чем мощность сохранившихся аллювиальных песков составляет 10—40 м. Аналогичные раннеплейстоценовые эрозионные врезы, выполненные разнородными по фациальному составу отложениями *надимейской свиты*, описаны в бассейне Печоры. Для Верхней Камы и ее притоков один из спорных вопросов — связи с бассейном Северного Ледовитого океана. В 70-е гг. была разработана схема корреляции плиоценовых и плейстоценовых отложений северной и южной частей Предуралья [436]. Наиболее древняя, морская *просундуйская свита*, выделенная на севере Тимано-Уральской области, изучена недостаточно. По споро-пыльцевым данным ее возраст, вероятно, плиоценовый. В центральной части Печоро-Вычегодско-Камского междуречья в глубоком эрозионном врезе обнаружены доколвинский аллювий и морские образования неопределенного возраста. Это свидетельствует о широком распространении просундуйского бассейна и возможности сопоставления его отложений с кинельской свитой.

На севере Тимано-Уральской области морская *колвинская свита* содержит обильную фауну моллюсков. К югу морской режим бассейна постепенно сменяется солоноватоводным, и на месте Тимано-Уральского соединения Колвинский залив был значительно опреснен. Во время максимального распространения залив через долины впадавших в него рек соединялся с подтопленной кинельской палеоречной системой Каспия. Таким образом, в верховьях Камы в среднем плиоцене имело место соприкосновение лиманных вод Северного и Каспийского бассейнов по подтопленной колвинско-кинельской речной системе.

Четвертичная история этих бассейнов изучена еще недостаточно, однако имеющиеся материалы свидетельствуют о том, что гидрографическая сеть того времени была широко развита и характеризовалась активным врезанием ("сеттйский врез", "войский врез", "лихвинский врез") и между бассейнами рек Печоры, Вычегды и Камы также было соединение. Современный рельеф в основном унаследован и зависит от характера древней структуры и проявлений неотектоники. Для Прикамья характерно наличие двух типов тектонических движений: региональные и дифференциальные [30 и др.]. Они четко прослеживаются начиная с неогена по настоящее время.

**Региональные движения** привели к большим изменениям топографии. Н. И. Николаев [318] установил, что в Волго-Камском крае мощная тектоническая фаза проявилась на рубеже *миоцена* и *плиоцена*. В это время имевшиеся структуры брахиантиклинального облика были усложнены и разбиты сбросовыми дислокациями. На границе *балаханского* и *акчагыльского веков* в результате опускания земной коры акчагыльская ингрессия распространяется вдоль древних долин Волги, Камы и Белой [181]. Амплитуда опускания для долины р. Камы составляла не менее 250 м. В конце акчагыльского века начинаются региональные поднятия, и в апшеронское время происходит спад морских вод. В многочисленных озерах откладываются пресноводные отложения. В конце *апшеронского века* в связи с активным поднятием энергично протекают процессы эрозии. В *четвертичный период* общий подъем территории составил около 80 м и проходил в четыре стадии: в эоплейстоценовую эпоху колебания земной коры имели амплитуду 30—40 м (уступ высокой равнины), в мезоплейстоценовую — 15—25 м (уступ между IV и III террасами), в неоплейстоценовую — около 20 м (уступ между III и II и II и I террасами) и в голоценовую — 5—8 м (пойма). В период таяния ледников подъем района замедлялся, а в некоторых пунктах происходило даже частичное опускание. В *новейшее время* в бассейне р. Камы проявляются отрицательные движения относительно небольшой скорости (–4...–6 мм/год [318]).

**Дифференциальные движения** проявляются в пределах сравнительно небольших структур. Положительные структуры обычно характеризуются поднятием, отрицательные — опусканием, т. е. довольно хорошо выражена унаследованность движений от прошлых геологических периодов. Отрицательные движения создают расширения долины-впадины, заносимые аллювиальным материалом, а на положительных структурах долина сужается, образуя своеобразные горловины. Долина р. Камы на всем своем протяжении имеет четковидное строение. На формирование рельефа оказывает влияние и соляная тектоника (район городов Соликамска и Березников) [101].

Основной особенностью истории развития Предуралья в плиоцен-плейстоцене является то, что амплитуда колебаний земной коры, обусловившая глубину вреза гидрографических систем, со временем уменьшалась (ложе каждой более молодой системы занимает более высокое гипсометрическое положение), а ширина зоны подтопления, напротив, увеличивалась. Одновременно с этим наблюдалось и снижение солености вод. Солонатоводно-морские условия возникали только в самой древней палеолиманной кинельско-колвинской системе. Признаки слабой солонатоводности отмечены в лихвинском горизонте. Одинцовская и валдайская водные системы были исключительно пресноводными.

Тектонические движения и неоднократные изменения на протяжении плиоцена-голоцена положения *главного базиса эрозии* (уровень Каспийского моря, а в определенные моменты — уровень Полярного бассейна) не могли не повлиять на положение *местных базисов эрозии*. По этому поводу имеются две точки зрения. Согласно одной из них [163], в результате сформировалась единая (транзитная) переуглубленная речная сеть (рис. 17.2), согласно другой — переуглубление речных долин волжского бассейна имело местный характер (“карстовые карманы” — [100, 314] и др.).

Один из авторов этой главы (В. Н. Дублянский), выступая оппонентом по докторской диссертации О. Б. Наумовой [314], отметил дискуссионность данной проблемы. В подготовленной в 2002 г. под его руководством дипломной работе студентки Ж. Пикулевой собраны данные о 60 геологических профилях через долины рек Волго-Камского бассейна: 20 % профилей фиксируют переуглубление до 240—280 м (эрозионные врезы в коренных породах заполнены кинельскими глинами, рис. 17.3); 30 % профилей допускают наличие более глубокого переуглубления непосредственно в русле реки (скважины остановлены в отложениях вендской или соликамской свит); 50 % профилей не допускают переуглубления в современных руслах, но оно возможно в пределах распространения аллювиальных отложений плиоцен-четвертичного возраста.

Анализ литературных материалов выявил, что переуглубленные долины могут располагаться довольно далеко от современных русел рек (рис. 17.4).

Наличие переуглубленных долин определяет особенности и интенсивность развития карста региона. О закарстованности дна плиоценовой долины Нижней Камы, покрытого толщей карбонатной муки и брекчий, писала еще А. Ф. Якушова [435]. В дальнейшем этот вопрос подробно осветили М. С. Кавеев [165], А. И. Отрешко [330], Д. С. Соколов [374] и И. А. Печеркин [345]. Особенно полные сведения о древнем карсте получены при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений. Отложения, выполняющие древние эрозионные врезы, попадают в сферу инженерного воздействия и оказывают существенное влияние на оценку инженерно-геологических условий территории. Много данных о роли переуглубления содержится в монографии “Paleokarst” [457].

Переуглубленные долины оказывают следующее влияние на карст региона:

— переуглубление способствует формированию местного базиса эрозии на глубине до 300—500 м от поверхности выравнивания соответствующего возраста;

— при переуглублении в бортах долин вскрываются глубоко залегающие водоносные горизонты, а на бортах долин и под водораздельными пространствами формируется мощная зона аэрации;

— в бортах долин формируются зоны разуплотнения пород и трещины бортового отпора, которые в дальнейшем могут преобразоваться в коррозивно-гравитационные рвы и полости либо заполниться различными отложениями;

— вдоль рвов и полостей отседания формируются вдольбортовые потоки подземных вод, перехватывающие подземный сток;

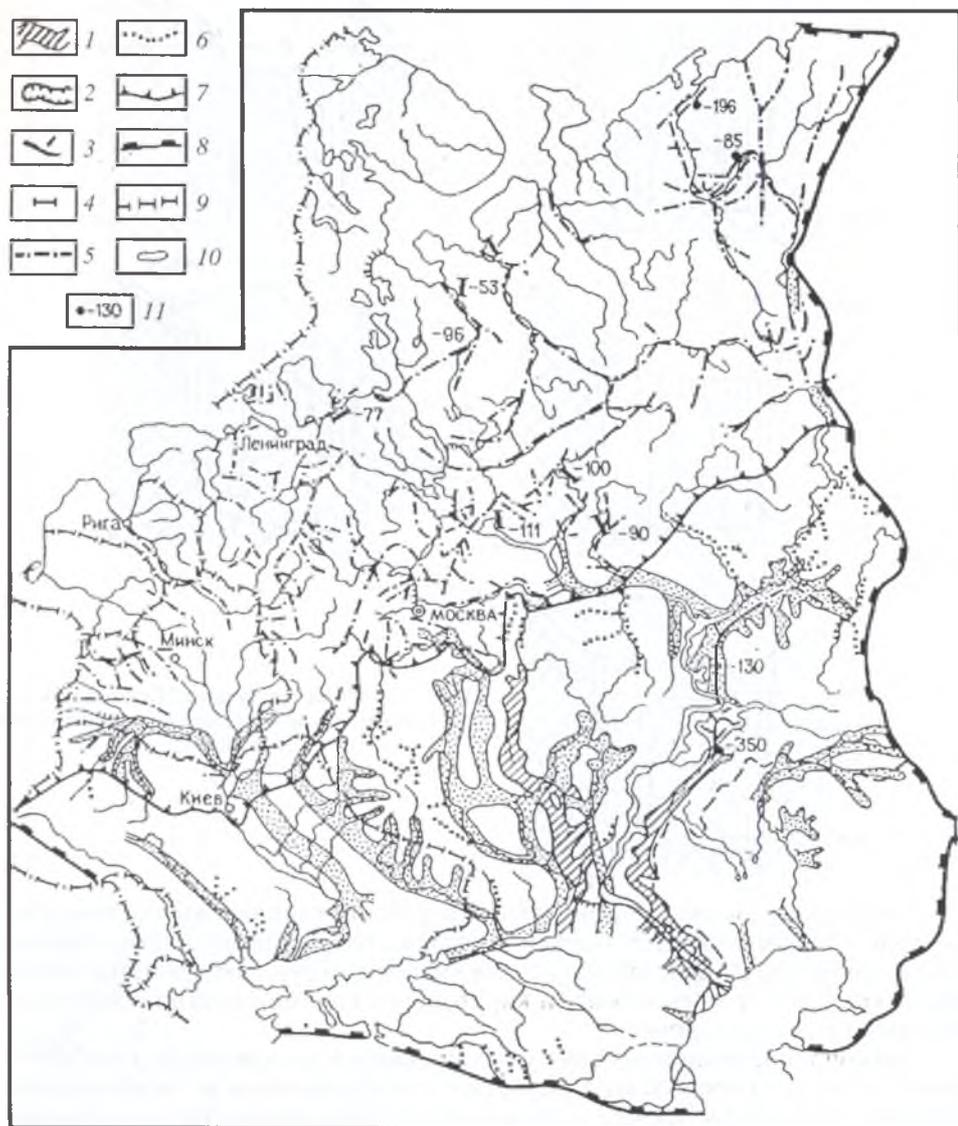


Рис. 17.2. Погребенные речные долины миоцен-среднеплейстоценового возраста Восточно-Европейского региона [163].

Древние погребенные долины: 1 — миоценовые, 2 — плистоценовые, 3 — киньельские, 4 — фрагменты древних погребенных долин с глубиной вреза 70—200 м, 5, 6 — плейстоценовые донепровские погребенные речные долины (5 — в ледниковой зоне, 6 — во внеледниковой провинции).

Границы: 7 — провинций, 8 — региона, 9 — республиканские, 10 — крупные озера и водохранилища, 11 — абсолютные отметки ложа погребенных долин, м

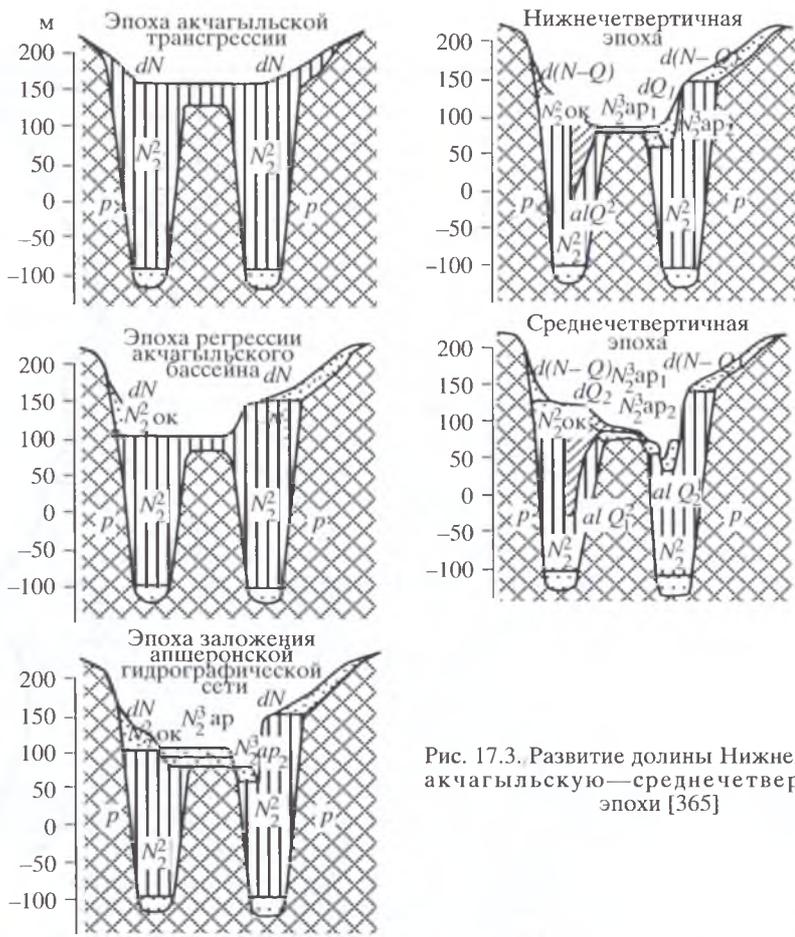


Рис. 17.3. Развитие долины Нижней Камы в акчагыльскую—среднечетвертичную эпохи [365]

— водопроницаемые аллювиальные и флювиогляциальные отложения, в которых аккумулируется большое количество слабоминерализованных инфильтрационных вод, могут объединяться в одну гидродинамическую зону с более минерализованными карстовыми водами подстилающих карбонатно-сульфатных пород;

— накопление толщи песчаных отложений на трещиноватых закарстованных породах способствует развитию суффозионных и суффозионно-карстовых процессов, влечет за собой обрушение кровли над карстовыми пустотами и содействует развитию процессов вымывания в них песчаного материала, а глинистых отложений — кольматации трещин;

— на ингрессионном этапе, после заполнения переуглубленных долин морскими, лагунными или аллювиальными отложениями, возникают условия для подтопления пород бывшей зоны аэрации и прохождения в ней процессов диагенеза;

— при последующих регрессиях отложения плиоцен-четверичных террас занимают водораздельные пространства, а более молодые V—I террасы формируются как вложенные или прислоненные;

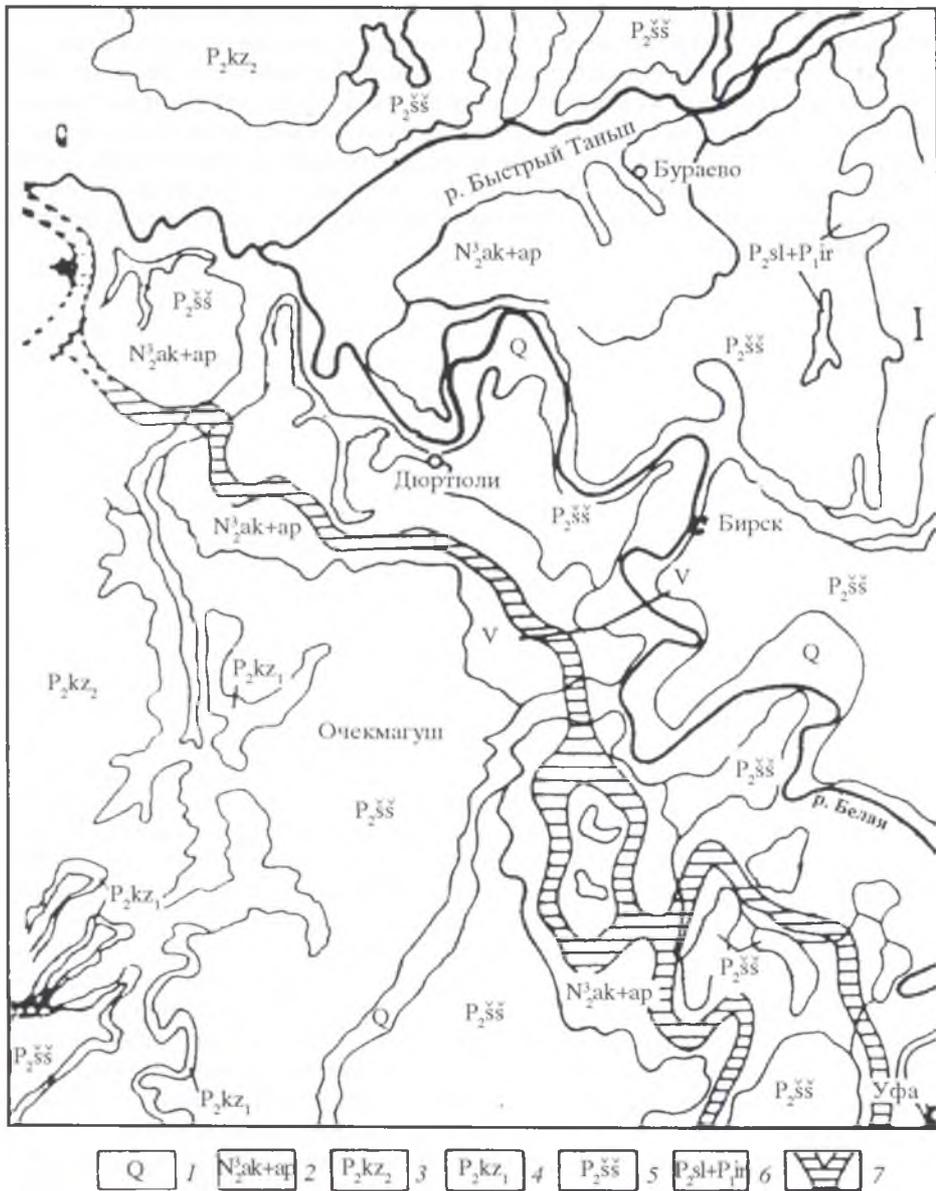


Рис. 17.4. Геологическая схема Северо-Западной Башкирии [355].  
 Отложения: 1 — аллювиальные четвертичные, 2 — акчагыльско-апшеронские, 3 — верхнеказанские, 4 — нижнеказанские, 5 — шешминские, 6 — иренские, 7 — переуглубленная долина р. палео-Белой

— процессы диагенеза, карста и суффозии особенно активно происходят на нешироких междолинных пространствах, ограниченных двумя переуглубленными долинами;

— при наличии переуглубления и активного закарстования легко устанавливаются гидродинамические связи между разными водоносными горизонтами; поэтому карст, связанный с переуглубленными долинами, активно развивается за счет коррозии смешивания (инфильтрационные, конденсационные, грунтовые аллювиальные, грунтовые подвodorаздельные, межпластовые воды имеют разную минерализацию и химический состав).

Указанные закономерности развития карста при наличии переуглубленных долин использованы нами при расшифровке истории образования Кунгурской пещеры.

## ФОРМИРОВАНИЕ КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ

Представления об истории формирования Кунгурской пещеры противоречивы. Первые ее исследователи И. Г. Гмелин [447], И. П. Фальк [400], И. И. Лепехин [212], И. Э. Эрдманн [444], Г. Ф. Меллер [289], М. Я. Киттары [184] полагали, что она образована за счет деятельности подземных вод. Академик Е. С. Федоров [402] указывал на большую роль в ее образовании вод р. Сылвы. В XX в. были выдвинуты четыре основные гипотезы происхождения Кунгурской пещеры [135].

Предположение о том, что *Кунгурская пещера образована в зоне палеоперетока р. Шаквы через Ледяную гору* высказал В. Я. Альтберг [8]. В неявной форме об этом говорил и Е. П. Дорофеев [113], обративший внимание на линейное равенство меандра р. Шаквы на ее северном склоне и закарстованной зоны в правом борту р. Сылвы — на южном. Возможность образования крупных гипсовых пещер в зоне перетока реки через шейку меандра доказана для пещеры Вертеба (7,8 км) в Приднестровской Подолии [147].

Г. А. Максимович [258 и др.] считал, что *четыре этажа Кунгурской пещеры соответствуют положениям уровня подземных вод Ледяной горы*, контролируемого уровнями речных террас, образованных при врезании р. Сылвы. Однако было выяснено, что в Кунгурской пещере нет выраженных этажей [113, 225], а в толще Ледяной горы выше пещеры нет пустот, соизмеримых с ней по размерам [378].

А. В. Турышев [398], В. С. Лукин [220, 226], Е. П. Дорофеев [113 и др.] считали, что *пещера образована за счет инфильтрационных вод, формирующихся на Ледяной горе, и периодического вторжения паводковых вод р. Сылвы*. Однако инфильтрационное питание не может породить лабиринтовую пещеру, а вторжение паводковых вод возможно только в уже сформированные пустоты.

В. С. Лукин [225] еще в 1965 г. упоминал о четвертой возможности — *питании пещеры снизу, за счет подтока слабоминерализованных вод филипповского водоносного горизонта*. В его работах часто встречаются указания на какой-то иной механизм образования пещеры, о котором свидетельствуют палеогеография и палеогидрогеология района. К сожалению, эти плодотворные идеи он не свел воедино и не сформулировал даже в виде гипотезы. Лишь в 1992 г. Г. Н. и В. Н. Дублянские [135] предположили, что *пещера образована за счет подтока снизу*. В 90-е гг. артезианскую теорию формирования гипсовых пещер-лабиринтов убедительно обосновал А. Б. Климчук [451 и др.]. Ее начали применять и в других регионах.

Прежде чем перейти к изложению истории образования пещеры, рассмотрим некоторые вопросы ее заложения.

1. В каких породах заложена пещера? Как ни странно, четкого ответа на этот вопрос в литературе нет. Обычно Кунгурскую пещеру рассматривают как эталон полостей, заложённых в гипсах [256, 418], в гипсах и ангидритах [21, 106, 225 и др.], в гипсах, ангидритах и доломитах [80] или в слоистой сульфатно-карбонатной<sup>15</sup> толще [177].

Фактические данные для ответа на этот вопрос приведены в табл. 18.1. Входная и выходная штольни и большинство гротов заложены в первом-втором слоях ледянопещерской пачки: 2-й слой (гипсо-ангидрит молочно-белый, светло-серый со светло-кремовыми прожилками) обнажается в стенах 64 % гротов, а 1-й слой (гипсо-ангидрит молочно-белый, светло-серый с кремово-желтыми пятнами) — в стенах 58 % гротов; 4-й слой (в подошве гипсо-ангидрит молочно-белый, светло-кремовый, розовый, в кровле — гипс молочно-белый с гипсово-доломитовыми разводами кремового и серого цвета) встречен в 50 % гротов; 3-й (гипсо-ангидрит светло-серый, пятнами — молочно-белый, полосчатый) и 5-й (гипс белый кремового оттенка) — в 36 % гротов; 6-й (верхний) слой ледянопещерской пачки (линзы и прослои гипса с прожилками селенита) и прослои серых плотных известняков и доломитов (7-й слой, неволинская пачка) встречаются в 14 % гротов, еще реже (в 8 % гротов) — гипсо-ангидриты белые, серые, голубовато-серые (8-й слой, шалашнинская пачка).

Судя по высыпкам, отложения неволинской и шалашнинской пачек обнажаются также в органичных трубах многих гротов. Лежащие выше елкинская и демидковская пачки в пещере не зафиксированы [177])<sup>16</sup>. Грот Метеорный заложён в брекчии, имеющей в основном карбонатно-сульфатный и сульфатный состав. В. С. Лукин [225] указывает на наличие в ней обломков известняков и доломитов неволинской пачки. Отсутствие во многих гротах 1—3-го слоев ледянопещерской пачки (см. табл. 18.1) объясняется тем, что они перекрыты глыбово-обвальными отложениями.

Сложнее судить о тех породах, которые слагают низы ледянопещерской пачки и не обнажаются ни в пещере, ни на поверхности. Б. Ф. Перевозчиков считал, что между видимой в пещере частью разреза (слои 6—1) и кровлей филипповского горизонта залегают гипс и доломитовая прослойка мощностью до 1 м. Е. П. Дорофеев полагал, что этот слой слагает основание разреза в гротах Перепутье, Грязный, Географов, Хрустальный. Он же отмечал наличие брекчии в гроте Географов, хотя не ясно, какая это брекчия. Пять скважин, пробуренные в 1975 г. в гротах Бриллиантовый, Крестовый, Руины, Коралловый и Дружбы Народов, вскрыли филипповский горизонт (дресва карбонатных пород, известняки или доломиты) в среднем на глубине 4,4 м (абс. отм. +113,0 м). Выше их залегают супесь светло-серая карбонатная, глина плотная, глина вязкая, мокрая, со льдом и обломки гипса (обрушились со сводов), глина плотная мерзлая.

Положение филипповских отложений можно выяснить также по многим скважинам, пробуренным в районе пещеры. Средние отметки их кровли на Ледяной горе у Кунгурской пещеры составляют +115,0 м; под аллювиальными отложениями на правом берегу Сылвы у входа в пещеру +107,0 м, в рус-

<sup>15</sup> Так как доломиты и известняки занимают подчиненное положение в строении иренской свиты, правильнее говорить о карбонатно-сульфатной толще.

<sup>16</sup> Е. П. Дорофеев указывает, что в верхней части конуса высыпания в гроте Вышка встречены обломки кавернозного известняка елкинской пачки.

Таблица 18.1

Условия заложения гротов Кунгурской пещеры  
(по данным стационара и В. Н. Катаеву [177])

Грот	Пачки и слои							
	ледянопещерская						неволинская и шалашинская	
	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Большое кольцо</i>								
Входная штольня	+	+						
Бриллиантовый	+	+						
Первый	+	+						
Полярный	+	+	+	+				
Данте	+	+						
Крестовый	+	+						
Руины	+	+						
Морское Дно				+	+			
Скульптурный				+	+	?		
<i>Брекчия</i>								
Метеорный								
Коралловый			+	+	+			
Центральный		+	+	+				
Эфирный					+	+	?	
Мокрая Кочка				+	+			
Дружбы Народов	+	+						
Заозерный	+	+						
Хлебниковых	+	+						
Романтиков	+	+						
Длинный	+	+	+	+				
Великан		+	+	+	+			
Вышка	+	+	+	+	+	+	+	+
Выходная штольня	+	+						
<i>Малое кольцо</i>								
Колизей		+	+	+				
Смелых				+	+			
Геологов	+	+	+	+	+			
Атлантида	+	+						
Грозный		+	+	+				
Западный	+	+						
<i>Заповедная часть</i>								
Космический				+	+	?		
Ночь Осенняя			+	+	+			
Вышка II		+	+	+	+	+	+	+
Близнецы		+	+	+				
Перепутье	+							
Грязный	+							
Географов	+	Бр.?	+	+	+	+	+	+
Хрустальный	+							
Всего, %	58	64	36	50	36	14	14	8

ле р. Сылвы +85,0 м, на ее левом берегу +110,0 м, в русле р. Шаквы +95,0 м (см. рис. 4.8). Это свидетельствует о наличии значительного переуглубления р. Сылвы, о чем ранее упоминал В. С. Лукин [225].

Приведенные фактические данные интерпретировались по-разному. В. С. Лукин [220] на схематическом разрезе Ледяной горы и Кунгурской пещеры (рис. 18.1, а) показывает повсеместно под гrotами крупнообломочные карстовые отложения, ниже которых имеются гипсы и ангидриты. Такой же разрез приводят А. С. Алешин [5] и Б. К. Матвеев [284] при обосновании использования разных геофизических методов изучения карста, а также А. Б. Климчук и В. Н. Андрейчук [451]. Однако это противоречит фактам, поскольку в разрезах скважин в пещере, кроме глыб гипса, упавших со свода, крупнообломочных отложений нет, а преобладают глины, непосредственно лежащие на филипповские известняки и доломиты. Причем это *серые* автохтонные глины, обычно образованные из местных пород, а не привнесенные с поверхности. Очевидно, это было ясно В. С. Лукину и Е. П. Дорофееву, так как при разборке фондов стационара найден неподписанный чертеж, на котором глыбовый навал на дне гrotов ложится не на гипсы, а непосредственно на филипповские известняки и доломиты (см. рис. 18.1, б). В. Н. Андрейчук [21] вообще не показывает на разрезе филипповские отложения и вскрывшие их скважины (рис. 18.1, в). На всех разрезах переуглубление долины р. Сылвы не отмечено.

Иную трактовку этих фактов дают В. Н. Дублянский с соавт. [141] (рис. 18.1, г). Гrotы Кунгурской пещеры проработаны до кровли филипповских известняков и доломитов, выше которых залегают карбонатная супесь с обломками известняка (это свидетельствует о том, что основания гrotов немного врезаны в известняки) и глина без включений, а в верхней части — с обломками гипсов. К сожалению, специальные анализы глин не проводились, поэтому установить их происхождение невозможно. Между гrotами располагаются целики гипсов. Реки Сылва и Шаква полностью прорезают толщу гипсов, на I надпойменной террасе врезаны в известняки, а местами переуглублены на 20—25 м. Таким образом, при паводковом подъеме уровней в р. Сылве возможно непосредственное питание ею Кунгурской пещеры (в районе гrotа Вышка) или фильтрация через толщу аллювия (в пределах контакта гипсов Ледяной горы с террасовыми отложениями).

Резюмируя изложенное выше, дадим ответ на первый вопрос: *Кунгурская пещера заложена в толще переслаивания карстующихся пород [135], включающей ангидриты, гипсы, гипсо-ангидриты, доломиты, известняки, и в блоках брекчии такого же состава. Наличие прослоев карбонатных пород среди сульфатных, как установлено экспериментально, стимулирует развитие карста.*

2. Возраст пород, в которых заложена пещера. Большинство авторов указывает, что Кунгурская пещера заложена в породах пермского или ниже-пермского возраста [256]. Реже возраст вмещающих пород детализируется до ярусов (кунгурский [418]), свит (иренская [202]) или даже до их пачек (ледянопещерская, неволинская, шалашнинская [80, 177]).

Все изложенное выше позволяет считать, что Кунгурская пещера заложена в породах кунгурского яруса ( $P_{1K}$ ) и карстовой брекчии ( $N_2—Q_1$ ). Кунгурский ярус представлен филипповским ( $P_{1K}^{ph}$ ) и иренским ( $P_{1K}^{ir}$ ).

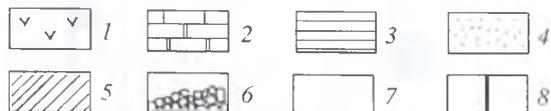
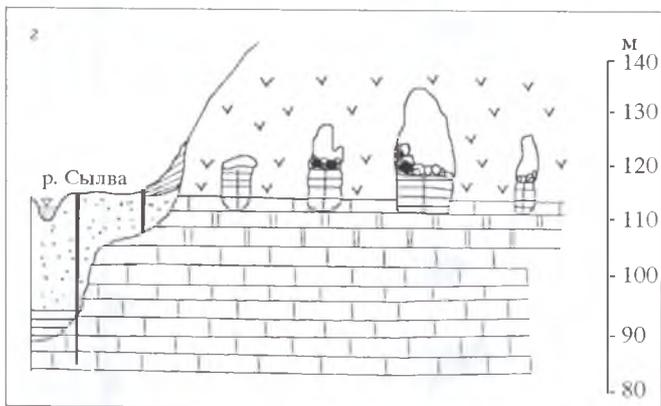
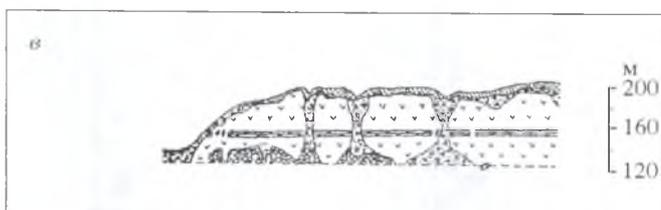
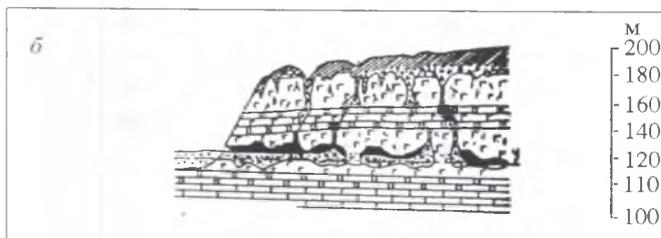
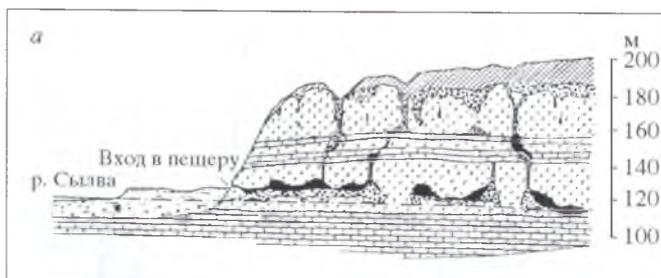


Рис. 18.1. Представления о заложении Кунгурской пещеры.  
*а* — В. С. Лукин [220]. *б* — Б. К. Матвеев [284]. *в* — В. Н. Андрейчук [21].  
*г* — В. Н. и Г. Н. Дублянские [135].  
 1 — гипсы и ангидриты, 2 — известняки и доломиты, 3 — глины, 4 — пески,  
 5 — суглинки, 6 — глыбово-обвальные отложения, 7 — карстовые пустоты,  
 8 — скважины

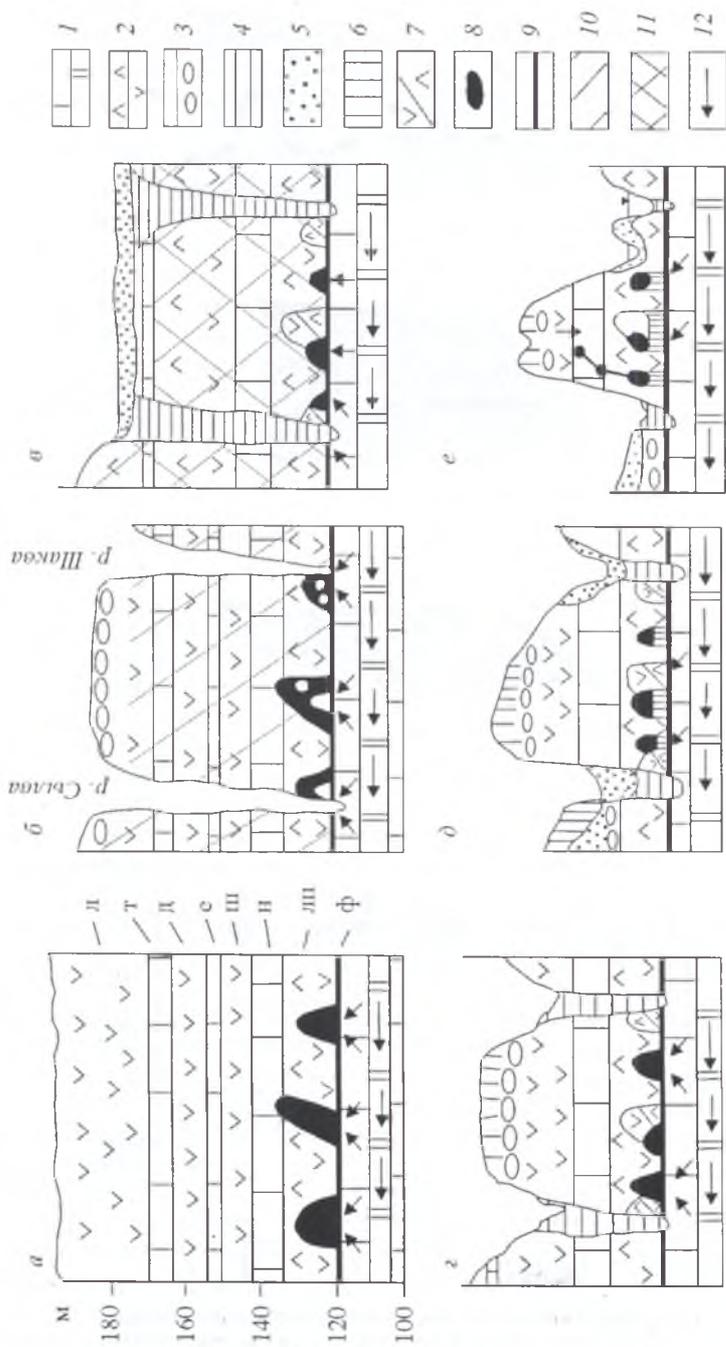


Рис. 18.2. Схема образования и развития Кунгурских пещер:

а — известняки и доломиты, б — глины и аргиллиты, в — карсто-облачные отложения, г — глины и пески, д — пески, е — суглинки, ж — карстовая брекчия, з — гроты пещеры, и — региональный водонос, к — зона эрозии во время кунгурского яруса, л — зона подтопления во время алсатийской трансгрессии, м — направление движения подземных вод.

Горизонты и почвы: ф — филипповский, ал — ледникоцесарская, и — неволдинская, ш — шалашинская, е — слонинская, т — тройская, л — лукежская

## Этапы формирования Кунгурской пещеры

Геологическое время	Проведения тектоники (по В. Н. Катлаеву [177])	Геоморфология территории (по В. С. Лукину, Ю. А. Ежову [233])	Развитие пологого горизонта (по Г. К. Михайлову [298])	Формирование пещеры (авторские данные)
$Q_4$	Территория располагается в области отрицательных движений относительно небольшой интенсивности [318]	В долинах рек Сылвы и Шаковы формируется пойма	Между филипповским и аллювиальным в. г. существует двусторонняя связь, Ирениский в. г. безнапорный	Пещера развивается за счет поступления инфильтрационных вод, конденсации, подтока вод иренского в. г. и периодического вторжения вод р. Сылвы
$Q_1-Q_3$	Иверсионная фаза. Стрессовые воздействия со стороны региональных разломов и дифференцированное развитие тектонических форм обусловили динамичное чередование стадий внутривлоковых "нагрузок" и "разгрузок" напряжений. Стадийная смена тектонических режимов с последовательным увеличением продолжительности стадий "нагрузки" обеспечила накопление напряжений вдоль существовавших литологических, дисъюнктивных и иных структурных границ. Сформирована новая система тектонических трещин (система 2). Интенсивность тектонических движений этапа снизилась, что отразилось в уменьшении амплитуды колебательных движений	В долинах рек Сылвы и Шаковы формируются IV, III, II и I надпойменные террасы: IV терраса имеет высоту над уровнем Сылвы 55—60 м; III (цокольная) — 30—40 м; II (аккумулятивная) — 15—25 м; I (аккумулятивная) — 4—12 м. При формировании террас кинельские (N <sub>1</sub> кп) отложения переуглубленной долины в ее верхней части полностью уничтожены и сохранились только в нижней части, где вскрыты скважинами	Ирениский в. г. безнапорный. После формирования отложений I и II террас между филипповским и аллювиальным в. г. установилась двусторонняя связь [371]. До формирования I и II террас филипповский в. г. находился ниже поверхности эрозионного вреза и связан с поверхностными водоотоками имелась только через гидрогеологические окна, на участках, где кинельские отложения имели повышенную водопроницаемость	1. Развитие пещеры произошло в вадозных условиях. Свидетелями этого являются своды <i>grotto</i> , сформированные гравитационными процессами, <i>органические трубки</i> , имеющие коррозионно-эрозионный генезис 2. Развитие пещеры произошло во фреатических условиях, по артезианской модели. Свидетелями этого являются <i>общая лабиринтовость, силовые каналы, туниковые замыкания ходов, окрулые сечения напорных каналов, фансетки, скальные мосты, "подвески", сквозные отверстия в стенах и сводах, сотовые формы (макрубчатое строение)</i> . В пещеру вселяются крабгониксы

Окончание табл. 18.2

Геологическое время	Проявления тектоники (по В. Н. Катаеву (177))	Геоморфология территории (по В. С. Лукину, Ю. А. Ежову (233))	Развитие водосного горизонта (в. г.) (по Г. К. Михайлову (298))	Формирование пещеры (ангорские данные)
$N_2^3 - Q_1$	Постинверсионная (предкачугальская) и акчагыльская фазы растяжения. Режим локального сжатия в центральных частях тектонического блока и разгрузки напряжений по его периферии (система 2)	На внутренних частях водоразделов формируются отложения плиоцен-четвертичной террасы, расположенной на высотах 70—120 м над современным уровнем р. Сырлы	Филипповский в. г. снова полагает в условия напора, в вышележащей толще ангидритов и гипсов формируется иренский в. г., частично связанный с филипповским через аллювиальные отложения, заполнившие переуглубленные долины	Пра-Кунгурская пещера прекращает существование; глыбово-обвальные отложения перекристаллизуются, "спайваются" в брекчию и входят в состав ледянопещерской толщ, испытавшей сильную гидратацию. Прислоновая часть пещеры уничтожена эрозией
$N_2^{2,3}$		Акчагыльская трансгрессия распространяется по долинам рек Волго-Камского бассейна. Переуглубленные долины Сырлы и Шаквы заполняются пресноводными гравийно-песчано-глинистыми отложениями	Филипповский в. г. вскрывает Сырлой и Шаквой, которые выкроили блок Ледяной горы. За счет двустороннего дренажа водораздельного пространства происходит потеря наносов в в. г.	Пра-Кунгурская пещера частично осушается, начинается накопление глыбово-обвальных отложений
$N_2^{1-2}$	Территория представляет возвышенные равнины и плато (200—500 м). В среднем плиоцене формируется Кунгурская впадина, в районе Кунгура проявившаяся как переуглубление долин на 30—40 м	Территория представляет возвышенные равнины и плато (200—500 м). В среднем плиоцене формируется Кунгурская впадина, в районе Кунгура проявившаяся как переуглубление долин на 30—40 м	Филипповский в. г. находится на напорной стадии. Региональным водоупором для него являются гипсы и ангидриты иренского яруса, в верхней трещиноватой части которого имеется безнапорный в. г.	Пра-Кунгурская пещера частично осушается, начинается накопление глыбово-обвальных отложений
$N_1 - N_2$	Кульминация альпийского цикла тектогенеза. Формируются трещины, круто падающие на СВ и СЗ	Изменная аккумулятивная равнина, постепенно трансформирующаяся в возвышенную равнину, по восточному краю которой протянулась Уральская возвышенность	Филипповский в. г. находится на напорной стадии. Региональным водоупором для него являются гипсы и ангидриты иренского яруса, в верхней трещиноватой части которого имеется безнапорный в. г.	В ангидритах ледянопещерской пачки по артезианской модели закладываются галереи пра-Кунгурской пещеры. Они имеют высоту гrotов до 20 м, вскрывая сводами доломиты неволинской пачки
$P_{85} - N_1$	Инверсионная фаза, восстановившая позднепалеозойско-мезозойскую трещиноватость (система 1)	Изменная аккумулятивная равнина, входящая в состав Северо-Русской низменности		

горизонтами; в составе последнего выделяются *ледянопещерская* ( ${}_{ld}P_{IK}^{ir}$ ), *неволинская* ( ${}_{nv}P_{IK}^{ir}$ ) и *шалашиинская* ( ${}_{sh}P_{IK}^{ir}$ ) пачки.

3. Время заложения Кунгурской пещеры. Исходя из заложения пещеры примерно на одном уровне с I надпойменной террасой р. Сылвы большинство исследователей приписывает пещере очень молодой возраст ( $Q_4$  [225]). Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что современная пещера начала формироваться после  $N_2—Q_1$  времени (после образования и литификации карстовой брекчии); *ее развитие, очевидно, происходило на протяжении всего четвертичного периода*. Об этом, в частности, свидетельствуют биоспелеологические данные [372] — наличие в ней эндемичных крагониксов [336].

4. Образование Кунгурской пещеры. Выше мы указывали, что существует четыре гипотезы ее образования. Попробуем объяснить происхождение пещеры исходя из суммы имеющихся фактов и спелеогенетических теорий [446, 451], а также представлений о развитии водоносных горизонтов в условиях тектонических поднятий [298]. Для удобства изложения представим все материалы в табличной (табл. 18.2) и графической (рис. 18.2) формах.

Таким образом, карстовые полости Ледяной горы заложились еще в неогене и продолжали свое развитие на протяжении всего четверичного периода.

ТУРИСТСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕЩЕРЫ

Экскурсии в Кунгурскую пещеру начали проводиться с середины XIX в. Чтобы осмотреть ее, обращались к жителям села Банное (ныне Филипповское). В 1840—1880 гг. проводником в пещере был крестьянин Романовский. В 1879 г. именно он сопровождал академика И. С. Полякова [351]. В 1901 г. пещера была арендована его племянником (стоимость аренды 10 руб. в год). Сначала планировалось использовать ее как ледник для хранения рыбы. Однако рыба начала портиться и пришлось все надежды возложить на туристов, которые платили за вход по 50 коп. Естественный вход в пещеру был оборудован дверью.



В 1910—1913 гг. пещера находилась на земле сельского общества, которое сдавало ее в аренду за 40 руб. в год. Деньги за вход получала “хозяйка”, а экскурсии вел проводник [315].

В 1914 г. участок с пещерой арендовал за 300 рублей сроком на 12 лет кунгурский мещанин А. Т. Хлебников (рис. 19.1). Александр Тимофеевич Хлебников — человек необычной судьбы. В 1896 г. по примеру своего знаменитого предшественника К. Т. Хлебникова, столетие назад ставшего одним из руководителей Российско-Американской торговой компании, он отправился на Аляску. Не получив разрешения на въезд, он попал сначала в Китай, затем в Японию, а уже оттуда в Америку, где прожил около 5 лет. Здесь он узнал о знаменитой Мамонтовой пещере, имевшей тогда протяженность 70,8 км и частично освоенной для туризма. Вероятно, именно тогда у него зародилась мечта сделать Кунгурскую пещеру столь же известной и посещаемой. А. Т. Хлебников возвратился на родину и поселился у входа в пещеру, посвятив ее охране, благоустройству и проведению экскурсий 37 лет.

Рис. 19.1. А. Т. Хлебников — старейший экскурсовод пещеры (1877—1951 гг.)

Кунгурская пещера была открыта для посещения в любое время суток. На железнодорожном вокзале приезжающих встречал проводник в специальной форме. Посетителей снабжали одеждой и обувью, для освещения в пещере использовались свечи, факела и бенгальские огни. Осмотр пещеры до Большого подземного озера в зависимости от размеров группы продолжался 3—5 ч. Желающие переправлялись через озеро на плоту и осматривали несколько гротов Заозерной части пещеры. Оплата производилась по соглашению, но была весьма умеренной.

По договору А. Т. Хлебников имел право благоустроить пещеру: расширять узкие проходы, содержать прислугу и караул. Под его руководством был расчищен вход, установлены столбовые и костровые деревянные крепи в Первом гроте, устроены деревянные лестницы в Бриллиантовом гроте, проложены тропы, расчищены некоторые узкие проходы, изданы первые рекламные плакаты и альбомы. При этом он сам водил экскурсантов по пещере, многим гротам дал звучные названия: “Дантов ад”, “Атлантида”, “Колизей”, “Руины Помпеи”, “Титанический”.

В 1919 г. пещера перешла в ведение Отдела народного образования Кунгурского горсовета. А. Т. Хлебников остался заведующим пещеры и проводником-инструктором.

В 1929 г. после обвала в Первом гроте были сооружены новые деревянные крепи. В этом же году была предпринята неудачная попытка вручную пройти новый вход в грот Бриллиантовый из ниши к западу от Старого входа.

С 1930 г. экскурсии в пещеру организовывала база ТЭУ ВЦСПС, имеющая общежитие на 60 мест. В с. Беркутово имелась база ОПТЭ на 15 мест. Плата за вход в пещеру составляла 1 руб. при небольшой группе, 25 коп. — при большой, школьники платили 10 коп., красноармейцы обслуживались бесплатно. Посетителям выдавали специальный костюм. Будучи уже почти слепым, А. Т. Хлебников продолжал водить экскурсии, оставшись в памяти людей как Хранитель Кунгурской пещеры. В эти годы ему помогал его племянник Виктор Михайлович Хлебников, который также был экскурсоводом. Поэтому первый большой грот за Большим подземным озером назван в честь династии Хлебниковых.

В 1930 г. был составлен эскизный проект нового входа в пещеру. Средств на его реализацию не было, и А. Т. Хлебников обратился к М. И. Калинину с просьбой передать на эти цели 13 тыс. руб., вырученных от продажи колоколов Благовещенского собора. К счастью, эта просьба осталась без ответа.

В 1931 г. после обследования пещеры было выбрано место для нового входа; отмечена необходимость расчистки тропы и электрификации пещеры. Наркомпрос выделил на благоустройство пещеры 3 тыс. руб.

В 1934 г. экспедиция Ленгидростройпроекта выполнила съемку пещеры. Она установила, что отметка Сылвы у входа в пещеру 112,00 м; западнее входа в пещеру проходит меридиан 57°; расстояние от входа в пещеру до экватора 6368 км; длина основного хода до озера 963 м.

В 1936—1937 гг. проводилась подготовка к экскурсии 17-го Международного геологического конгресса. В связи с этим появилось много интересных документов: “недопустимо, чтобы объект, включенный в Пермский маршрут экскурсий, находился в столь запущенном состоянии” (из

постановления Свердловского облисполкома); "...ввиду малой мощности (220 кВт) и недостатка энергии в городе обслужить Ледяную пещеру невозможно" (ответ Кунгурской городской электростанции); "необходимо приобретение на 300 руб. соломенных половиков для подстилки в узких местах пещеры, где придется ползти" (из письма в Оргкомитет конгресса). Несмотря на все трудности, 01.V.1937 г. бетонирование входного тоннеля было закончено, а 14.V в пещере побывала экскурсия делегатов конгресса. Они были поражены увиденным, и у Большого подземного озера приняли решение просить переименовать грот Титанический в грот Дружбы Народов.

В 1940 г. у входа в пещеру построены "Дом туристов" — двухэтажное деревянное здание на 60 спальных мест, одноэтажное здание столовой и кухни. Штат составлял 8 человек и 3 сезонных экскурсовода.

В 1941—1945 гг. пещера находилась в ведении Центрального управления курортами, санаториями и домами отдыха ВЦСПС (дом отдыха "Песчанка"). В "Доме туриста" находился санаторий для эвакуированных детей. Сведений о посещении пещеры в этот период нет.

В 1946 г. ВЦСПС принял решение о передаче пещеры Кунгурскому горисполкому. Ее штат состоял из завхоза-коменданта, проводника и ... сторожа-пожарника. Вскоре появилась докладная записка Кунгурского райисполкома Совету Министров РСФСР, в которой говорится: "Пещера, имеющая мировую известность, находится в нетерпимом положении, без нормального штата, электрического освещения, необходим ремонт зданий, благоустройство входа и пещеры". Записка осталась без ответа, и пещера была передана в ведение краеведческого музея (дир. А. К. Воронихин). Только в апреле 1948 г. Кунгурский горисполком специальным решением выделил ее в самостоятельную административную единицу.

В 1946 г. на базе Уральского филиала Комплексной научно-исследовательской станции МГУ организован Кунгурский стационар. Его руководи-



тели В. С. Лукин (рис. 19.2), Д. В. Рыжиков, А. В. Турышев энергично взялись за обустройство пещеры. Были удалены отвалы, оставшиеся в пещере от проходки входного тоннеля; для ликвидации утечек холодного воздуха затампонированы трещины в тоннеле; расчищен ото льда Телячий ходок; реконструированы крепи и ограждения; запрещено применение для освещения керосиновых факелов (экскурсантам выдаются свечи и аккумуляторные фонари).

В 1947 г. в Перми состоялось совещание, определившее пути развития карстоведения как науки. Оно завершилось экскурсией в Кунгурскую пещеру, участники

Рис. 19.2. Руководитель стационара, почетный гражданин г. Кунгура Вячеслав Семенович Лукин (1914—1997 гг.)

которой оставили много отзывов. Наиболее полный отзыв дал зав. отделом геолого-краеведческого музея г. Перми доцент Е. Пермяков: “Кунгурская Ледяная пещера мне известна с 1899 г. и посещалась много раз. В далеком прошлом вход пещеру был узок, приходилось проникать в пещеру “ползком”. В настоящее время пещера приведена в порядок. В редких случаях между гротами приходится нагибаться, в опасных местах выложены подпорные стенки, что, конечно, отчасти нарушает цельность впечатления от грандиозности гротов, созданных природой внутри горы, но эти сооружения являются не лишними ввиду постоянного влияния процесса разрушения и образования новых пустот.

Необходимо отметить большую заботу и внимание к ее состоянию, эту заслугу нужно отнести к энтузиастам-краеведам, положившим немало труда для приведения в порядок пещеры и расчистке ее ходов. Не лишнее было бы для сохранения чистоты ледяных образований поменьше коптить факелами и лучше было бы ее электрифицировать. Этим вопросом должен заняться Научно-исследовательский институт, Карстовая станция или Заповедник совместно с административными органами г. Кунгура. Замечательная Кунгурская пещера — одна из самых популярных в нашей стране, должна стать естественной научно-исследовательской базой”.

В 1948 г. Пермский облисполком передал пещеру и здания бывшей экскурсионной базы в ведение Уральского филиала карстово-спелеологической станции МГУ. Ректор МГУ академик А. Н. Несмеянов четко определил ее задачи. Одна из них — *бесплатное* обслуживание экскурсий.

В 1951 г. Московский госуниверситет передал станцию в Уральский филиал АН СССР, который организовал на ее базе научно-исследовательский стационар. Одним из условий передачи было продолжение оборудования пещеры и экскурсионно-просветительской работы в ней. Для электрификации первых трех гротов пещеры была сооружена временная трансформаторная подстанция и линия низкого напряжения.

В 1952—1956 гг. расширены без взрывов проходы между гротами; устроен новый проход между гротами Грозный и Западный, оборудованы тропы и лестницы, ограждения из каменных плит, уложенных без раствора; вручную обрушены пласты над тропой.

В 1957 г. построен павильон для экскурсантов перед входом в пещеру. Завершена электрификация пещеры до Большого озера и обратный путь через гроты Колизей — Западный. Начато благоустройство территории у входа в пещеру: разбит парк, посажены липы, тополя, березы, ели.

В 1958 г. устроен новый безопасный проход между гротами Крестовый и Руины.

В 1963 г. взрывами начата проходка тоннеля, соединяющего гроты Дружбы Народов и Хлебниковых; прокладка тропы в гроты Геологов—Атлантида, засыпка неровностей, раскалывание и удаление глыб.

В 1964 г. взрывами расширены проходы в гроты Западный, Колизей, Смелых; устроены каменные стены у осыпей в гротах Атлантида, Геологов, Грозный, Колизей, Смелых, Хлебниковых; забетонирована тропа в гротах Грозный, Дружбы Народов, Колизей, Мокрая Кочка.

В 1965 г. с помощью взрывов выровнены потолки и углублены проходы в гротах Атлантида, Геологов, Грозный, Западный, Колизей, Смелых; тропы засыпаны щебенкой ангидрита.



Рис. 19.3. “Архивариус пещеры” Евгений Павлович Дорофеев (1934—1998 гг.)

В 1966 г. оборудована смотровая площадка в гроте Дружбы Народов, тропы и ступени в гротах Мокрая Кочка, Центральный, Эфирный.

В 1967 г. шахтеры комбината “Кизелуголь” пробрили 16-метровый тоннель на западный берег Большого озера. Завершена реконструкция прохода Крестовый—Руины, удалены ранее уложенные железобетонные плиты, углублены проходы и забетонированы тропы и ступени в гротах Хлебниковых, Центральный, Эфирный.

В 1968 г. завершена электрификация маршрута Хлебниковых—Грозный, с помощью взрывов расчищен Телячий ход.

В 1969 г. открыт маршрут через грот Колизей, сооружены деревянные мостки

и открыто движение через грот Атлантида. В конце года экскурсионная база была передана в Пермский областной совет по туризму. Однако, освободившись от несвойственных стационару функций, его сотрудники продолжали заниматься проблемой туристского использования пещеры.

В 1971 г. Е. П. Дорофеев (рис. 19.3) и Л. И. Крапивин составили проект благоустройства Заозерной части пещеры, включающий тоннель в грот Вышка. Ведется обрушение взрывами нависших плит над новой тропой, пробурены шпурсы в гротах Бриллиантовый и Руины под датчики электротермометров.

В 1972 г. проходчики комбината “Кизелуголь” начали проходку 100-метрового тоннеля в грот Вышка.

В 1973 г. расчищен и электрифицирован 460-метровый маршрут от Большого озера через гроты Хлебниковых—Романтиков—Длинный—Великан—Вышка с выходом через тоннель на склон Ледяной горы; устроена асфальтовая подъездная дорога к пещере.

В 1974 г. продолжалась расчистка троп; установлены крепи из камней в гротах Бриллиантовый, Данте, Полярный, Хлебниковых; покрыт бетоном пол старого тоннеля; реконструирована защитная стенка в гроте Атлантида; установлена шахтная металлическая крепь и расчищен завал между гротами Колизей—Смелых; у пещеры оборудована асфальтированная стоянка для автотранспорта.

В 1979 г. на р. Сылве произошло катастрофическое наводнение. Хотя вход в пещеру был закрыт мешками с песком, в ней оказались затоплены электросеть, приборы и прожекторы. Экскурсии были прекращены; кабель отцеплен и просушен током большой мощности; восстановлены осыпавшиеся защитные стенки и осевшие участки тропы.

В 1981 г. начаты работы по восстановлению электрического освещения по новому маршруту от грота Хлебниковых до грота Вышка. В гроте Вышка



Рис. 19.4. Туристский комплекс “Сталагмит”

проложена новая тропа вдоль восточной стены, расширены и углублены в рост человека проходы Романтиков—Длинный и Длинный—Великан, выложены стенки у осыпи в гроте Длинный; взрывами снят потолок в низких проходах у гротов Коралловый, Метеорный, Мокрая Кочка, Руины, Скульптурный, Центральный, Эфирный; обрушены неустойчивые плиты в гротах Великан, Вышка, Длинный; устроены ограждения из труб в гротах Великан, Вышка, Длинный, Романтиков; взрывами углублена тропа в Крестовом гроте и пол выходного тоннеля из грота Вышка; покрыта бетоном тропа от грота Дружбы Народов до выхода из тоннеля, устроены бетонированные площадки в гротах Великан и Хлебниковых. В гроте Вышка устроена галерея из дуговых шахтных крепей, поверх которых натянута металлическая сетка.

В 1982 г. заново забетонирована тропа от входа в пещеру до грота Хлебниковых; в выходном тоннеле устроены перемычка и третьи двери; забетонированы стены тоннеля из грота Вышка; установлено ограждение тропы трубами от грота Центральный до Западного; кабели и электрооборудование установлены на металлических стойках; выложены крепи в гротах Длинный и Дружбы Народов; сооружены опорные колонны в гротах Великан, Длинный и бетонированная площадка на выходе из пещеры.

В 1983 г. у пещеры построен туристский комплекс “Сталагмит”, включающий пятиэтажную гостиницу, ресторан, спортивный и лекционный залы, спортивные площадки. Комплекс рассчитан на 350 мест (рис. 19.4).

В 1985 г. проведено повторное торкретирование выходного тоннеля бетоном; шахтеры из Кизела заменили крытую галерею в гроте Вышка частотолком подпирающих потолок стальных балок-швеллеров.

В 1986 г. шахтеры из Березников для усиления вентиляции расчистили отбойными молотками Старый вход.

В 1990 г. у входа в пещеру установлен выполненный преподавателем художественного лица С. С. Кривошековым барельеф Александра Хлебникова.



Рис. 19.5. Вход в пещеру

В 2001 г. для сохранения ледового убранства пещеры входной и выходной тоннели снабжены решетками, допускающими ее “зарядку” холодным воздухом.

В 2003 г. заново оформлен вход в пещеру (рис. 19.5).

Освоение пещеры для туризма требовало непрерывного проведения работ, обеспечивающих безопасность туристов, более комфортного прохождения маршрута, его освещения и пр. В настоящее время искусственные сооружения в Кунгурской пещере представлены *экскурсионными тропами, обзорными площадками, тоннелями, подпорными стенками, колоннами и опорами, подсобными помещениями* (рис. 19.6). Они занимают площадь около 155 м<sup>2</sup> и объем 360 м<sup>3</sup> (см. таблицу). В отдельных гротах площадь и объем искусственных сооружений составляют около 10 % их площади и объема.

В Кунгурской пещере все время существовала проблема сохранения ее ледового убранства, зависящая не только от погодных условий на поверхности, но и от режима проветривания. Ею приходилось непрерывно заниматься всем “хозяевам” пещеры. Не всегда она решалась достаточно квалифицированно, с учетом современного состояния научной и практической спелеологии. В конце XX в. изменились представления об уровне необходимого оборудования экскурсионных пещер. В частности, более жесткие требования к ним были введены в 60-е гг. Международным Союзом Спелеологов при ЮНЕСКО.

Для обеспечения туристского использования пещеры в XX в. неоднократно издавались ее описания, буклеты, фотоальбомы, наборы открыток [143]. Их авторами были:

**20-е гг.** — В. А. Весновский, М. Зуев-Ордынец, М. Коноплянец, Е. Н. Косвинцев, А. П. Нечаев;

**30-е гг.** — В. Я. Альтберг, И. Герасимов, М. Зуев-Ордынец, Г. И. Ледомский, С. Д. Лялицкая, Г. А. и Н. А. Максимович;

**40-е гг.** — А. К. Воронихин, М. П. Скрипов, Я. Якоб;

**50-е гг.** — А. К. Воронихин, В. А. Гензель, В. С. Лукин, Ю. Копытов, С. Д. Лялицкая;

**60-е гг.** — А. К. Воронихин, Е. П. Дорофеев, В. С. Лукин, Г. А. Максимович, В. Рауш, Р. Б. Рубель, Д. В. Рыжиков, С. А. Торопов, А. В. Турышев, Д. Славчев, В. Шилов;

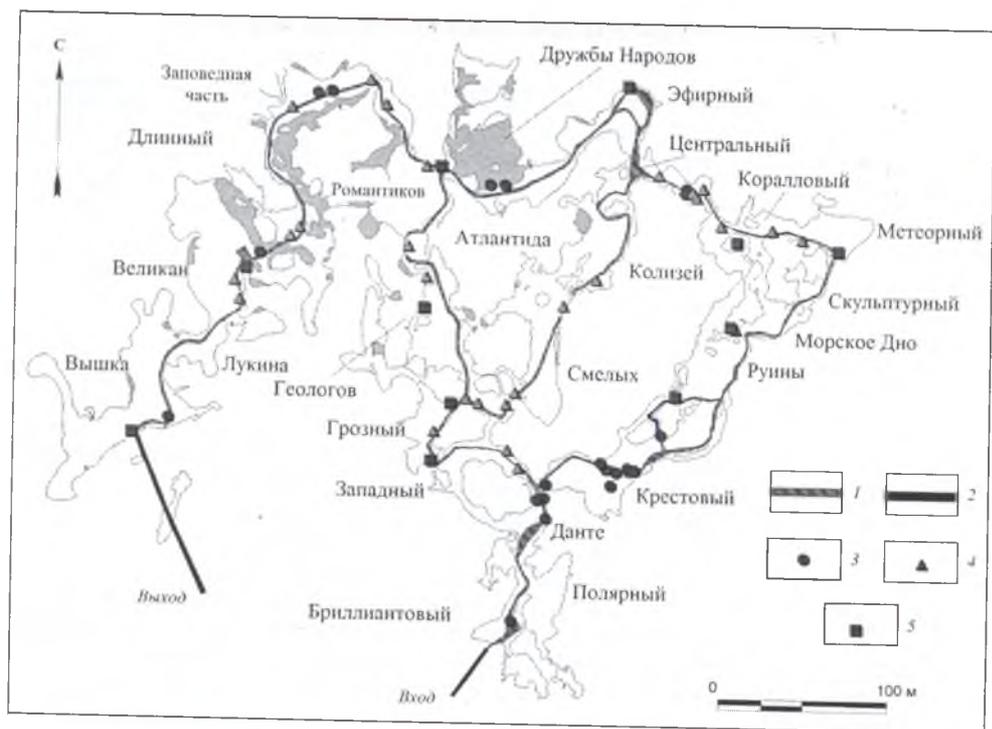


Рис. 19.6. Искусственные сооружения в Кунгурской пещере.  
 1 — экскурсионная тропа; 2 — тоннели; 3 — подиорные колонны; 4 — стенки; 5 — подсобные помещения

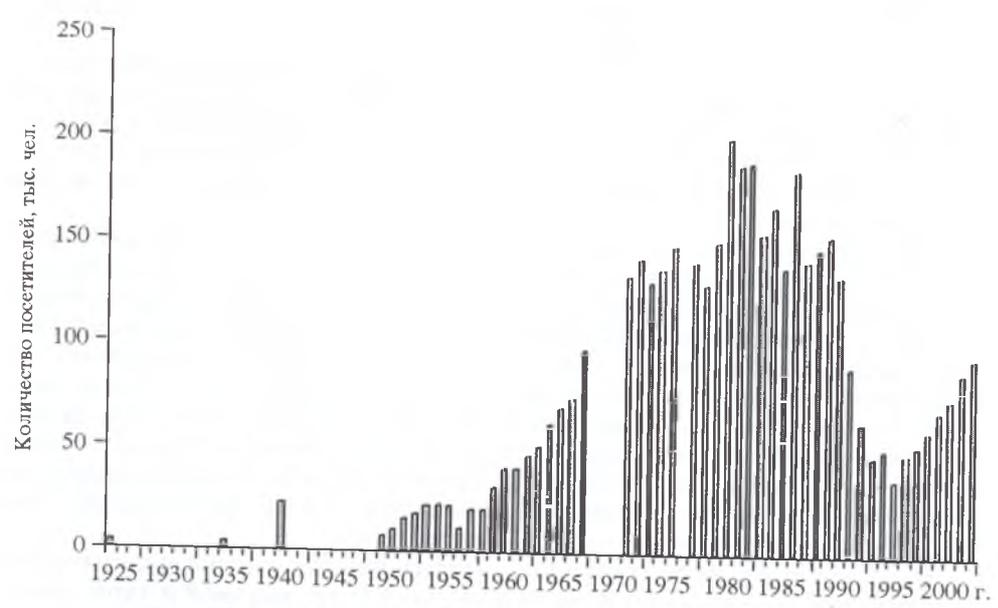


Рис. 19.7. Посещаемость Кунгурской пещеры с 1925 по 2000 г.

### Гроты с наибольшим количеством искусственных сооружений

Грот	Площадь грота, м <sup>2</sup>	% сооружений от площади грота	Объем грота, м <sup>3</sup>	% сооружений от объема грота
Коралловый	425	10,3	1270	8,2
Атлантида	250	4,0	1750	1,8
Данте	575	1,7	2310	0,7
Крестовый	1800	1,5	19 820	0,3
Длинный	3535	1,0	17 670	0,5
Великан	3900	0,5	46 820	0,1
Дружбы Народов	2315	0,3	9260	0,2
Бриллиантовый	425	0,3	1280	0,2
Всего	13 225	1,2	100 180	0,4

**70-е гг.** — А. К. Воронихин, Е. П. Дорофеев, Ю. А. Ежов, В. Каменев, С. Кулябин, В. С. Лукин, Г. А. Максимович, С. А. Торопов;

**80-е гг.** — С. Н. Волков, Е. П. Дорофеев, В. С. Лукин;

**90-е гг.** — В. Н. Андрейчук, Е. А. Дорофеев, В. Рапп;

**2000-е гг.** — В. Н. Дублянский, О. И. Кадебская, В. Рапп.

Кунгурская пещера — одна из самых посещаемых пещер в России (рис. 19.7). Только за последние 20 лет ее посетило около 3 млн человек, что ставит Кунгурскую пещеру вровень с такими жемчужинами карста, как ледяная пещера Айсризенвельт в Австрии и Постойна в Словении.

В Кунгурской пещере в разные годы побывало много выдающихся людей.

В **XVIII в.** ее посетили швед Ф. И. Страленберг, русские исследователи С. У. Ремезов, В. А. Татищев, профессора И. Г. Гмелин и Г. Ф. Миллер, академик И. И. Лепехин.

В **XIX в.** в ней побывали профессора И. Ф. Эрдманн и М. Я. Киттары, академики И. С. Поляков и Е. С. Федоров.

В **XX в.** пещеру посетили сестра императрицы Александры Федоровны — принцесса Виктория фон Баттенберг и первая женщина-геолог России В. А. Варсанюфьева, полководец В. К. Блюхер и командующий 3-й Уральской дивизией Р. И. Берзин, комиссар дивизии А. Л. Борчанинов и председатель ВЦИКа М. И. Калинин, летчик В. П. Чкалов, маршал Г. К. Жуков и многие другие [361].

В пещере работали выдающиеся карстоведы России Г. А. Максимович, Н. А. Гвоздецкий и Д. С. Соколов. Ее посетили зарубежные исследователи карста Балаж Денеж (Венгрия), Мариан Пулина (Польша), Паоло Форти (Италия), Адольфо Эразо (Испания), Дерек Форд (Канада), Даоксиан (Китай), Нарухико (Япония), а также совершили экскурсии делегаты 17-го Всемирного геологического конгресса (1937 г.), Молотовской карстовой конференции (1947 г.), Международного симпозиума по инженерной геологии карста (1992 г.) и десятков других проводившихся на Урале геологических мероприятий. В 2002 г. Кунгурская пещера была представлена на международной выставке “Samcheok International Cave Expo Korea 2002”, посвященной оборудованным пещерам мира [168].

В 2003 г. в Кунгуре состоялась международная научно-практическая конференция “Кунгурская Ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности”. На ней были детально рассмотрены проблемы откры-

тия, исследования, использования и охраны пещеры [204]. В частности, было указано, что социально-экономическая роль Кунгурской пещеры в развитии региона определяет этику бизнеса, который строится не на получении экономической выгоды от использования пещеры, а на использовании ее имиджа (памятник природы мирового значения) и статуса (пермский период) для привлечения туристов (маркетинговый подход) и повышения туристской привлекательности региона в целом [44].

## Глава 20

### КУНГУРСКАЯ ЛЕДЯНАЯ ПЕЩЕРА КАК ПАМЯТНИК ПРИРОДЫ

Об уникальности Кунгурской Ледяной пещеры говорили и писали многие ее исследователи. В XVIII в. это были В. Н. Татищев [391] и В. И. Геннин [65], в XIX в. — М. Я. Киттары [184] и И. Ф. Эрдманн [444], в XX в. — А. Е. Ферсман [405] и Г. А. Максимович [256], а также многие другие географы и геологи. Первым необходимость охраны льдов Кунгурской пещеры отметил академик Е. С. Федоров [403].

В 1926 г. А. Е. Ферсман обратил внимание на уникальность природных ландшафтов района пещеры, а в конце года Госкомитет по охране природы Главнауки СССР принял специальное постановление, в котором отметил, что Кунгурская пещера “представляет большой научный интерес и заслуживает охраны”.

В 1927 г. Президиум ВЦИК рассмотрел просьбу об охране Кунгурской пещеры и указал, что для этого необходимо постановление Наркомпроса. Соответствующее постановление принято не было.

В 1933 г. в резолюцию I Всесоюзного съезда по охране природы по докладу А. Т. Хлебникова внесен пункт, в котором отмечено “значение Кунгурской пещеры в научно-просветительном и экскурсионно-туристском отношении, в частности — для развития иностранного туризма”.

В 1937 г. А. Т. Хлебников передал в Комитет по заповедникам материалы, необходимые для признания Кунгурской пещеры памятником природы государственного значения. В этом же году ВООП выступил с ходатайством о заповедании пещеры. Ходатайство удовлетворено не было.

В 1940 г. Кунгурский районный Совет народных депутатов ходатайствовал перед Пермским обисполкомом об объявлении Кунгурской пещеры памятником природы, а в 1941 г. — о заповедании склонов Ледяной горы. Эти просьбы не нашли поддержки в областном центре.

После Отечественной войны вопрос об охране Кунгурской пещеры неоднократно поднимал Кунгурский стационар.

В 1948 г. на заседании ВООП его директор Е. А. Гаврилов отметил гибельное состояние Кунгурской пещеры.

В 1955 г. возник вопрос о ликвидации стационара и передаче пещеры Кунгурскому краеведческому музею. Кунгурские горком партии, горисполком и Уральский филиал АН СССР выступили против такого решения, указывая, что “оно не обеспечит охрану и туристское использование пещеры”.

В 1958 г. под руководством академика Е. М. Лавренко разработан проект всесоюзной сети заповедников. Ледяная гора с пещерой должны были стать частью заповедника “Кунгурский”. Проект не осуществлен. В этом

же году В. С. Лукин выступил с докладом о состоянии Кунгурской пещеры на Всесоюзном совещании по вопросам развития заповедного дела в СССР. Пункт о заповедании Кунгурской пещеры в решение совещания не включен. В конце 1958 г. В. С. Лукин сделал аналогичный доклад на совещании по охране природы Урала. В решении имеется пункт об оформлении заповедного режима на территории Кунгурской Ледяной пещеры. Докладная записка в Президиум АН СССР результата не дала.

В 1959—1960 гг. о необходимости охраны Ледяной горы и Кунгурской пещеры пишут академик Б. П. Колесников и проф. Г. А. Максимович.

В 1960 г. по ходатайству Кунгурского стационара и Пермского государственного университета принято решение Кунгурского горисполкома № 12 “Об установлении заповедной зоны для Кунгурской ледяной пещеры”. Выделенную заповедную зону (137 га) Пермский облисполком не утвердил.

В 1963 г. Пленум Карстовой комиссии АН СССР принял решение о необходимости заповедания пещеры.

В 1965 г. решением Пермского облисполкома № 399 Кунгурская пещера объявлена *памятником живой и неживой природы*. Реально решение не выполнялось.

В 1967 г. Центральная лаборатория охраны природы АН СССР разработала перечень примечательных ландшафтов СССР. По предложению Пермского университета Кунгурская пещера включена в него в качестве *геологического заказника*.

В 1968 г. коллектив Кунгурского стационара стал коллективным членом ВООП. На него оформлены охранные обязательства по археологическим памятникам “Городища первобытного человека на Ледяной горе № 1 и 2”. По самой пещере аналогичного документа нет.

В июне 1969 г. на совещании по охране природы в Перми В. С. Лукин и Е. П. Дорофеев сделали доклад “Охрана туристских объектов”.

В 1977 г. В. С. Лукин представил в Пермский областной совет по туризму и экскурсиям докладную записку, в которой рассмотрены вопросы охраны заповедной пещеры.

В 1984 г. в рекомендациях, подготовленных ВООП, Кунгурская пещера характеризуется как *“объект республиканского значения”*.

В 1987 г. согласно новому ранжированию охраняемых объектов, принятому Постановлением Госплана РСФСР от 24.04.1983 г., Кунгурская пещера по предложению Пермского университета отнесена к *геоморфологическим памятникам*.

В 1988 г. по акту горного отвода за АО “Пермтурист” закрепляется преимущественное право на владение пещерой. В этом же году Пермский облисполком решением № 139 подтвердил статус охраняемой природной территории “Ледяная гора”. Реально решение не выполняется.

В 1989 г. Кунгурская пещера объявлена *геологическим памятником* (№ 197 в “Перечне охраняемых и рекомендуемых к охране природных территорий Пермской области”). Охрана памятника не организована.

В 1990 г. озабоченность состоянием пещеры неоднократно высказывают сотрудники Кунгурского стационара.

В 1991 г. научная общественность Пермской области выступила с предложением создать на базе ряда охраняемых природных территорий (ОПТ) национальный парк “Сылвенский”.

В 1992 г. кафедра биоценологии ПГУ разработала проект заповедника и доложила его на ряде совещаний. Наибольшие споры вызвал статус Кунгурской пещеры. Принято компромиссное решение — пещера входит в состав национального парка, но без изъятия земель и изменения вида деятельности АО “Пермтурист”.

В 2000 г. продолжается дискуссия о существовании двух памятников природы — Ледяной горы (*ландшафтный памятник природы*, № 204, площадь 137 га) и Кунгурской пещеры (*геологический памятник природы*, № 197, площадь 37 га). Эти географически и исторически неразрывные объекты находятся в двойном административном подчинении (г. Кунгур и Кунгурский район) и в двойном пользовании (“Пермтурист” и Кунгурская лаборатория Горного института УрО РАН).

В 2001 г. в соответствии с федеральным законом “Об особо охраняемых территориях” от 14.03.1995 г., Земельным Кодексом РСФСР, ст. 89 и Законом Пермской области “Об историко-культурно-природном наследии” от 20.02.1997 г. образован *историко-природный комплекс “Ледяная гора” и “Кунгурская Ледяная пещера”* площадью 106,5 га [59, 328].

Таким образом, вопрос об охране пещеры и Ледяной горы, в которой она находится, к сожалению, до сих пор не нашел достойного решения. Кунгурская пещера непрерывно меняла свой статус, в разные года становясь геологическим, геоморфологическим, природным, историко-природным памятником (заповедником, заказником, охраняемой территорией) и пр. Принятые по ней природоохранные решения не выполнялись.

Кунгурская пещера известна как уникальный памятник природы и исследуется более 300 лет [204]. Уникальный (лат. *unicum*) — единственный в своем роде. Но ведь каждая пещера — единственный природный объект. В чем же уникальность Кунгурской пещеры?

Может быть, уникальны ее размеры? До 1960 г. Кунгурская пещера (длина 5,7 км) действительно была самой протяженной пещерой в СССР и в мире в гипсах. Но сейчас она лишилась этого почетного звания: в 10 спелеообластях России известно 675 гипсовых пещер, из которых Кунгурская находится лишь на 5-м месте по протяженности. В списке гипсовых пещер мира она переместилась на 17-е место, уступив гигантским лабиринтам Украины (Оптимистическая, 218,0 км; Озерная, 111 км и др.), России (Кулогорская-Троя, 16,2 км и др.), США (Джестер, 11,8 км), Италии (Спи-пола-Агва Фреда, 11 км) и Испании (Куэва де Агуа, 8,4 км). Все они заложены в гипсах пермского и неогенового возраста.

Может быть, уникальность Кунгурской пещеры в прилагательном *ледяная*? И это не так. Только в России имеется более 100 гипсовых пещер с ледяным убранством, причем во многих из них площадь и объем оледенения больше, чем в Кунгурской (Кульдукская на Алтае и пр.). В мире тоже известно много ледяных пещер, среди которых выделяются пещеры в известняках — Добшинская Ледяная (Словакия), Айсризенвельт и Айсризенхоле (Австрия).

Наконец, может быть Кунгурская пещера уникальна по посещаемости? Среднее количество посетителей Кунгурской пещеры в 1924—2000 гг. составляло 80 тыс. чел. в год (максимальное — 201,5 тыс. чел., 1980 г.). По данным Международного союза спелеологов, в мире насчитывается более 800 экскурсионных пещер. Пещеры с посещаемостью более

200 тыс. чел. имеются в Европе (Австрия, Бельгия, Великобритания, Германия, Испания, Италия, Словения, Украина), Азии (Грузия, Индия, Иран, Китай), Африке (ЮАР).

Но, несмотря на это, мы и в XXI в. называем Кунгурскую Ледяную пещеру уникальной. Для этого имеются веские основания:

— Кунгурскую пещеру обычно рассматривают как эталон полостей, заложенных в гипсах; в гипсах и ангидритах; в гипсах, ангидритах и доломитах или в слоистой сульфатно-карбонатной толще. Сейчас ясно, что пещера заложена в толще переслаивания сульфатных и карбонатных пород, представленной ангидритами, гипсо-ангидритами, гипсами и доломитами ( $P_{IK}$ ) и карстовой брекчией ( $N_2-Q_1$ ). Нижняя часть ее гротов вскрыла филипповские известняки ( $P_{IK}$ ).

— Анализ морфологии пещеры свидетельствует об особых условиях ее образования и существования, которые до последнего времени не объясняла ни одна из существующих гипотез происхождения пещер [135].

— На долю Кунгурской пещеры приходилось около 50 % общей длины и объема и более 60 % площади всех 158 гипсовых пещер Приуралья [332].

— Условия формирования пещеры определяют ее специфическую обводненность: в пещере имеется 70 подземных озер, имеющих разные размеры, условия питания и режим. Общая площадь озер около 7,5 тыс. м<sup>2</sup> (11 % от площади всех гротов в пещере [206]).

— В Кунгурской пещере профессор И. Г. Гмелин произвел в 1733 г. первые в мире метеонаблюдения в пещерах [447]. Сейчас известно, что в пещере имеется три зоны: с постоянным оледенением (здесь весь год сохраняется отрицательная температура пород и воздуха), с сезонным оледенением (породы промерзают лишь зимой) и постоянных положительных температур [114].

— В зоне постоянного оледенения имеются конжеляционные, сублимационные и осадочно-метаморфические льды разного происхождения и форм выделения [111].

— В пещере обитает *эндемик* — рачок-крангоникс Хлебникова, выделенный в особый подвид Максимовича [336].

Уникальность природных компонентов пещеры дополняют:

— доступность пещеры для массового туризма и расположение в пределах одного из старейших городов России [129, 227, 237];

— проведение многолетних (до 50 лет) режимных наблюдений за компонентами природной среды [143];

— отсутствие патогенных факторов; стабильность параметров микроклимата в период пребывания человека в подземных условиях и способность их к восстановлению [50].

Кунгурская пещера является символом Кунгура и своеобразной визитной карточкой всей Пермской области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматический справочник. М.: Сельхозгиз, 1959. 130 с.
2. Ажимова А. Ю., Киселев Г. П., Лавров И. А. и др. Радиоактивность Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 168—171.
3. Аксем С. Д., Климчук А. Б. Исследование равновесий в системе “порода—вода” и некоторые другие проблемы гидрохимии сульфатного карста. Киев: Экспресс-информация ККСЦ, 1991. Вып. 15. 25 с.
4. Алексеева О. Л. Суммарная расчлененность рельефа Пермской области // Физико-географические основы развития и размещения производительных сил Нечерноземного Урала: Междуведом. сб. науч. тр. Пермь, 1992. С. 54—63.
5. Алешин А. С., Баулин Ю. И., Фролов А. Д. Применение геофизических методов разведки при изучении карстовых пещер. Информ. сообщ. ОНТИ ВИЭМС. Сер. регион. разведки и промысл. геофиз. 1965. Вып. 73, № 9. 24 с.
6. Аликина Э. В., Блинов С. М., Горбунов О. Ю. и др. К гидрохимии Кунгурской пещеры // Вопросы гидрогеологии, инженерной геологии и охраны природной среды: Тез. докл. Всерос. студенч. конф. 19—23 апр. 1983 г. Пермь, 1983. С. 69—70.
7. Альтберг В. Я. Кунгурская ледяная пещера // Природа, 1930. № 10. С. 1036—1041.
8. Альтберг В. Я. Ледяные “розы” под землей // Вестн. знания. 1936. № 12. С. 912—915.
9. Альтберг В. Я. Наблюдения в Кунгурской ледяной пещере в 1928 г. // Изв. Гос. гидрол. ин-та. Л., 1930. № 26—27. С. 69—78.
10. Альтберг В. Я. Наблюдения в Кунгурской ледяной пещере в 1929—1930 гг. Ч. II // Изв. Гос. гидрол. ин-та. Л., 1931. № 32. С. 77—92.
11. Альтберг В. Я. Снежинки-гиганты // Хочу все знать, 1931. № 3. С. 84—85.
12. Альтберг В. Я. Экспедиция 1927 г. по изучению Кунгурской ледяной пещеры и ледников Кавказа // Изв. Гос. гидрол. ин-та. Л., 1929. № 23. С. 103—104.
13. Альтберг В. Я., Трошин В. Ф. О новых формах кристаллического льда // Изв. Гос. гидрол. ин-та. Л., 1931. № 32. С. 93—103.
14. Андреев А. И. Очерки по источниковедению Сибири XVII в. Л., 1939. С. 27—34.
15. Андрейчук В. Н. Антропогенные отложения Кунгурской пещеры // Минералы и отложения пещер и их практическое значение: Тез. докл. Пермь, 1989. С. 47—49.
16. Андрейчук В. Н. Некоторые своеобразные отложения в Кунгурской пещере, связанные с ее оледенением // Минералы и отложения пещер и их практическое значение: Тез. докл. Пермь, 1989. С. 22—23.
17. Андрейчук В. Н. Генетическая классификация отложений карстовых пещер // Изучение уральских пещер: Докл. конф. Пермь, 1992. С. 94—98.
18. Андрейчук В. Н. Минерализация снежно-ледяных образований Кунгурской ледяной пещеры // Научные чтения. IV Всеуральское совещание по подземным водам Урала и сопредельных территорий: Тез. докл. Пермь, 1994. С. 118.
19. Андрейчук В. Н. О возможности гравитационных обрушений поверхности Ледяной горы над подземными полостями // Кунгурская ледяная пещера. Пермь, 1995. Вып. 1. С. 81—85.
20. Андрейчук В. Н. Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Черновцы: Прут, 1999. 52 с.
21. Андрейчук В. Н. Аэрозоли в воздухе пещер: происхождение, распределение, эффекты // Свет: Вестн. Киев. карстолого-спелеол. центра. Киев, 1999. № 1 (20). С. 10—12.
22. Андрейчук В. Н. Полвека у Ледяной пещеры. Сосновец: Силезский университет, 2000. 117 с.
23. Андрейчук В., Галускин Е. Криогенные минеральные образования Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 2001. С. 118—115.

23. Андрейчук В., Галускин Е. Криогенные минеральные образования Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 2001. С. 118—115.
24. Андрейчук В. Н., Дорофеев Е. П. Антропогенный фактор и Кунгурская пещера // Кунгурская ледяная пещера. Пермь, 1995 Вып. 1 С. 85—99.
25. Андрейчук В. Н., Дорофеев Е. П., Лукин В. С. Органические трубы в карбонатно-сульфатной кровле пещеры // Пещеры. Межвуз. сб. науч. тр, Пермь, 1990. Вып. 22. С. 16—23.
26. Андрейчук В. Н., Дублянский В. Н. Сотрудники стационара и Кунгурская ледяная пещера // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности. Кунгур, 2003. С. 112—120.
27. Андрейчук В. Н., Лавров И. А. Гипсовый карст и пещеры Приуралья: основные особенности и закономерности // Комплексное освоение недр Западного Урала: Мат-лы науч. сессии Горного института УрО РАН. Пермь, 1998. С. 148—151.
28. Андрейчук В. Н., Лукин В. С. Естественные предпосылки самоочищения подземной атмосферы // Свет. Международный спелеол. журн. СНГ 2000. № 1 (21). С. 26—29.
29. Андрейчук В. Н., Яцына И. И. О гидрохимической стратификации в озерах Кунгурской ледяной пещеры // Научные чтения. IV Всеуральское совещ. по подземным водам Урала и сопредельных территорий: Тез. докл. Пермь, 1994. С. 137—138.
30. Апродов В. А. К проблеме тектогенеза Краснокамско-Полазненского нефтяного района // Изв. АН СССР, сер. геол. М.: Изд-во АН СССР, 1943. № 2. С. 75—79.
31. Апродов В. А. Карстовые многочлены (карстополіномы) Кунгурской пещеры // Докл. АН СССР, 1949. Т. LXV. № 2. С. 187—189.
32. Астрономический календарь. М.: Наука, 1975. Вып. 79. 124 с.
33. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР. М.: ГУГК, 1968. Т. I—IV.
34. Баулин Ю. И. Использование карстовых пещер в качестве естественных геофизических лабораторий // Использование пещер: Тез. докл. совещ. Пермь, 1979. С. 47 - 48.
35. Белянкина Е. Б., Пикулева Ж. В. Конденсация на метеобудках в Кунгурской ледяной пещере // Научные достижения студентов на рубеже веков: Мат-лы научно-практ. конф. Пермь, 2001. С. 4—5.
36. Берсенев Ю. И. Карст Дальнего Востока. М.: Наука, 1989. 171 с.
37. Биржевая И. А. Химический состав льда Кунгурской ледяной пещеры // Научные достижения студентов на рубеже веков: Мат-лы научно-практ. конф. Пермь, 2001. С. 6—10
38. Биржевая И. А. Загрязнение подземных вод в районе Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 2001. Вып. 27—28. С. 150—153.
39. Бирилова Н. И. Карстовые явления Кунгура и его окрестностей // Изв. Гос. гидрол. ин-та. Л., 1934. № 66. С. 54—69.
40. Бирштейн Я. А., Генезис пресноводной, пещерной и глубоководной фаун. М.: Наука, 1985. 247 с.
41. Борисевич Д. В. Геоморфология и история развития рельефа среднего и нижнего течения р. Чусовой // Тр. Института географии АН СССР. М.; Л., 1948. Вып. 39. С. 82—102.
42. Бочаров Н. А. Из истории формирования долины Волги и некоторых ее притоков // Геоморфология и новейшая тектоника Волго-Уральской области и Южного Урала: Тр. совещ. Уфа, 1960. С. 36—43.
43. Бублейников Ф. Д. Пещеры. М.: Госкультпросветиздат, 1953. 111 с.

44. Буркацкая И. Л. Кунгурская ледяная пещера. Социально-экономическая роль в развитии региона // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 4—9.
45. Валуйский С. В., Родионов В. В., Белокрыс И. А. Длиннейшие и глубочайшие пещеры Пермской области // Пещеры. Пещеры в гипсах и ангидритах: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1988. Вып. 21. С. 123—127.
46. Варсанюфьева В. А. О карстовых явлениях в северной части Уфимского плоскогорья // Землеведение, 1913. Т. 20, кн. III. С. 176—178.
47. Варсанюфьева В. А. Карстовые явления в северной части Уфимского плоскогорья // Землеведение, 1915. Т. XXII, кн. IV. С. 39—83.
48. Введенская Н. В., Голубева И. И. Основы геоморфологического районирования восточной окраины Русской равнины и западного склона Урала // Научные труды Пермского политехнич. ин-та, 1964. Сб. № 12, вып. 2. С. 48—56.
49. Введенская Н. В., Спиринов Л. Н. Планетарная тектоническая трещиноватость западной части территории СССР // Геология и полезные ископаемые Пермского Прикамья: Сб. науч. тр. Пермь, 1973. С. 90—100.
50. Верихова Л. А. Спелеотерапия в России. Пермь, 2000. 240 с.
51. Весновский В. А. Кунгурская ледяная пещера. Пермь: Изд-во Перм. о-ва краевед., 1926. Сер. А, вып. 1.4 с.
52. Вишневская Н. Л., Кичигин В. А. Естественное кондиционирование воздуха в Кунгурской ледяной пещере // Проблемы геометеорологии и аккумуляции зимнего холода: Сб. науч. тр. Свердловск, 1990. С. 104—105.
53. Вишневский Б. Н. Находка описания Кунгурского “Чертежа” Семена Ремезова // Тр. Ин-та истории, естествознания и техники АН СССР. М., 1961. Т. 37, вып. 2. С. 342—344.
54. Войткевич Г. В., Закруткин В. В. Основы геохимии. М.: Высш. шк., 1976. 366 с.
55. Волков С. Н., Дорофеев Е. П. Влияние посещаемости на условия накопления и сохранения холода Кунгурской ледяной пещеры // Практическое использование пещер гипсового карста и их охрана в свете задач основных направлений развития народного хозяйства: Тез. докл. Пермь, 1987. С. 38—39.
56. Володин А. П., Пшеничников В. А. К изучению бактериальной флоры Кунгурской ледяной пещеры // Природа, 1949. № 1. С. 75—79.
57. Володин А. П., Пшеничников В. А. Микрофлора Кунгурской ледяной пещеры // Тр. Перм. стомат. ин-та. Пермь, 1949. Вып. 8. С. 16—21.
58. Воронихин А. К. Кунгурская ледяная пещера. Молотов: Молотовгиз, 1950. 21 с.
59. Воронов Г. А. Ледяная гора и Кунгурская ледяная пещера — историко-природный комплекс // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 9—11.
60. Враницина Н. Л. Климатическая и гидрологическая характеристика района Кунгурской ледяной пещеры // Научные достижения студентов на рубеже веков: Мат-лы научно-практ. конф. Пермь, 2001. С. 15—17.
61. Втюрин Б. И., Втюрина Е. А. Классификация природных льдов Земли // Материалы гляциологических исследований. М., 1984. Вып. 50. С. 35—41.
62. Гавич И. К., Семенова С. М., Швецов В. М. Методика обработки гидрогеологической информации. М.: Высш. шк., 1981. 160 с.
63. Гвоздецкий Н. А. Карст. М.: Географгиз, 1954. 351 с.
64. Геннин В. Горная история // Горный журнал, 1828. Кн. X. С. 55—75.
65. Геннин В. И. Описание Уральских и Сибирских заводов. 1735 // История заводов. М.: Гос. изд-во, 1937.

66. Геологический словарь. М.: Недра, 1973. Т. 2. 455 с.
67. Геология СССР. Т. XII. Пермская, Свердловская, Челябинская, Курганская области. Ч.1. Геологическое описание. М.: Недра, 1969. 304 с.
68. Герасимов И. Кунгурская пещера // Природа и социалист, хоз-во, 1933. № 6. С. 2—3.
69. Герасимов И. П. Основные черты геоморфологии Среднего и Южного Урала в палеогеографическом освещении // Тр. Ин-та географии АН СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948. Вып. 42. С. 74—101.
70. Герасимова И. Ю. Изучение карстовых полостей геофизическими методами на примере Кунгурской ледяной пещеры // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. Пермь, 1998. С. 118—124.
71. Гидрогеология СССР. Т. XIV. Урал. М.: Недра, 1972. 648 с.
72. Гинзбург И. И. Мезозойские карсты и связанные с ними полезные ископаемые// Кора выветривания. М.: Изд-во АН СССР, 1952. Вып. 1. С. 36—42.
73. Гляциологический словарь / Под ред. В. М. Котлякова. Л.: ГИМИЗ, 1984. 528 с.
74. Гмелин И. О Кунгурской подземной пещере: Рукопись 1734 г. (Перевод)//Учен. зап. Ярослав, пед. ин-та, 1958. Вып. 20 (XXX). Ч. 2, геогр. С. 42—46.
75. Головкин В. Н., Смольников Б. М., Дублянский В. Н. и др. Применение геоэлектрических методов исследований к решению основных проблем карста Горного Крыма. Киев: Наук, думка, 1966. 148 с.
76. Головкин М. П. Исследование льда Кунгурской пещеры//Тр. НИИ земной коры ЛГУ, 1938. Т. 1. С. 54—81.
77. Головкин М. П. Исследование льда Кунгурской пещеры //Учен. зап. ЛГУ. Сер. геол.-почв. наук, 1939. № 22, вып. 5. С. 11—35.
78. Головкин М. П. Заметка о структуре и морфологических особенностях кристаллов льда // Зап. Всеросс. минералог, об-ва, 1939. Сер. 1, вып. 1. С. 84—97.
79. Гоман М. В. Химический состав и загрязнение снега в районе Кунгурской ледяной пещеры // Научные достижения студентов на рубеже веков. Мат-лы научно-практич. конф. Пермь, 2000. С. 18—21.
80. Горбунова К. А., Андрейчук В. Н., Костарев В. П. и др. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Изд. Перм. ун-та, 1992. 200 с.
81. Горбунова К. А., Блинов С. М. Химический состав снега района Кунгурской пещеры // Свет: Вестн. Киев, карстолого-спелеол. центра. Киев, 1993. № 4 (10). С. 35.
82. Горбунова К. А., Блинов С. М., Максимович Н. Г. и др. Факторы формирования режима подземных вод района Кунгурской пещеры // Вест. Перм. ун-та. Вып. 4. Геология. Пермь, 1997. С. 148—162.
83. Горбунова К. А., Дорофеев Е. П., Максимович Н. Г. Кунгурская пещера как объект научных исследований // Пещеры. Итоги исследований: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1993. Вып. 23—24. С. 113—120.
84. Горбунова К. А., Дорофеев Е. П., Максимович Н. Г. и др. Исследование процесса растворения гипсо-ангидритов в условиях Кунгурской пещеры // Пещеры. Методика изучения: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1986. Вып. 20. С. 39—47.
85. Горбунова К. А., Дорофеев Е. П., Минькевич И. И. Натурные исследования растворимости гипса и ангидрита в Кунгурской пещере // Минералы и отложения пещер и их практическое значение: Тез. докл. Пермь, 1989. С. 53—54.
86. Горбунова К. А., Дорофеев Е. П., Минькевич И. И. Экспериментальное изучение растворимости сульфатных пород подземными водами в Кунгурской пещере // Пещеры. Итоги исследований: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1993. Вып. 23—24. С. 140—149.

87. Горбунова К. А., Дорофеев Е. П., Сычкина Г. А. Уровненный режим карстовых вод Кунгурской пещеры // Научные чтения. IV Всеуральское совещание по подземным водам Урала и сопредельных территорий: Тез. докл. Пермь, 1994. С. 116—117.
88. Горбунова К. А., Запрянов В. М., Дорофеев Е. П. Закономерности изменения дефицита насыщения карстовых вод сульфатом кальция в Кунгурской пещере // Эффективные методы инженерно-геологических исследований Урала: Тез. докл. Пермь, 1986. С. 67—69.
89. Горбунова К. А., Кропачев А. М. Геохимия пещер. Сообщ. 3. Геохимия стронция в карстовом ландшафте Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. Пермь, 1972. Вып. 12—13. С. 31—40.
90. Горбунова К. А., Кропачев А. М., Лунев В. Г. Геохимия пещер. Сообщ. 4. Геохимия марганца и титана в карстовом ландшафте Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. Пермь, 1974. Вып. 14—15. С. 28—31.
91. Горбунова К. А., Кунц Э. В., Гаврилова Н. С. и др. Изучение состава акцессорных элементов в отложениях Кунгурской пещеры // Пещеры. Пермь, 1970. Вып. 8—9. С. 205—207.
92. Горбунова К. А., Максимович Н. Г., Шлыков В. Г. Минералы инфлювия Кунгурской пещеры // Современные проблемы геологии Западного Урала: Тез. докл. Пермь, 1995. С. 139—140.
93. Горбунова К. А., Минькевич И. И. Изучение растворимости гипсо-ангидритовых пород в условиях Кунгурской пещеры // Методика изучения карста. Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. Пермь, 1985. С. 39—40.
94. Горбунова К. А., Молоштанова Н. Е., Максимович Н. Г., Экзогенное минералообразование в Кунгурской пещере // Моделирование геологических систем и процессов: Мат. рег. конф. Пермь, 1996. С. 263—265.
95. Горбунова К. А., Молоштанова Н. Е., Максимович Н. Г. и др. Геохимически измененные породы и вторичные минеральные образования Кунгурской пещеры // Кунгурская ледяная пещера. Пермь, 1995. Вып. 1. С. 26—58.
96. Горбунова К. А., Молоштанова Н. Е., Яцына И. И. Петрографо-минералогические исследования в Кунгурской пещере // Свет: Вестн. Киев, карстолого-спелеол. центра. Киев, 1994. № 1/3 (11/13). С. 18—19.
97. Горбунова К. А., Старков Н. П. К минералогии глин Кунгурской пещеры // Пещеры. Пермь, 1971. Вып. 10/11. С. 68—70.
98. Горбунова К. А., Сычкина Г. А., Блинов С. М. и др. Режим карстовых вод Кунгурской пещеры // Кунгурская ледяная пещера. Пермь, 1995. Вып. 1. С. 63—80.
99. Горбунова К. А., Яцына И. И. Гидрохимические исследования в Кунгурской ледяной пещере // Свет. Вест. Киев, карст.-спелеол. центра, 1993. № 4 (10). С. 34.
100. Горецкий Г. И. Аллювий великих антропогенных прарек Русской равнины // Прареки Камского бассейна. М.: Наука, 1964.
101. Горецкий Г. И. Формирование долины Волги в раннем и среднем антропогене. М.: Наука, 1966. 127 с.
102. ГОСТ 25100-95. Грунты. М.: Межгос. комис. по стандартизации, 1995. 29 с.
103. ГОСТ 20522-96. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: Межгос. комис. по стандартизации, 1996. 25 с.
104. Дмитриев В. Е. Оледенение пещер как часть гляциосферы земли // Карст Дальнего Востока и Сибири. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 130—145.
105. Долгих Л. А. Парижская гравюра из фондов Кунгурского музея (первый план пещеры Л. Ремезова) // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 55—58.

106. Дорофеев Е. П. Взаимосвязь подземных и поверхностных карстовых форм и учет ее при геологических изысканиях (на примере Кунгурской пещеры) // Тез. докл. к со- веш. по обобщению опыта научных исследований, изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений в районах распространения карста. Горький, 1965. С. 128—129.
107. Дорофеев Е. П. Новый план Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. Пермь, 1965. Вып. 5 (6). С. 110—113.
108. Дорофеев Е. П. Кальцитовые пленки и кристаллы гипса в Кунгурской пещере// Пещеры. Пермь, 1966. Вып. 6 (7). С. 39—48.
109. Дорофеев Е. П. Взаимосвязь подземных и поверхностных карстовых форм на примере Кунгурской пещеры // Проектирование, строительство и эксплуатация земельного полотна в карстовых районах: Тр. совещ. М.: Транспорт, 1968. С. 147—151.
110. Дорофеев Е. П. Подземные озера Кунгурской пещеры // Карст Урала и Приуралья: Мат-лы Всеурал. совещ. Пермь, 1968. С. 72—75.
111. Дорофеев Е. П. Ледяные кристаллы Кунгурской пещеры//Пещеры. Пермь, 1969. Вып. 7 (8). С. 30—38.
112. Дорофеев Е. П. Соотношение размеров провальных впадин и карстовых полостей в сульфатных породах // Вопросы карстоведения. Докл. собр. Ин-та карстов, и спелеологии, 1970. Вып. 2. С. 11—15.
113. Дорофеев Е. П. Связь водоемов Кунгурской пещеры с рекой Сылвой//Состояние и задачи карстово-спелеологических исследований: Тез. докл. Всес. совещ. М., 1975. С. 85—87.
114. Дорофеев Е. П. Изменение температурного режима Кунгурской пещеры в период ее эксплуатации и мероприятия по сохранению ледяных образований // Исследование карстовых пещер в целях использования их в качестве экскурсионных объектов. Тбилиси. Тез. докл. Всесоюз. совещ., 1978. С. 117—118.
115. Дорофеев Е. П. Провалы Ледяной горы//Карст и гидрогеология Предуралья. Свердловск, 1979. С. 49—53. (Тр. Ин-та геол. и геохим. УНЦ АН СССР. Вып. 140).
116. Дорофеев Е. П. Взаимосвязь температуры воздуха и горных пород в Кунгурской пещере // Аккумуляция зимнего холода в горных породах и его использование в народном хозяйстве: Тез. докл. Пермь, 1981. С. 55—56.
117. Дорофеев Е. П. Многолетняя мерзлота Кунгурской пещеры // Аккумуляция зимнего холода в горных породах и его использование в народном хозяйстве: Тез. докл. Пермь, 1981. С. 65—67.
118. Дорофеев Е. П. Карстовые брекчии Кунгурской пещеры//Проблемы изучения и использования неморских карбонатных отложений для химической мелиорации почв: Тез. докл. совещ. Пермь, 1982. С. 26—27.
119. Дорофеев Е. П. Обвалы в Кунгурской пещере и мероприятия по обеспечению безопасности экскурсий // Практическое использование пещер гипсового карста и их охрана в свете задач основных направлений народного хозяйства: Тез. докл. совещ. Пермь, 1987. С. 35—38.
120. Дорофеев Е. П. Эволюция оледенения Кунгурской пещеры//Пещеры. Пещеры в гипсах и ангидритах: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1988. Вып. 21. С. 36-41.
121. Дорофеев Е. П. Разновидности льда Кунгурской пещеры//Минералы и отложения пещер и их практическое значение: Тез. докл. Пермь, 1989. С. 23—25.
122. Дорофеев Е. П. Кристаллические новообразования в Кунгурской пещере//Минералы и отложения пещер и их практическое значение: Тез. докл. Пермь, 1989. С. 30—33.

123. Дорофеев Е. П. Многолетняя мерзлота и подземные льды Кунгурской пещеры // Проблемы геометеорологии и аккумуляции зимнего холода: Сб. науч. тр. Свердловск, 1990. С. 18—24.
124. Дорофеев Е. П. Взаимосвязь температуры воздуха, горных пород и подземных вод Кунгурской пещеры // Проблемы геометеорологии и аккумуляции зимнего холода. Свердловск, 1990. С. 29—34.
125. Дорофеев Е. П. Наледи Кунгурской пещеры // Проблемы наледеведения. Новосибирск: Ин-т геогр. СО АН СССР, 1991. С. 181—188.
126. Дорофеев Е. П., Андрейчук В. Н. // Кунгурская ледяная пещера: Библиограф. справочник. Кунгур, 1991. 43 с.
127. Дорофеев Е. П., Горбунова К. А., Спиридонова Н. В. Режим подземных озер Кунгурской пещеры // Научные чтения. IV Всеуральское совещ. по подземным водам Урала и сопредельных территорий: Тез. докл. Пермь, 1994. С. 117.
128. Дорофеев Е. П., Лукин В. С. О происхождении провалов в покровных грунтах над сульфатными породами // Инженерные изыскания в строительстве. М.: ПНИ-ИИС, 1968. Сер. 5, № 12. С. 12—14.
129. Дорофеев Е. П., Лукин В. С. // Кунгурская ледяная пещера. М.: Центр, рекл.-информ. бюро “Турист”, 1977. 16 с.
130. Дорофеев Е. П., Лукин В. С. Кунгурская ледяная пещера // Памятники природы Пермской области. Пермь, 1983. 68 с.
131. Дорофеев Е. П., Лукин В. С. Кунгурская ледяная пещера: Атлас-путеводитель. Пермь, 1975. 67 с.
132. Дорофеев Е. П., Лукин В. С. Кунгурская ледяная пещера: Путеводитель-атлас. Пермь, 1970. 95 с.
133. Дорофеев Е. П., Мавлюдов Б. Р. Динамика оледенения Кунгурской пещеры // Пещеры. Итоги исследований: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1993. Вып. 23—24. С. 131—140.
134. Дублянская Г. Н., Дублянский В. Н. Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. Новосибирск: Наука, 144 с.
135. Дублянская Г. Н., Дублянский В. Н. Генезис и история развития Кунгурской пещеры // Изв. РГО, 1992. Т. 124, вып. 4. С. 347—350.
136. Дублянский В. Н. Карстовые пещеры и шахты Горного Крыма. Л.: Наука, 1977. 180 с.
137. Дублянский В. Н. Кадастр карстовых полостей как составная часть цифрового территориального кадастра // Инженерно-геологическое обеспечение недропользования и охрана окружающей среды. Пермь, 1997. С. 119—123.
138. Дублянский В. Н. Кунгурская ледяная пещера среди гипсовых пещер России и мира // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 51—54.
139. Дублянский В. Н., Андрейчук В. Н., Берсенев Ю.И. и др. Химический состав льдов карстовых полостей СССР // Инженерная геология, 1992. № 5. С. 119—123.
140. Дублянский В. Н., Вахрушев Б. А., Амеличев Г. Н. и др. Красная пещера. Опыт комплексных карстологических исследований. М.: Изд-во РУДН, 2002. 190 с.
141. Дублянский В. Н., Дорофеев Е. П., Бородаева Л. А. Гидрохимия Кунгурской ледяной пещеры. Симфероп. гос. ун-т. Киев, 1984. № 603 Ук-84. 35 с. в Рукопись деп. в УкрНИИНТИ.
142. Дублянский В. Н., Дублянская Г. Н., Лавров И. А. Классификация, использование и охрана подземных пространств. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 194 с.

143. Дублянский В. Н., Кадебская О. И. 300 лет исследований Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Межвуз. сб. науч. тр. Кунгур, 2003. С. 12—40.
144. Дублянский В. Н., Кадебская О. И. По Кунгурской ледяной пещере. Пермь, 2004. 91 с.
145. Дублянский В. Н., Кадебский Ю. В., Кетова Е. В. Морфология Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 2004. С. 19—21.
146. Дублянский В. Н., Кикнадзе Т. З. Гидрогеология карста Альпийской складчатой области юга СССР. М.: Наука, 1984. 127 с.
147. Дублянский В. Н., Смольников Б. М. Карстолого-геофизические исследования карстовых полостей Приднестровской Подолии и Покутья. Киев: Наук. думка, 1969. 151 с.
148. Дуров С. А. К вопросу о происхождении солевого состава карстовых вод // Укр. хи-мич. журн. Киев, 1956. Т. XXII, вып. 1. С. 106—111.
149. Дуров С. А. Геометрический метод в гидрохимии. Ростов-на-Дону: Ростовское кн. изд-во, 1959. 193 с.
150. Дымков Ю. М. Одновременный совместный рост кристаллов и сферолитов // Тр. Минерал. музея АН СССР, 1957. Вып. 8. С. 31—39.
151. Ежов Ю. А., Дорофеев Е. П. Кунгурская ледяная пещера — подземный полигон для исследования гидрогеологических процессов // Использование пещер: Тез. докл. Пермь, 1979. С. 46—47.
152. Ежов Ю. А., Дорофеев Е. П., Лукин В. С. Наводнения в районе города Кунгура (их причины, динамика, прогнозирование и меры борьбы с ними). Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 48 с.
153. Ежов Ю. А., Лукин В. С. Новые данные о химическом режиме карстовых вод Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. Пермь, 1976. Вып. 16. С. 35—40.
154. Ежов Ю. А., Шерстобитов В. А. Влияние приливной пульсации трещин на фильтрацию карстовых вод в зоне аэрации // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1978. Вып. 17. С. 70—78.
155. Ежов Ю. А., Шерстобитов В. А. Дистанционные наблюдения за режимом карстовых вод // Методика изучения карста: Тез. докл. Пермь, 1985. С. 77—79.
156. Ёлтышева Л. Ю. “Пещера Ивана Суворова” // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 58—62.
157. Жизнь животных. Т. 2 (Моллюски. Иглокожие. Погонофоры. Щетинкочелюстные. Полухордовые. Хордовые. Членистоногие. Ракообразные). М.: Просвещение, 1988. 428 с.
158. Жуков Ю. А., Михайлов Г. К., Ваганов А. А. О связи геотермических условий палеозойских отложений пермского Прикамья со строением кристаллического фундамента // Проблемы геометеорологии и аккумуляции зимнего холода: Сб. науч. тр. Свердловск, 1990. С. 72—76.
159. Зверев В. П. Роль подземных вод в миграции химических элементов. М.: Недра, 1982. 184 с.
160. Зилинг Д. Г. Погребенные речные долины европейской части РСФСР и их инженерно-геологическое значение // Инженерная геология, 1988. № 6. С. 14—25.
161. Зуев-Ордынец М. Кунгурская ледяная пещера // Всемирный турист. М., 1928. № 5. С. 17—19.
162. Иванов А. Н. Исследование карстовых явлений в России в первой половине XVIII века // Учен. зап. Ярослав. пед. ин-та, 1958. Вып. 20 (XXX). Ч. 2. С. 167—195.
163. Инженерная геология СССР. Платформенные регионы европейской части СССР. М.: Недра, 1992. Кн. 2. 357 с.

164. История геологического развития Русской платформы и ее обрамления / Под ред. А. П. Виноградова. М., 1964. 140 с.
165. Каве ев М. С. Общие закономерности развития карстовых явлений в центральной части Волго-Камского бассейна // Изв. Казанского фил. АН СССР, 1959. № 7. С. 27—34.
166. Кадебская О. И. Изменение микроклимата и загрязнение карстовых вод в Кунгурской ледяной пещере // Проблемы комплексного мониторинга на месторождениях полезных ископаемых: Сб. докл. Пермь, 2002. С. 219—222.
167. Кадебская О. И., Лаврова Н. В. История Кунгурского стационара в документах // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 104—112.
168. Кадебский Ю. В. Международная пещерная выставка в Самчхоке. Корея, 2002// Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности. Кунгур, 2003. С. 293—296.
169. Кадебский Ю. В., Назарова У. В. Морфометрические характеристики Кунгурской пещеры // Проблемы комплексного мониторинга на месторождениях полезных ископаемых: Сб. докл. Пермь, 2002. С. 222—226.
170. Калугина Н. С. Насекомые в водных экосистемах прошлого//Историческое развитие класса насекомых. М.: Наука, 1980. 157 с.
171. Каптерев П. Н. О некоторых пещерах Пермской и Казанской губерний//Землеведение, 1913. Т. 20, кн. I—II. С. 169—175.
172. Каракаш Н. И. Кунгурская ледяная пещера на Урале//Тр. Императ. Санкт-Петербург. о-ва естествоиспыт., 1905. Т. XXXVI, № 1. С. 11—16.
173. Кари ев Р. В., Шувалов В. М. Кунгурская ледяная пещера — природный полигон для геофизических исследований // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 156—163.
174. Карта общего сейсмического районирования ОСР-97-С. М., 1998.
175. Карякин И. В. Летучие мыши в пещерах Урала // Изучение уральских пещер: Докл. конф. Пермь, 1992. С.16—19.
176. Катаев В. Н. Структурно-тектонические условия формирования Кунгурской пещеры // Пещеры. Итоги исследований: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1993. Вып. 23—24. С. 121—130.
177. Катаев В. Н. Геологическое строение и типы дислокаций пещерного массива // Кунгурская ледяная пещера. Пермь, 1995. Вып. 1. С. 8—26.
178. Катаев В. Н. Теория и методология структурно-тектонического анализа в карсто- ведении: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Пермь, 1999. 38 с.
179. Катаев В. Н. Особенности геологического строения массива Ледяная гора//Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 70—76.
180. Кац Я. Г., Тевелев А. В., Полетаев А. И. Основы космической геологии. М.: Общее образование, 1988. 234 с.
181. Каштанов С. Г. К истории формирования долин рек Волги и Камы в дочетвертич- ное время // Учен. зап. Казан, ун-та, 1952. Т. 112, кн. 2. С. 89—94.
182. Квасов Д. Д. Причины плиоценовых и четвертичных трангрессий Каспийского и Черного морей // Палеогеография и отложения плейстоцена южных морей СССР. М.: Наука, 1977. С. 74—89.
183. Килин Ю. А., Минькевич И. И. Охрана Кунгурской ледяной пещеры в связи с техногенным воздействием // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. 186—163.

184. Киттары М. Я. Ледяная пещера в окрестностях Кунгура//Учен. зап. Казан, ун-та, 1848.
185. Кирюхин В. А., Коротков А. И., Шварцев С. Л. Гидрогеохимия. М.: Недра, 1993. 384 с.
186. К л и г е Р. К., Данилов И. Д., Конищев В. Н. История гидросферы. М.: Научный мир, 1998. 366 с.
187. Клим а с Л. И. Определение дефицита насыщения подземных вод сульфатом кальция // Докл. БССР. Минск, 1975. Т. 19, № 1. С. 37—42.'
188. Климат Пермской области / А. С. Шкляев, В. А. Балков. Пермь, 1963. 125 с.
189. Климчук А. Б. Основные особенности и проблемы гидрогеологии карста: спелео- генетический подход // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 2001. С. 28—50.
190. Кобранова В. Н., Лепарская Н. Д. Определение физических свойств горных пород. М.: Гостопотехизат, 1957. 160 с.
191. Ковалевский В. С. Многолетние колебания уровней подземных вод и подземного стока. М.: Наука, 1976. 269 с.
192. Комаров И. С. Накопление и обработка информации при инженерно-геологических расчетах. М.: Недра, 1972. 295 с.
193. Корейша М. М. Схема матричной классификации природных льдов//Материалы гляциологических исследований. М., 1984. Вып. 51. С. 48—54.
194. Косвинцев Е. Н. Кунгурская ледяная пещера // Мат-лы по изучению Камского Приуралья. Пермь, 1928. Вып. 1. С. 37—38.
195. Костарев В. П. К характеристике Уральского карста//Инженерная геология карста: Докл. межд. симп. Пермь, 1993. Т. 2. С. 102—107.
196. Костарев В. П., Усольцев Л. Н. Карстовые землетрясения Урала и Приуралья // Вопросы карстоведения: Долк. собр. Ин-та карст, и спелеологии. Вып. 1. Пермь, С. 91—94.
197. Крайнер Н. П. Ломоносов и учение о карсте//Геоморфология, 1991. № 4. С. 99-105.
198. Краснов И. И. Четвертичные отложения Пермской и Свердловской областей // Геология СССР. Урал. М., 1944. Т. 12, ч. 1. С. 127—134.
199. Краснова Н. И., Петров Т. Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб: Невский курьер, 1997. С. 17—19.
200. Краткий справочник химика. М.: Госхимиздат, 1954. 559 с.
201. Крубер А. А. Карстовая область Горного Крыма. М., 1915. 319 с.
202. Кунгурская ледяная пещера: Фотоальбом. Пермь, 1995. Вып. 1. 114 с.
203. Кунгурская ледяная пещера: Фотоальбом. Андрейчук В. Н., Бобров А. Б., Вейсман Л. П., Дорофеев Е. П. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1990. 303 с.
204. Кунгурская пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы Междун. научно-практ. конф. Кунгур, 2003. 353 с.
205. Курочкин В. Ю. Пермская активизация флюидогидротермального процесса в среднем Предуралье. Автореф. дисс. ... канд. геол-мин. наук. Пермь, 1990. 16 с.
206. Лавров И. А., Чугаева А. А. Электронная карта Кунгурской Ледяной пещеры // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 2001. С. 73—75.
207. Лаврова Н. В. Карстовая брекчия Кунгурской Ледяной пещеры // Кунгурская Ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности. Кунгур, 2003. С. 78—80.
208. Левицкая А. Я. Землетрясения Урала // Землетрясения в СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 128 с.
209. Ледомский Г. И. В подземном городе. Кунгурская ледяная пещера // Сов. краеведение, 1936. № 8. С. 91.

210. Ледомский Г. И. Подземный город//Горы и люди. Свердловск, 1939. С. 106—116.
211. Ледомский И. В. Путешествие по Ледяной пещере на Урале. М.: Изд. Всерос. о-ва охраны природы, 1937. 80 с.
212. Лепехин И. И. Дневные записки о путешествии Ивана Лепехина академика ... по разным провинциям Российского государства. СПб., 1812. Ч. 2.
213. Лепехин И. И. Дневные записки путешествия по разным провинциям Российского государства. Ч. 3 // Полное собрание ученых путешествий по России. Т. IV. СПб.: Изд. АН, 1822.
214. Лехов А. В., Лебедев А. Л. Экспериментальное исследование скорости растворения гипса. Рукопись деп в. ВИНТИ 10.06.1983, № 3243-83. 8 с.
215. Лидер В. А. Геология четвертичных отложений и геоморфология//Геологическая изученность СССР. Т. 14. Средний Урал. Период 1951—1955. Вып. 1. Опубликованные работы. М.: Наука, 1965. С. 20—23.
216. Ли си н а-Ку л и к Е. С., Барсукова Л. Д. Микофлора почв, воды подземных озер и льда разных типов Кунгурской ледяной пещеры // Микология и фитопатология. Л. 1967. Т. 1. С. 140—146.
217. Лосев. Описание Кунгурской пещеры зрителя Кунгурского народного училища Суворова // Казанские известия. Казань, 1816. № 19.
218. Лукин В. С. Особенности стока подземных вод Кунгурского района//Тез. докл. На науч. совещ. по изучению карста. М.: АН СССР, 1956. Вып. 8. С. 6—8.
219. Лукин В. С. Наблюдения над воздушным режимом закарстованных массивов на примере Кунгурской ледяной пещеры // Тр. Ин-та геологии У ФАН СССР. Свердловск, Вып. 62. С. 107—119.
220. Лукин В. С. Воздушный режим закарстованных массивов // Специальные вопросы карстологии. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 58—59.
221. Лукин В. С. Работы по восстановлению природного режима Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры. Пермь, 1963. Вып. 3. С. 35—42.
222. Лукин В. С. Мечкинские пещеры // Пещеры. Пермь, 1964. Вып. 4 (5). С. 133—160.
223. Лукин В. С. Температурные аномалии в пещерах Предуралья и критический анализ теорий подземного холода // Пещеры. Пермь, 1965. Вып. 5 (6). С. 164—172.
224. Лукин В. С. О происхождении наклонных площадок и цоколей внутри карстовых полостей // Землеведение. М.: МГУ, 1967. Т. 7 (47). С. 212—214.
225. Лукин В. С. Условия и этапы формирования Кунгурской пещеры//Карст Урала и Приуралья: Мат-лы Всеурал. совещ. Пермь, 1968. С. 39—42.
226. Лукин В. С. Количественное выражение процессов испарения воды и конденсации водяных паров в гипсоангидритовых массивах Уфимского плато // Землеведение. М.: МГУ, 1969. Т. 8 (48). С. 213—218.
227. Лукин В. С. Об охране Кунгурской ледяной пещеры // Беречь природу Прикамья. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1971. Вып. 2. С. 84—87.
228. Лукин В. С. Микросейсмичность в условиях строительства в карстовых областях Предуралья // Карст и гидрогеология Приуралья. Уфа; 1979. С. 59—72. (Тр. Ин-та геол. и геохим. УНЦ АН СССР. Вып. 140).
229. Лукин В. С. Естественная очистка атмосферного воздуха в зоне аэрации закарстованных массивов // Карст Нечерноземья: Тез. докл. Пермь, 1980. С. 144—145.
230. Лукин В. С., Дорофеев Е. П. Охрана Кунгурской пещеры в условиях массового туризма // Проблемы выявления, исследования и сохранения памятников природы: Тез. докл. Воронеж, 1983. С. 47—54.

231. Лукин В. С., Дорофеев Е. П. Новый тоннельный вход в Кунгурскую ледяную пещеру // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1984. Вып. 19. С. 121—122.
232. Лукин В. С., Дорофеев Е. П. Поиски, съемка и работы по благоустройству в Кунгурской пещере // Пещеры. Итоги исследований: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1993. Вып. 23—24. С. 156—164.
233. Лукин В. С., Ежов Ю. А. Карст и строительство в районе г. Кунгура. Пермь. Перм. кн. изд-во, 1975. 118 с.
234. Лукин В. С., Рыжиков Д. В., Турышев А. В. Кунгурская ледяная пещера. Свердловск: Свердл. кн. изд-во, 1955. 48 с.
235. Лукин В. С., Рыжиков Д. В., Турышев А. В. Кунгурская ледяная пещера. Свердловск: Свердл. кн. изд-во, 1961. 47 с.
236. Лукин В. С., Рыжиков Д. В., Турышев А. В. Кунгурская ледяная пещера. Свердловск: УФАН СССР, 1965. 44 с.
237. Лукин В. С., Рыжиков Д. В., Турышев А. В. Кунгурская ледяная пещера. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1968. 72 с.
238. Лунгерсгаузен Г. Ф. Инфлювий — особый генетический тип материковых образований // Докл. АН СССР, 1966. Т. 171. С. 135—142.
239. Лялицкая С. Д. Пещеры Урала // Природа, 1937. № 9. С. 124—128
240. Лялицкая С. Д. Кунгурская ледяная пещера // Природа, 1953. № 5. С. 82—87.
241. Ляхницкий Ю. С. Вопросы терминологии и классификации карстовых явлений // Проблемы изучения, экологии и охраны пещер. Киев, 1987. С. 20—21.
242. Мавлюдов Б. Р. Закономерности распространения пещер со льдом // Материалы гляциологических исследований. М., 1985. № 54. С. 193—200.
243. Мавлюдов Б. Р. Оледенение пещер Урала // Материалы гляциологических исследований. М., 1988. Вып. 61.
244. Мавлюдов Б. Р. Оледенение пещер Советского Союза: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1989. 23 с.
245. Мавлюдов Б. Р. Снежно-ледяные образования пещер — показатель современных природных условий горного региона // Материалы гляциологических исследований. М., Вып. 76. С. 53—60.
246. Мавлюдов Б. Р. Классификация снежно-ледяных образований пещер // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 2001. С. 22—27.
247. Мавлюдов Б. Р. Интенсивность испарения льда в подземных полостях // Северный спелеоальманах. Архангельск, 2001. Рис. 19—22.
248. Мавлюдов Б. Р. О сублимационных льдах в пещерах // Северный спелеоальманах. Архангельск, 2001. Рис. 30—38.
249. Мавлюдов Б. Р., Кадебская О. И. Об изучении температурного режима в пещерах и о необходимой точности измерений (на примере Кунгурской ледяной пещеры) // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности. Кунгур, 2003. С. 140—148.
250. Мавлюдов Б. Р., Кадебская О. И. О деградации оледенения в Кунгурской ледяной пещере и возможных путях его восстановления // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 148
251. Маклашин А. В. Эксперименты по растворимости гипсоангидритов // Проблемы гидрогеологии и карста: Тез. докл. Пермь, 1984. С. 74—75.
252. Маклашин А. В. Геологические условия растворения сульфатных пород: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Пермь, 1987. 16 с. „ „
253. Маклашин А. В. Геологическое строение выходного тоннеля Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 76—80.

254. Максимович Г. А. К характеристике сейсмических процессов в Пермской области // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва, 1943. Т. 75, вып. 4. С. 8—15.
255. Максимович Г. А. Классификация льдов пещер // Изв. АН СССР, 1945. Т. 9, № 3—6. С. 565—570.
256. Максимович Г. А. Краткая инструкция по изучению пещерного льда и ледяных пещер. Молотов, 1946. 10 с.
257. Максимович Г. А. Кунгурская ледяная пещера // Тез. докл. Молотов, карстовой конф. Молотов, 1946. 3 с.
258. Максимович Г. А. Кунгурская ледяная пещера // Тез. докл. карстово-спелеологической конф. ЕНИ и МГУ. Молотов, 1947. 3 с.
259. Максимович Г. А. Пещерные льды // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва, 1947. Т. 79, вып. 5. С. 537—543.
260. Максимович Г. А. Основы карстоведения. Пермь, 1963. Т. 1. 444 с.
261. Максимович Г. А. Инструкция по изучению пещерного льда и ледяных пещер // Методика изучения пещер: Тр. Всесоюз. совещ. Пермь, 1963. С. 27—35.
262. Максимович Г. А. О химическом составе вод подземных карстовых озер СССР // Химическая география и гидрогеохимия: Тр. совещ. Пермь, 1963. Вып. 2 (3). С. 113—117.
263. Максимович Г. А. Землетрясения в Прикамье // Учен. зап. Пермского ун-та, 1964. Т. 118. С. 133—140.
264. Максимович Г. А. Некоторые вопросы морфометрии карстовых полостей // Вопросы карстоведения: Мат-лы совещ. Пермь, 1969. С. 137—143.
265. Максимович Г. А. Кальцитовые пленки водоемов пещер гипсового и карбонатного карста // Пещеры. Пермь, 1972. Вып. 12—13. С. 27—31.
266. Максимович Г. А. Подземные лаборатории // Пещеры. Пермь, 1972. Вып. 12—13. С. 186—190.
267. Максимович Г. А. Карры и карровые камни карстовых полостей в гипсе // Пещеры. Пермь, 1976. Вып. 16. С. 41—45.
268. Максимович Г. А. Использование природных и искусственных пещер // Гидрогеология и карстоведение. Карст и пещеры СССР: Межвед. сб. науч. тр. Пермь, 1977. Вып. 8. С. 108—116.
269. Максимович Г. А., Горбунова К. А. Карст Пермской области. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1958. 183 с.
270. Максимович Г. А., Кобяк Г. Г. К характеристике вод подземных озер // Докл. АН СССР, 1941. Т. 31, № 1. С. 26—28.
271. Максимович Г. А., Кобяк Г. Г. Характеристика льда Кунгурской ледяной пещеры // Докл. АН СССР, 1941. Т. 31, № 5. С. 478—481.
272. Максимович Г. А., Максимович Н. А. Ледяная пещера. Свердловск: СвердлГИЗ, 1937. 52 с.
273. Максимович Г. А., Панарина Г. Н. Химический состав льда пещер Пермской области // Химическая география и гидрогеохимия. Пермь, 1966. Вып. 6 (7). С. 33—37.
274. Максимович Г. А., Хорошавин Н. Г. Использование пещер для лечения (спелеотерапия) // Вопросы теории и практики курортной терапии. Пермь, 1967. С. 193—195. (Учен. зап. Перм. мед. ин-та. Т. 75).
275. Максимович Г. А., Шумков В. М. Химический состав пещерного льда // Химическая география и гидрогеохимия. Пермь, 1964. Вып. 3 (4). С. 43—46.
276. Максимович Г. А., Яценко Р. В. Химический состав льда озер (и прудов) // Химическая география и гидрогеохимия: (Тр. Третьего совещ. по химической географии и гидрогеохимии). Пермь, 1963. Вып. 2(3). С. 7—18.

277. Максимович Г. А., Яценко Р. В. Генетическая классификация карстовых озер Пермской области // Мат-лы Восьмого всеуральского совещ. по вопросам географии, охраны природы и природопользования. Геоморфология, геология. УФА, 1973. С. 103—107.
278. Максимович Н. Г., Молоштанова Н. Е., Назарова У. В. и др. Новообразования мирабилита-тенардита в Кунгурской ледяной пещере // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Мат-лы конф. Пермь, 1999. С. 47—48.
279. Малков В. Н., Франц Н. А. К вопросу о зимней конденсации//Аккумуляция зимнего холода в горных породах и его использование в народном хозяйстве: Тез. докл. конф. Пермь, 1981. С. 97—99.
280. Маловичко А. А., Бутырин П. Г., Маловичко Д. А. и др. Характеристика микросейсмических шумов в Кунгурской ледяной пещере // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 163—167.
281. Мальцева О. А. Химический состав капли в Кунгурской пещере//Научные достижения студентов на рубеже веков: Мат-лы научн.-практ. конф. Пермь, 2001. С. 40—43.
282. Маруашвили Л. И. Палеогеографический словарь. М.: Мысль, 1985. 366 с.
283. Матвеев Б. К. Методика геофизического изучения карстовых полостей на примере работ в районе Кунгурской ледяной пещеры // Методика изучения карста. Вып. 5. Геофизические методы: Тр. Всесоюз. совещ. Пермь, 1963. С. 3—24.
284. Матвеев Б. К. Геофизические методы изучения карстовых полостей//Инженерная геология карста: Докл. междунар. симп. Пермь, 1993. Т. 1. С. 183—188.
285. Матвеев Б. К. Геофизическая разведка карста//Вест. ПГУ. Пермь, 1994. Вып. 3. С. 74—81.
286. Матвеев Б. К., Лавров И. А., Семенов В. В. Результаты геофизических исследований Кунгурской ледяной пещеры // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Мат-лы регион, науч.-практ. конф. Пермь, 2000. С. 254—256.
287. Матвеев Б. К., Савелов Р. П., Горбунова К. А. и др. Физико-геологические модели карстовых образований // Построение физико-геологической модели и системный подход при истолковании результатов геофизических исследований: Тез. докл. науч.-техн. конф. Пермь, 1993. С. 9.
288. Мейен С. В. Основы палеоботаники. М.: Недра, 1987. 186 с.
289. Меллер В. Сообщение о Кунгурской ледяной пещере // Протокол годовичного заседания Имп. минералог, о-ва, 1987. № 1.
290. Методическое руководство по систематизации и специальной обработке материалов наблюдений за режимом уровня грунтовых вод для решения прогнозных задач. Днепропетровск: ДО ИМР, 1982. 39 с.
291. Мещеряков Ю. А. Полигснетические поверхности выравнивания юго-востока Русской равнины и их значение для анализа неотектоники // Геоморфология и новейшая тектоника Волго-Уральской области. Уфа, 1960. С. 23—40.
292. Мизенс Г. А. Верхнепалеозойский флиш Западного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 230 с.
293. Милановский Е. Е. Геология СССР. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1987. 416 с.
294. Минералогическая энциклопедия / Ред. К. Фрей. Л.: Недра, 1985. 511 с.
295. Минькевич И. И., Грудневский А. Г. Исследования растворимости гипсоангидритов в условиях Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 86—95.
296. Миртова А. В. Неоген в долине р. Камы // Сов. геология, 1941. № 11. С. 27—35.

297. Мирчинк Г. Ф. Четвертичная история долины р. Волга выше Мологи//Тр. Комиссии по изучению четвертичного периода. М., 1935. Т. 4, вып. 2.
298. Михайлов Г. К. Эволюция водоносных горизонтов в процессе неотектонических поднятий // Гидрогеология и карстование. Пермь, 2002. Вып. 14. С. 95—101.
299. Молоштанова Н. Е. Минералого-петрографические исследования отложений Кунгурской ледяной пещеры // Научные чтения. IV Всеуральское совещ. по подземным водам Урала и сопредельных территорий: Тез. докл. Пермь, 1994. С. 118—119.
300. Молоштанова Н. Е. Спелеотемы Кунгурской ледяной пещеры//Геология Западного Урала на пороге XXI века: Мат-лы регион, науч. конф. Пермь, 1999. С. 282—283.
301. Молоштанова Н. Е., Горбунова К. А., Яцына И. И. Петрографо-минералогические исследования в Кунгурской пещере // Свет: Вестн. Киев, карстолого-спелеол. центра. Киев, 1994. № 1—3 (11—13). С. 18—19.
302. Молоштанова Н. Е., Максимович Н. Г., Шлыков В. Г. Трансформация минералов глин в отложениях Кунгурской ледяной пещеры // Вестн. Пермского ун-та, 1999. Вып. 3. С. 232—237.
303. Молоштанова Н. Е., Молоштанова Н. Е., Назарова У. В. Минеральный состав отложений Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 2001. С. 108—115.
304. Молоштанова Н. Е., Назарова У. В., Болонкина А. Ю. Виды и формы нахождения минералов в отложениях Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 98—99.
305. Молоштанова Н. Е., Шлыков В. Г., Максимович Н. Г. Новообразование целестина в ледяной пещере // Кунгурская ледяная пещера / Перм. ун-т. Пермь, 1995. Вып. 1. С. 59—63.
306. Молоштанова Н. Е., Шлыков В. Г., Яцына И. И. Минералы глин в отложениях Кунгурской ледяной пещеры // Современные проблемы геологии Западного Урала: Тез. докл. Пермь, 1995. С. 141.
307. Назаров Н. Н. Физико-географическое районирование Пермского Прикамья // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала. Пермь, 1988. С. 12—21.
308. Назаров Н. Н. Карст Прикамья. Пермь: Изд-во ПГУ, 1996. С. 98—99.
309. Назарова У. В. Спелеотемы Кунгурской Ледяной пещеры // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Мат-лы конф. Пермь, 2002. С. 214—218.
310. Наливкин Д. В. Учение о фациях. М.; Л: Изд-во АН СССР, 1956. Т. 2. 392 с.
311. ЗП.Наумкин Д. В. Современное состояние исследований троглобионтов Кунгурской ледяной пещеры // Проблемы экологии и охраны пещер: Тез. докл. Красноярск. 2002. С. 13—19.
312. Наумкин Д. В. Именитые гости Кунгурской ледяной пещеры: след в веках // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 132—140.
313. Наумкин Д. В., Демидова М. И. Зимовка летучих мышей в пещере Новая Подкаменная // Кунгурская Ледяная пещера. Пермь, 1995. Вып. 1. С. 103—107.
314. Наумова О. Б. Четвертичный аллювий перигляциальной зоны Прикамья: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. Пермь, 2002. 36 с.
315. Нечаев А. П. В царстве воды и ветра. СПб.: Изд. А. Ф. Девриена, 1913.
316. Нечаев А. П. В царстве воды и ветра. Л., 1924.
317. Нечаев А. П. Работа подземной воды. Л.: Учпедгиз, 1939. С. 36—44.
318. Николаев Н. И. Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 392 с.

319. Новоселицкий В. М., Проворов В. М., Шилова А. А. Физические свойства пород осадочного чехла севера Урало-Поволжья. Свердловск, 1985. 132 с.
320. Обедиентова Г. В. Доакчагыльское русло Волги // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1956. № 6. С. 97—100.
321. Оболенский В. Н. Курс метеорологии для высших учебных заведений. М.; Свердловск, 1944. 684 с.
322. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 124 с.
323. Огильви А. А., Матвеев Б. К., Шкабарня Н. Г. Электрическая разведка Кунгурской карстовой пещеры // Вестн. Моск. ун-та. Сер. геол., 1963. № 3. С. 71—77.
324. Ожгибесов В. П. Правила образования индексов общих, региональных и местных стратиграфических подразделений (предложения для региональных унифицированных схем и стратиграфического кодекса России). Перм. ун-т. Пермь, 2000. 20 с. — Рукопись деп. в ВИНТИ РАН 11.06.00. № 2221-В00.
325. Ожгибесов В. П. Геология “Предуралья” // Вестн. Пермского ун-та, 2000. № 3. С. 70—112.
326. Ожгибесов В. П., Софроницкий П. А. Район города Кунгура // Международный конгресс “Пермская система земного шара”: Путеводитель. Ч. 3. Свердловск: УрО АН СССР, 1991. С. 54—59.
327. Основы гидрогеологии. Гидродинамика / Гавич И. К., Ковалевский В. С., Язвин Л. С. и др. Новосибирск, 1983. 237 с.
328. Особо охраняемые природные территории Пермской области. Реестр / Отв. ред. С. А. Овеснов. Пермь: Книжный мир, 2002. 463 с.
329. Осовецкий Б. А. К проблеме изучения эволюции минерального состава кайнозойских отложений территории Прикамья // Вестн. Пермского ун-та, 1999. Вып. 3. С. 36—54.
330. Отрешко А. И. Особенности карста междуречья притоков Солка и Самары / Изв. ВГО, 1962. Т. 94, вып. 4. С. 120—127.
331. Палеогеография и отложения плейстоцена южных морей СССР. М.: Наука, 1977. 188 с.
332. Панарина Г. Н. Пещеры сульфатного и карбонатного карста Пермской области: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Пермь, 1973. 21 с.
333. Паньков Н. Н. Зообентос текучих вод Прикамья. Пермь: Гармония, 2000. 192 с.
334. Паньков Н. Н., Крайнев Е. Ю. Беспозвоночные животные Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 183—186.
335. Паньков Н. Н., Крайнев Е. Ю. Беспозвоночные животные — обитатели Кунгурской пещеры // Пещеры. Пермь, 2004. С. 133—141.
336. Паньков Н. Н., Панькова Н. В. К биологии троглобионтного бокоплава *Crangonyx chlebnikovi borutzky*, 1928 (Gammaridae) с описанием нового подвида из Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 2004. С. 141—150.
337. Пашенко С. Э., Андрейчук В. Н., Дублянский Ю. В. Аэрозоли в Кунгурской пещере // Пещеры. Итоги исследований: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1993. Вып. 23—24. С. 149—156.
338. Пашенко С. Э., Дублянский Ю. В., Андрейчук В. Н. и др. Измерение фильтрующе-аэрозольных характеристик Кунгурской пещеры // Актуальные вопросы физики аэрозольных систем. Одесса, 1989. С. 118.
339. Пашенко С. Э., Сабельфельд К. К. Атмосферный и техногенный аэрозоль (кинетические, электронно-зондовые и численные методы исследований). Новосибирск, 1992. 118 с.

340. Петрянов-Соколов И. В., Сутугин А. Г. Аэрозоли. М.: Наука, 1989. 120 с.
341. Печеркин А. И. Связь крупных пещерных систем сульфатного карста с распределением тектонической трещиноватости // Пещеры. Методика изучения: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1986. Вып. 20. С. 48—57.
342. Печеркин А. И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск: Изд-во Иркутск, унта, 1986. 172 с.
343. Печеркин А. И. Связь между размерами карстовых полостей и трещиноватостью // Проблемы изучения, экологии и охраны пещер: Тез. докл. Киев, 1987. С. 21—22.
344. Печеркин А. И., Катаев В. Н., Маклашин А. В. и др. Распределение гипса и ангидрита на участке штольни, вскрывающей грот Вышка // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1984. С. 66—69.
345. Печеркин И. А. Геодинамика побережий камских водохранилищ. Пермь, Перм. кн. из-во, 1966. Т. 1.
346. Пещеры Урала и Приуралья / Лавров И. А., Андрейчук В. Н. Пермь, 1992. 78 с.
347. Пику лева Ж. Л., Назарова У. В. Кальцитовые пленки Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 100—104.
348. Подземный лед. М.: Изд-во МГУ, 1965. 30 с.
349. Полевой В. С. Комплексное применение методов электроразведки и сейсморазведки для поиска и изучения закарстованных зон // Совещание по вопросам организации геофизических работ в карстовых районах Горного Крыма. Симферополь: АН УССР, 1960. С. 35—38.
350. Полевой В. С. Некоторые результаты опытных электроразведочных исследований в районе Кунгурской ледяной пещеры // Бюлл. МОИП. Отд. геол., 1977. Вып. 4. С. 145.
351. Поляков И. С. Антропологические поездки в Центральную и Восточную Россию // Зап. Антропологического об-ва. СПб., 1880. Приложение к т. 37. 12 с.
352. Поносов В. А., Ибламинов Р. Г., Лавров И. А. Проблема радона в Кунгурской ледяной пещере // Применение геофизических методов при решении геологических, инженерно-геологических и экологических задач. Пермь, 1994. С. 66—67.
353. Поносов В. А., Катаев В. Н. О повышенном радиационном фоне в Кунгурской пещере // Свет: Вестн. Киев, карстолого-спелеол. центра. Киев, 1992. № 4 (6). С. 36.
354. Поносов В. А., Степанов Ю. И. Экологические аспекты радиоактивности Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности. Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 180—183.
355. Попов В. Г. Формирование подземных вод Северо-Западной Башкирии. М.: Наука, 1976. 132 с.
356. Проблемы изучения карстовых полостей гор южных областей СССР. Ташкент: ФАН, 1983. 150 с.
357. Протопопов А. П. Кунгурская ледяная пещера // Заповедники СССР. Т. II. М.: Географгиз, 1951. С. 53—61.
358. Психрометрические таблицы / Д. П. Беспалов, В. Н. Козлов, Л. Т. Матвеев. Л.: Гидро- метеоиздат, 1972. 234 с.
359. Пунин Ю. О., Штукенберг А. Г. Деформационно-ростовой механизм двойникования сульфата калия // Рост кристаллов. Калинин, 1991. С. 42—49.
360. Пятунин М. С. Структура банка данных Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 63—65.
361. Рапп В. Путеводитель по Кунгuru и Ледяной пещере. Пермь, 1999. 190 с.

362. Рауш В. Кунгурская ледяная пещера // Край родной — земля уральская. Свердловск, 1967. С. 20—23.
363. Римский-Корсаков М. Н. Вилохвости, или ногохвости (Collembola) // Жизнь пресных вод СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. С. 28—36.
364. Рождественский А. П. Основные черты современного рельефа и новейшая тектоника восточной окраины Русской платформы и Предуральяского прогиба // Геоморфология и новейшая тектоника Волго-Уральской области и Южного Урала: Тр. совещ. Уфа, 1960. С. 22—34.
365. Рябков Н. В. Геоморфологические исследования в районе Нижне-Камского гидроузла в связи с его проектированием // Вопросы географии, 1961. Сб. № 54. С. 77—81.
366. Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения. М., 1988. 69 с.
367. Саралов А. И., Бердичевская М. В., Банникова О. М. и др. Накопление полифосфатов в начальной фазе роста *Acinetobacter calcoaceticus* и *Rhodococcus maris* // Микробиология, 1995. Т. 64, № 4. С. 446—452.
368. Селивановский Б. В. История формирования долин основных рек в Среднем Поволжье // Докл. АН СССР, 1950. Т. 75, вып. 3. С. 84—92.
369. Сивинских П. Н., Кадебская О. И. Морфометрия озер Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 81—85.
370. Сигов В. А. Новейшая тектоника Среднего и восточной части Южного Урала // Мат-лы по геоморфологии Урала. М.: Недра, 1971. Вып. 2. С. 61—73.
371. Смирнов А. А. О применении метода естественного электрического поля в районе Кунгурской ледяной пещеры // Вестн. МГУ. Сер. биол., почв., геол., геогр. 1958. № 2. С. 195—200.
372. Смирнов А. И., Книсс В. А. Биоспелеологический метод определения возраста карстовых пещер // Геоморфология, 1986. № 1. С. 96—98.
373. СНиП 2.01.14—83. Определение расчетных гидрологических характеристик / Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1985. 37 с.
374. Соколов Д. С. Основные условия развития карста. М.: Гостопотехиздат, 1962. 320 с.
375. Солуха В. И. Высокочувствительные измерения температуры в Кунгурской пещере // Пещеры. Пермь, 1971. Вып. 10—11. С. 155—158.
376. Солуха В. И. Изучение современной тектоники в Кунгурской ледяной пещере с помощью горизонтальных маятников // Пещеры. Пермь, 1970. Вып. 8—9. С. 181—183.
377. Солуха В. И. К вопросу о неоднородности земной коры и мантии на Среднем Предуралье по данным наклонномерных наблюдений // Строение и развитие земной коры и структур рудных полей Урала по геофизическим данным. Свердловск, 1976. С. 97—100.
378. Солуха В. И., Дорофеев В. П., Сычева М. В. Гравиметрические исследования в Кунгурской пещере // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1978. Вып. 17. С. 78—85.
379. Соцкова Л. М. Дублянский В. Н. Микроклимат карстовых полостей // Землеведение, 1982. Т. 14. С. 79—91.
380. Спиридонов А. И. Геоморфология европейской части СССР. М.: Высш. шк., 1978. 154 с.
381. Спирин Л. Н. Морфотрещиноватость бассейна Средней Камы // Вопросы ландшафтоведения, геоморфологии и исторической геологии // Учен. зап. ПГУ, № 270. С. 48—52.

382. Спирин Л. Н., Болонкин П. Ф., Баканин В. В. и др. Ярусность рельефа и морфоструктуры Пермского Прикамья // Вопросы ландшафтоведения, геоморфологии и исторической геологии. Пермь, 1970. С. 58—67.
383. Справочник гидрогеолога. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 616 с.
384. Справочное руководство по применению ядерных методов в гидрологии и гидрогеологии. М.: Недра, 1971. 256 с.
385. Старков Н. П., Горбунова К. А. К минералогии глин Кунгурской пещеры // Пещеры. Пермь, 1971. Вып. 10—11. С. 68—70.
386. Старобогатов Я. И. Отряд Amphipoda // Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. СПб., 1995. Т. 2 (Ракообразные). С. 98—103.
387. Степанов В. И. Структуры и текстуры минеральных агрегатов, образующихся в свободном пространстве пустот // Спелеология в России. М., 1998. Вып. 1. С. 71—91.
388. Субботин В. А., Максимович Н. Г. Устройство для непрерывного автоматического измерения и регистрации расходов жидкости при длительных процессах // Инженерная геология Западного Урала. Тез. докл. Пермь, 1980. С. 51.
389. Суворов И. Описание Кунгурской пещеры зрителем народных училищ Суворовым // Казанские известия. Казань, 1816. № 19.
390. Татищев В. Н. Избранные труды по географии России. М.: Географиз, 1950. 73 с.
391. Татищев В. Н. Сказание о звере мамонте // Учен. зап. Ярослав. пед. ин-та. Пер. с лат. Ярославль, 1958. Вып. 20 (XXX), ч. 2, геогр. С. 189—190.
392. Тестов Б. В., Ковтун Ю. П., Шихов Н. В. Радиологический фактор Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 172—175.
393. Тимофеев Д. А., Дублянский В. Н., Кикнадзе Т. З. Терминология карста. М.: Наука, 1991. 259 с.
394. Тинтилозов З. К. Новоафонская пещерная система. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 150 с.
395. Тихомиров Н. К. Значение карста в гидрогеологии // Водные богатства земли на службу соцстроительству: Тр. Всес. гидрол. съезда в 1931 г. М., 1934. Сб. 7. С. 101—120.
396. Токарев Н. С. Разделение территории СССР по характеру режима климата, поверхностных и подземных вод // Тр. Новочеркасского политехи, ин-та, 1962. Т. 128. С. 3—22.
397. Торнес Дж. Б., Брунсден Д. Геоморфология и время. М.: Недра, 1981. 226 с.
398. Турышев А. В. Кунгурская ледяная пещера // Охрана природы на Урале. Свердловск, 1960. Вып. 1. С. 163—165.
399. Турышев А. В. Подземные воды Кунгурской ледяной пещеры // Специальные вопросы карстоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 63—67.
400. Фальк И. П. Записки путешествия. В 2-х ч. Полное собрание ученых путешествий по России. СПб.: Изд-во АН, 1824. Ч. 1. Т. VI.
401. Федоров Е. В. Теория оптимального эксперимента. М.: Изд-во АН СССР, 1971. 130 с.
402. Федоров Е. С. Заметки о Кунгурских пещерах // Материалы для геологии России. СПб.: Изд-во Петерб. минерал. о-ва, 1883. Т. XI. С. 217—243.
403. Федоров Е. С. Наблюдения в Кунгурской ледяной пещере // Зап. минералог. о-ва. 2-я серия. М., 1884. Т. 19. С. 191.

404. Федотюк И. В. Минерализация и химический состав р. Сылва в районе Кунгурской ледяной пещеры // Научные достижения студентов на рубеже веков: Мат-лы научно-практ. конф. Пермь, 2001. С. 63—67.
405. Ферсман А. Е. К минералогии пещер // Природа, 1926. № 1—2. С. 97—99.
406. Филиппов А. Г. Гравитационные отложения в карстовых пещерах // Инженерная геология карста: Докл. Междунар. симп. Пермь, 1993. Т. 2. С. 237—243.
407. Фролов Н. М. Гидрогеотермия. М.: Недра, 1968. 315 с.
408. Химическая география вод и гидрогеохимия Пермской области / Под ред. Г. А. Максимовича. Пермь, 1967. 179 с.
409. Хлебников А. Т. О Кунгурской ледяной пещере // Тр. Всесоюз. съезда по охране природы в СССР. М., 1935. С. 148—149.
410. Хмелевской В. К. Методика высокочастотной разведки при карстовой съемке и изучении карстовых пещер // Методика изучения карста: Тр. Всесоюз. совещ. Пермь, Вып. 5. Геофизические методы. С. 25—34.
411. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоздат, 1963. 620 с.
412. Худеньких Ю. А. Уникальный ресурс и проблема его использования // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: Мат-лы конф. Кунгур, 2003. С. 222—229.
413. ЦыМСин Р. А. Отложения и полезные ископаемые карста. Новосибирск: Наука, 1985. 163 с.
414. Чайковский И. И. Вихревые тектонические структуры Пермской области и мезо-кайнозойское минералообразование // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Мат-лы конф. Пермь, 2002. С. 8—10.
415. Чащин С. П., Панарина Г. Н., Тиунов М. П. Летучие мыши в пещерах Пермского Прикамья // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь, 1978. Вып. 17. С. 103—108.
416. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 308 с.
417. Чернышев С. Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 238 с.
418. Чикишев А. Г. Карстовые пещеры СССР // Спелеология и карстование. М.: МО-ИП, 1959. С. 7—40.
419. Чикишев А. Г. Об исследованиях Кунгурской ледяной пещеры в связи с решением некоторых практических задач // Тр. МОИП, 1964. Т. XII. С. 183—190.
420. Шаскольская М. П. Кристаллы. М.: Наука, 1956. С. 69—71.
421. Шерстобитов В. А. Установка для дистанционного наблюдения за интенсивностью капели в пещерах // Карст и гидрогеология Предуралья. Свердловск, 1979. С. 62—66. (Тр. Ин-та геол. и геохим. УНЦ АН СССР. Вып. 140).
422. Шимановская И. А. Опыт региональной оценки эксплуатационных запасов пресных подземных вод Пермского Приуралья // Учен. зап. Перм. ун-та, 1970. № 210. С. 163—171.
423. Шимановская И. А. К вопросу формирования ресурсов пресных и минерализованных вод Пермского Прикамья // Гидрогеология и карстование. Пермь, 1971. Вып. С. 186—193.
424. Шимановский Л. А. Землетрясения в Пермской области // Природа, 1957. № 5. С. 115—116.
425. Шимановский Л. А., Шимановская И. А. Пресные подземные воды Пермской области. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1973. 197 с.
426. Шипунова В. А. Пещеры и геоморфологические уровни // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Баку, 1985. 22 с.

427. Штукенберг А. Общая геологическая карта Европейской России. Лист 27 // Тр. Геолог, комитета. СПб., 1898. Т. 16. № 1.
428. Шуб В. С. Древние поверхности выравнивания, принципы их выделения и некоторые закономерности формирования рельефа Урала // Материалы по геоморфологии Урала. М.: Недра, 1971. Вып. 2. С. 20—28.
429. Шувалов В. М. Об интерпретации электроразведочных данных при инженерно-геологических исследованиях карстовых полостей и горных выработок // Решение тектонических и инженерно-геологических задач геофизическими методами. Пермь, 1977. — Рукопись деп. в ВИНТИ. № 4413-77.
430. Шувалов В. М. Изучение карстовых полостей геоэлектрическими методами на примере Кунгурской Ледяной пещеры. Пермь, 1979. — Рукопись деп. в ВИНТИ 17.12.1979, №4281-79.
431. Шувалов В. М. Исследования закарстованных территорий и подземных полостей методами электроразведки: Учеб. пособ. по спецкурсу. Пермь, 1983. 92 с.
432. Шувалов В. М. Геофизические методы при геологических, инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях. Пермь, 1995. 263 с.
433. Шувалов В. М., Поносов В. А., Горожанцев С. В. Об опыте изучения карстующихся пород комплексом геофизических методов // Геофизические методы поисков и разведки нефти и газа. Пермь, 1980. С. 150—155.
434. Шумский П. А. Основы геокриологии. М., 1959. Ч. 1.
435. Якушова А. Ф. Карст и его практическое значение. М.: Географгиз, 1950. 68 с.
436. Яхимович В. Л., Немкова В. К., Семенов И. Н. Стратиграфия плиоцен-плейстоценовых отложений Тимано-Уральской области и их корреляция по Предуралю. М.: Наука, 1973. 127 с.
437. Яценко Р. В. О составе льда Кунгурской пещеры // Пещеры. Пермь, 1965. Вып. 5 (6). С. 27—28.
438. Andrejchuk V., Dorofeev E., Lukin V. Organ pipes in carbonate-sulphate rocks at the Kungur Ice Cave, near Perm, Russia // Cave and karst science: Transactions of the British Cave Research Association. 1997. Vol. 24, № 3. P. 101—106.
439. Borutzky E. W. Materialien über die Fauna der unterirdischen Gewässer. Crangonyx chlebnikovi sp. nov. (Amphipoda) aus den Höhlen des mittleren Urals // Zool. Anz., 1928. Bd 77. 253—259.
440. Bogli A. Karsthydrographie und physische Spelaologie. Heidelberg. New York, 1978. 297 S.
441. Christopher N. S. Simplified method of calculating saturation index // BCRA. 1978. Vol. 5, №3. P. 15—18.
442. Dublyansky V., Dublyansky Y. The problem of condensation in karst studies // J. of cave and Karst Studies, 1998. Vol. 60, № 1. P. 3—17.
443. Dublyansky Y., Andreichuk V. Aerosol studies in Kungur Ice Cave // 11th Int. Congr. Speleol., 1993. S. 190—192.
444. Erdmann J. F. Beiträge zur Kenntniss des Innern von Russland. 11, 2. Halte s. 170—180. Dorpart und Leipzig, 1822—1826. S. 147—150.
445. Falk I. P. Beiträge zur Kenntniss des Russischen Reiches. Bd III. 1785—1786. S.-Petersburg, 1786.
446. Ford D., Williams P. Karst geomorphology and Hydrology. London: Unwin Hyman, 1989. 601 p.
447. Gmelin I. G. Reise durch Sibirien von den Jahren 1733—1743. Teil 1. 1751—1752. Gottingen, 1751.
448. Gorbunova K. A., Maximovich N. G. Formation of sulfate-calcic waters in Kungur Cave massif // Cave and Karst Science: Abstract, 1994. Vol. 21, № 1. P. 12.

449. Gorbunova K. A., Maximovich N. G., Blinov S. M. et al. Karst water level regime of Kungur cave // *Kras i speleologia*. Katowice, 1998. T. 9 (XVIII). P. 118–125.
450. Gorbunova K. A., Maximovich N. G., Blinov S. M. et al. Factors determining underground water regime of Kungur Cave // *Karst-Water Environment Symposium: Proc. Blacksburg*, 1997. P. 150.
451. *Gypsum karst of the World* / Klimchouk A., Lowe D., Cooper A. et al. Bologna, 1996. 307 p.
452. Hill C., Forti P. *Cave minerals of the World*. Huntsville, 1997. 480 p.
453. Kataev V. N. Analysis of the karst massif elements // *Инженерная геология карста: Докл. междунар. симп. Т. 1. Пермь*, 1993. С. 54—60.
454. Kirov G. K., Vesselinov I., Cherneva Z. Condition of formation of calcite crystals of tabular and acute rhombohedral habit // *Kristall und Technik*, 1972. № 5. P. 17–21.
455. K i l l a r a M. *Die Eishöhle von Kungur* // *Arch, für wissenschaftliche Kunde von Russland (von Erdmann)*, 1850. Bd 8. S. 75—81.
456. Kostov I., Kostov R. *Crystal habits of minerals*. Sofia: Pensoft, 1999. P. 21—27.
457. *Paleokarst a systematic and regional review* / P. Bosak. Praha: Academia, 1989. 725 p.
458. Pashenko S., Dublyansky Y., Andreichuk V. et al. Transformation of fractal atmospheric aerosol moving through natural cave // *J. Aerosol Sci.*, 1996. T. 27. Suppl. 1. P. 127—128.
459. Shibakova V. S., Lukin V. S., Dorofeev E. P. et al. Kungur Ice Cave. Case history of utilization and rehabilitation // *Engineering Geology and the Environment*. Rotterdam, Balkema, 1997. P. 3009—3013.
460. Stralenberg F. J. *Das Nord und Estliche Teil von Europa und Asien etc.* Stockhokm, 1730. P. 371—373.
461. Trimmel H. *Die Höhlenkunde*. Braunschweig. 1968. 625 p.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### Часть I. География и геология района Кунгурской Ледяной пещеры

<b>Глава 1. Орогидрография</b> (В. Н. Дублянский, О. И. Кадебская).....	7
<b>Глава 2. Климат</b> (В. Н. Дублянский, О. И. Кадебская).....	11
<b>Глава 3. Почвы и растительность</b> (В. Н. Дублянский, О.И. Кадебская).....	16
<b>Глава 4. Геология</b> (В. Н. Дублянский, И. А. Никифорова, В. Н. Катаев, К. О. Худеньких).....	18
4.1. Стратиграфия и литология.....	18
4.2. Тектоника и трещиноватость.....	21
4.3. Геологические описания района Кунгурской Ледяной пещеры.....	31
<b>Глава 5. Гидрогеология</b> (О. И. Кадебская, И. А. Никифорова, В. Н. Дублянский).....	34
<b>Глава 6. Геоморфология</b> (В. Н. Дублянский, О. И. Кадебская).....	39

### Часть II. Кунгурская Ледяная пещера

<b>Глава 7. История исследования</b> (Н. В. Лаврова, В. Н. Дублянский).....	45
7.1. Исследования до XVIII в.....	45
7.2. Исследования в XVIII в.....	46
7.3. Исследования в XIX в.....	49
7.4. Исследования в первой половине XX в.....	51
7.5. Исследования во второй половине XX в.....	55
<b>Глава 8. Методика обработки материалов наблюдений</b> (В. Н. Дублянский)...	61
<b>Глава 9. Морфология</b> (В. Н. Дублянский, Ю. В. Кадебский, И. А. Лавров).....	70
9.1. Морфография пещеры.....	70
9.2. Морфометрия пещеры.....	82
<b>Глава 10. Гидрогеология</b> (В. Н. Дублянский, Г. Н. Дублянская).....	89
10.1. Уровни воды в скважинах в пещере.....	91
10.2. Уровни воды в озерах пещеры.....	94
10.3. Уровни воды в скважинах у пещеры.....	94
10.4. Уровни воды в р. Сылве.....	95
10.5. Режим карстовых вод Ледяной горы.....	95
10.6. Режим водопроявлений Кунгурской Ледяной пещеры в паводок.....	101
<b>Глава 11. Гидрохимия</b> (В. Н. Дублянский, Г. Н. Дублянская).....	106
11.1. Атмосферные воды.....	106
11.2. Поверхностные воды.....	109
11.3. Капель в пещере.....	109
11.4. Лед в пещере.....	113
11.5. Вода пещерных озер.....	115
11.6. Вода из скважин в пещере.....	123
11.7. Вода из скважин у пещеры.....	124

11.8. Вода рек Сылвы и Шаквы.....	127
11.9. Загрязнение подземных вод в районе пещеры.....	130
<b>Глава 12. Микроклимат (В. Н. Дублянский)</b> .....	133
12.1. Общие сведения.....	133
12.2. Температура горных пород.....	135
12.3. Температура воды.....	138
12.4. Температура воздуха.....	140
12.5. Влажность воздуха.....	147
12.6. Движение воздуха.....	151
12.7. Аэрозоли в воздухе.....	161
12.8. Газовый состав воздуха.....	167
12.9. Конденсация и испарение.....	173
<b>Глава 13. Отложения (Н. Е. Молоштанова, Н. Г. Максимович, В. Н. Дублянский, Б. Р. Мавлюдов, У. В. Назарова)</b> .....	179
13.1. Классификация пещерных отложений.....	179
13.2. Остаточные отложения.....	181
13.3. Гравитационные отложения.....	184
13.4. Водные механические отложения.....	190
13.5. Водные химические отложения.....	191
13.6. Снежно-ледяные отложения.....	212
13.7. Органические отложения.....	231
13.8. Антропогенные отложения.....	232
13.9. Геохимия Кунгурской пещеры.....	232
<b>Глава 14. Биология (Н. Н. Паньков, О. И. Кадебская)</b> .....	238
14.1. Гетеротрофная микрофлора.....	238
14.2. Зеленые растения.....	243
14.3. Беспозвоночные животные.....	244
14.4. Позвоночные животные.....	255
<b>Глава 15. Эксперименты в Кунгурской Ледяной пещере (В.Н. Дублянский, В. М. Шувалов)</b> .....	258
15.1. Геофизические исследования в районе пещеры.....	258
15.2. Исследования дефицита насыщения карстовых вод.....	277
15.3. Исследования скорости растворения гипса и ангидрита.....	280
15.4. Качественные наблюдения за конденсацией.....	286
15.5. Наблюдения за капелью.....	288
15.6. Капель и искусственные деформации пород.....	293
<b>Глава 16. Изменения в состоянии Кунгурской Ледяной пещеры (О. И. Кадебская, Б. Р. Мавлюдов, В. Н. Дублянский)</b> .....	294
16.1. Многолетние изменения.....	294
16.2. Накопление и абляция льда.....	297
16.3. Эволюция оледенения.....	300
16.4. Причины деградации оледенения.....	308
<b>Глава 17. Геологическая история района Кунгурской Ледяной пещеры (В. Н. Дублянский)</b> .....	319
17.1. Геологический этап развития.....	319
17.2. Геоморфологический этап развития.....	322
<b>Глава 18. Формирование Кунгурской Ледяной пещеры (В. Н. Дублянский, Г. Н. Дублянская)</b> .....	333
<b>Глава 19. Туристское использование пещеры (Ю. В. Кадебский, О. И. Кадебская, В. Н. Дублянский)</b> .....	342

<b>Глава 20. Кунгурская Ледяная пещера как памятник природы (О. И. Кадебская, В. Н. Дублянский).....</b>	<b>352</b>
<b>Список литературы (Н. В. Лаврова, В. Н. Дублянский) .....</b>	<b>356</b>

*Научное издание*

**КУНГУРСКАЯ ЛЕДЯНАЯ ПЕЩЕРА:  
ОПЫТ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Рекомендовано к изданию Ученым советом Горного института  
и НИСО УрО РАН

Редактор **К. И. Ушакова**  
Технический редактор **Е. М. Бородулина**  
Корректоры **Г.Н. Старкова, Н.В. Каткова**  
Компьютерная верстка **И.И. Глазыриной**

Компьютерная графика: **Ю. В. Кадебский, И. А. Лавров, К. О. Худеньких,  
М. С. Пятунин**

Фотографии: **В. Баженов, А. Поляков, А. Шпринкин, Ю. Баранов,  
Е. Дорофеев**

ЛР № 020764 от 24.04.98 г.

НИСО УрО РАН № 01(04)—145. Сдано в набор 30.05.05. Подписано в печать 04.10.05.  
Формат 70×100 1/16. Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 31,5. Уч.-изд. л. 35.  
Тираж 300. Заказ 57.

620219, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91.  
Типография Уральского центра академического обслуживания.