

Г. А. МАКСИМОВИЧ
ПОРИСТОСТЬ КРИОСФЕРЫ

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 23 VIII 1915)

Криосфера – это геосфера твердого состояния воды (⁸, ⁹). Большая ее часть сконцентрирована между педосферой и гидросферой внизу и тропосферой вверху. Объем этой фазовой геосферы подвержен наиболее быстрым изменениям (в течение года). Границы криосферы, как и всякой геосферы, не шаровые; они неровны. В основных своих чертах эти границы сложились в геологическое время. Основным параметром, определяющим положение криосферы в разрезе земли, является температура; она отрицательна. Вторым параметром является давление. Криосфера – это область динамических физико-химических равновесий, стремящихся достигнуть устойчивого состояния. Однако равновесия эти непрерывно нарушаются вхождением чуждых им в каждый данный момент проявлений энергии. У криосферы, как фазовой геосферы, физическое состояние вещества также представляет собой параметр. Переменным является только химический состав.

Криосфера сконцентрирована главным образом в приполярных пространствах, где она представлена как континентальным льдом ледников, так и морским; объем его составляет $3,5 \cdot 10^6$ км³. В других широтах лед постоянно развит только на горных вершинах. Помимо постоянной криосферы существуют области сезонной криосферы, где в периоды низких температур появляется снежный покров и лед на поверхности водоемов и водотоков. Общий объем снега принимается 250 км³. Взаимопроникновение геосфер (²⁰) для криосферы проявляется в том, что в тропосфере периодически образуется лед, питающий снежный покров, а также в сезонном и длительном промерзании коры выветривания. Длительное промерзание захватывает также и верхнюю часть стратисферы, а в районах выхода на дневную поверхность – и другие, более глубокие геосферы.

Для геосфер с преобладанием твердой фазы (⁵, ⁶) возможность проникновения жидкой и газообразной фаз определяется пористостью. В предыдущих работах (¹⁹, ²¹) автором приведены результаты вычисления средней пористости поверхностных геосфер от педосферы и пелосферы до основной подгранитной оболочки (⁶). Криосфера не была рассмотрена.

Пористость изучена далеко не для всех разностей криосферы. Это определяется периодичностью существования льда (¹⁰), в частности, в районах местообитания большей части человечества. Однако по основным разностям криосферы: снегу, фирну, глетчерному и морскому льду имеются данные, позволяющие судить об их средней пористости и о пределах изменения последней. Это дает возможность вычислить и среднюю пористость криосферы.

Наибольшие данные имеются о снеге. Плотность снега колеблется в широких пределах. Наименьшей плотностью обладает снег, выпавший при тихой погоде и низкой температуре. Свежевыпавший снег при температуре около 0° уже почти в три раза плотнее. Плотность снега увеличивается в результате метелей, при которых массы снега переносятся с места на место, отдельные, наиболее крупные снежинки ломаются, и снег укладывается плотнее. Оттепели также увеличивают его плотность. По наблюдениям в Лесном, средняя плотность снега составляла в ноябре 0,14, в декабре 0,18 и в апреле 0,32. При оттепели плотность снега достигает 0,5; плотность чистого льда составляет 0,9174 (¹²) и 0,9176 (¹⁶) или, в среднем, 0,9175. Таким образом, пористость снега изменяется от 92,5 % для свежевыпавшего при низкой температуре до 45,5 % у снега, долго лежавшего после оттепели. В среднем для снега может быть принята пористость 75 %.

Пористость фирна составляет от 30 до 50 % или, в среднем, 40 %. Плотность пузырьчатого льда – 0,85, что дает пористость 7,3 % (¹³, ¹⁴). Пористость льда ледников составляет от 1 до 4 % или, в среднем, 2,5 %, пористость айсбергов – от 7 до 15 % (³).

Таким образом, ледяные осадки или снег обладают наиболее высокой пористостью. Диагенетические процессы превращают ледяные осадки в породу – фирн. При этом средняя пористость уменьшается с 75 до 40 %. Метаморфизация ледяной породы (фирна) дает первую метаморфическую породу – пузырьчатый лед, а затем и глетчерный лед. Пористость уменьшается до 7,3 и 2,5 % соответственно. Воздух, бывший в фирне, частично выдавливается через мельчайшие трещины и каналы, а частично сжимается и сохраняется под давлением, которое достигает 10–12 атм.

Определения плотности морского льда многочисленны (², ⁴, ¹¹, ¹⁵, ²², ²³). Она зависит от его солёности и объема включенных в лед пузырьков газа. Колебания пористости льда в Финском заливе доходят до 4 % (¹). Пористость льда Баренцова моря достигает 8 % и даже более (¹⁴). В общем пористость морского льда колеблется от 0,7 до 8 % и составляет в среднем 3 %. Многолетние морские льды наименее пористы, так как сильные сжатия делают их монолитными. Поры морского льда, так же как и сам лед, двойного происхождения. В верхней части – это поры метаморфизированного снега, а в нижней они обусловлены включением пузырьков воздуха, рассолами, заполняющими ячейки и капилляры, и другими второстепенными причинами.

Приведенные данные можно свести в следующую таблицу, где льды подразделены по генезису (¹⁸).

Пористость льдов криосферы

Генезис	Разность	Пористость в %			Группа	Среди. порист.
		максим.	миним.	среди.		
Атмогенные	Снег	92,5	45,5	75,0	I	45,0
	Фирн	50,0	30,0	40,0		
	Лед ледников	4,0	1,0	2,5		
Гетерогенные	Лед морской	8,0	0,7	3,0	II	2,75

Средняя пористость криосферы составляет 3,0 %.

Необходимо изучение пористости и других льдов криосферы, имеющих меньшее значение: пещерных⁽¹⁸⁾, речных и озерных.

В зоне вечной мерзлоты замерзает вода, содержащаяся в породах коры выветривания и верхней части стратисферы. Пористость здесь также незначительна, так как это уже только пустоты без воды или пустоты во льду.

Если рассматривать пористость как отношение объема пустот к общему объему какого-то участка земной коры или отношение объема, занятого жидкой и газообразной фазами, к общему объему, то пористость гидросферы и тропосферы будет больше 99,99 %, так как объем твердой фазы в нижней части тропосферы составляет в среднем около $3 \cdot 10^{-5}$ %, а в океане $1 \cdot 10^{-5}$ %.

Сопоставление пористости криосферы с пористостью геосфер литосферы^(19, 20), а также тропо- и гидросферы приведено в следующей схеме.

Пористость геосфер и оболочек⁽¹⁹⁾

Тропосфера	>0,99	Гидросфера	> 0,99	Криосфера:	
Педосфера	0,55	Пелосфера	0,5	Снег	0,75
Гипопедосфера	0,45				
	0,35				
Стратисфера	0,30			Фирн	0,40
	0,20				
Метаморфосфера	0,04			Лед глетчеров	0,04
	0,01				0,01
Гранитосфера	0,01			Лед морской	0,03

Криосфера, приуроченная главным образом к поверхности геоида, сложенная веществом, переходящим из жидкого состояния в твердое и подвергающимся метаморфизму при низких температурах и небольших давлениях, иллюстрирует закон нашей планеты – убывание пористости с ростом давления.

Поэтому в разрезе земли можно пользоваться только данными о непреобразованном льде криосферы или снеге. Пористость снега 0,75 % соответствует пространственному его положению между тропосферой и педосферой. Все продукты диагенеза и метаморфизации снега будут обладать пористостью, характерной для других термодинамических обстановок земли. В этом состоит особенность фазовой геосферы. Поэтому средней пористостью криосферы, при показе изменения пористости геосфер с глубиной, пользоваться нельзя: она выведена по преобладающим на земле глетчерному и морскому льдам.

Между тем, пористость морского льда (называемого А. В. Добровольским магматическим), как гетерогенного образования, естественно несколько выше, чем пористость магматической гранитосферы.

Молотовский государственный университет
им. А. М. Горького

Поступило
23 VIII 1945

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Ариольд-Алябьев, Тр. 4-й гидр. конф. Балт. стран (1932). ² В. И. Арнольд-Алябьев, Тр. Ком. вечн. мерзл., 3, 127 (1933). ³ Н. Т. Barnes, Ice Engineering, 1928. ⁴ W. Bren песке, Aus dem Arch. d. deutsch. Seewarte, 29, 1, 216 (1921). ⁵ В. И. Вернадский, Очерки геохимии, 1924. ⁶ В. И. Вернадский, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 6, 251 (1942). ⁷ А. А. Григорьев, Опыт аналитическ. характеристики состава и строения физико-географич. оболочки земного шара, 1937. ⁸ А. В. Dobrowolski, Historia Naturalna Loda W, 1923. ⁹ А. В. Dobrowolski, Bull. Soc. Pr. de Mineral., 54, 5 (1931). ¹⁰ А. В. Dobrowolski, Biuletyn Tow. Geof. w. AVarsz., 9–10, 11, 54 (1934). ¹¹ E. Dryrc1ski, Deutsche Südpoler Expedition 1901–1903, 1, Geographie. ¹² Н. J. Emelaus, J. W. Jances, A. King, P. G. Pearson, Pycel and H. V. A. Priscoe, J. Chem. Soc., 1207 (1934). ¹³ Н. Н. Зубов, Некоторые свойства морского льда, 1932. ¹⁴ Н. Н. Зубов, Морские воды и льды, 1941, стр. 276. ¹⁵ А. Ф. Лактионов, Тр. Ин-та изуч. Севера, 49, 71 (1931). ¹⁶ P. Leduc, C. R., 142, 149 (1906). ¹⁷ С. О. Макаров, Ермак во льдах, 1901. ¹⁸ Г. А. Максимович, ДАН, XXXI, № 6, 478 (1941). ¹⁹ Г. А. Максимович, ДАН, XXXVII, № 7–8, 245 (1942). ²⁰ Г. А. Максимович, Природа, 5, 15 (1943). Г. А. Максимович, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., VIII, 5, 298 (1944). ²² F. Ma1mgren, The Norwegian North Poler Expedition 1918–1925, Scientific Results, 1, 5, 67 (1927). ²³ М.Ф Розен, Изв. ЦГМВ ЦУМОР, 8, 221 (1929).

Г. А. МАКСИМОВИЧ

ПОРИСТОСТЬ КРИОСФЕРЫ

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 23 VIII 1945)

Криосфера — это геосфера твердого состояния воды^(8, 9). Большая ее часть сконцентрирована между педосферой и гидросферой внизу и тропосферой вверху. Объем этой фазовой геосферы подвержен наиболее быстрым изменениям (в течение года). Границы криосферы, как и всякой геосферы, не шаровые; они неровны. В основных своих чертах эти границы сложились в геологическое время. Основным параметром, определяющим положение криосферы в разрезе земли, является температура; она отрицательна. Вторым параметром является давление. Криосфера — это область динамических физико-химических равновесий, стремящихся достигнуть устойчивого состояния. Однако равновесия эти непрерывно нарушаются вхождением чуждых им в каждый данный момент проявлений энергии. У криосферы, как фазовой геосферы, физическое состояние вещества также представляет собой параметр. Переменным является только химический состав.

Криосфера сконцентрирована главным образом в приполярных пространствах, где она представлена как континентальным льдом ледников, так и морским; объем его составляет $3,5 \cdot 10^6$ км³. В других широтах лед постоянно развит только на горных вершинах. Помимо постоянной криосферы существуют области сезонной криосферы, где в периоды низких температур появляется снежный покров и лед на поверхности водоемов и водотоков. Общий объем снега принимается 250 км³. Взаимопроникновение геосфер⁽²⁰⁾ для криосферы проявляется в том, что в тропосфере периодически образуется лед, питающий снежный покров, а также в сезонном и длительном промерзании коры выветривания. Длительное промерзание захватывает также и верхнюю часть стратисферы, а в районах выхода на дневную поверхность — и другие, более глубокие геосферы.

Для геосфер с преобладанием твердой фазы^(5, 6) возможность проникновения жидкой и газообразной фаз определяется пористостью. В предыдущих работах^(19, 21) автором приведены результаты вычисления средней пористости поверхностных геосфер от педосферы и пелосферы до основной подгранитной оболочки⁽⁶⁾. Криосфера не была рассмотрена.

Пористость изучена далеко не для всех разностей криосферы. Это определяется периодичностью существования льда⁽¹⁰⁾, в частности, в районах местообитания большей части человечества. Однако по основным разностям криосферы: снегу, фирну, глетчерному и морскому льду имеются данные, позволяющие судить об их средней пористости и о пределах изменения последней. Это дает возможность вычислить и среднюю пористость криосферы.

Наибольшие данные имеются о снеге. Плотность снега колеблется в широких пределах. Наименьшей плотностью обладает снег, выпавший при тихой погоде и низкой температуре. Свежевыпавший снег при температуре около 0° уже почти в три раза плотнее. Плотность снега увеличивается в результате метелей, при которых массы снега переносятся с места на место, отдельные, наиболее крупные снежинки ломаются, и снег укладывается плотнее. Оттепели также увеличивают его плотность. По наблюдениям в Лесном, средняя плотность снега составляла в ноябре 0,14, в декабре 0,18 и в апреле 0,32. При оттепели плотность снега достигает 0,5; плотность чистого льда составляет 0,9174⁽¹²⁾ и 0,9176⁽¹⁶⁾ или, в среднем, 0,9175. Таким образом, пористость снега изменяется от 92,5% для свежевыпавшего при низкой температуре до 45,5% у снега, долго лежавшего после оттепели. В среднем для снега может быть принята пористость 75%.

Пористость фирна составляет от 30 до 50% или, в среднем, 40%. Плотность пузырьчатого льда — 0,85, что дает пористость 7,3%^(13, 14). Пористость льда ледников составляет от 1 до 4% или, в среднем, 2,5%, пористость айсбергов — от 7 до 15%⁽³⁾.

Таким образом, ледяные осадки или снег обладают наиболее высокой пористостью. Диагенетические процессы превращают ледяные осадки в породу — фирн. При этом средняя пористость уменьшается с 75 до 40%. Метаморфизация ледяной породы (фирна) дает первую метаморфическую породу — пузырьчатый лед, а затем и глетчерный лед. Пористость уменьшается до 7,3 и 2,5% соответственно. Воздух, бывший в фирне, частично выдавливается через мельчайшие трещины и каналы, а частично сжимается и сохраняется под давлением, которое достигает 10—12 атм.

Определения плотности морского льда многочисленны^(2, 4, 11, 15, 22, 23). Она зависит от его солености и объема включенных в лед пузырьков газа. Колебания пористости льда в Финском заливе доходят до 4%⁽¹⁾. Пористость льда Баренцова моря достигает 8% и даже более⁽¹⁴⁾. В общем пористость морского льда колеблется от 0,7 до 8% и составляет в среднем 3%. Многолетние морские льды наименее пористы, так как сильные сжатия делают их монолитными. Поры морского льда, так же как и сам лед, двоякого происхождения. В верхней части — это поры метаморфизованного снега, а в нижней они обусловлены включением пузырьков воздуха, рассолами, заполняющими ячейки и капилляры, и другими второстепенными причинами.

Приведенные данные можно свести в следующую таблицу, где льды подразделены по генезису⁽¹⁸⁾.

Пористость льдов криосферы

Генезис	Разность	Пористость в %			Группа	Средн. порист.
		максим.	миним.	средн.		
Атмогенные	Снег	92,5	45,5	75,0	I	45,0
	Фирн	50,0	30,0	40,0		
	Лед ледников .	4,0	1,0	2,5		
Гетерогенные	Лед морской .	8,0	0,7	3,0	II	2,75

Средняя пористость криосферы составляет 3,0%.

Необходимо изучение пористости и других льдов криосферы, имеющих меньшее значение: пещерных⁽¹⁸⁾, речных и озерных.

В зоне вечной мерзлоты замерзает вода, содержащаяся в породах коры выветривания и верхней части стратисферы. Пористость здесь также незначительна, так как это уже только пустоты без воды или пустоты во льду.

Если рассматривать пористость как отношение объема пустот к общему объему какого-то участка земной коры или отношение объема, занятого жидкой и газообразной фазами, к общему объему, то пористость гидросферы и тропосферы будет больше 99,99%, так как объем твердой фазы в нижней части тропосферы составляет в среднем около $3 \cdot 10^{-50}\%$, а в океане $1 \cdot 10^{-50}\%$.

Сопоставление пористости криосферы с пористостью геосфер литосферы (¹⁹, ²¹), а также тропо- и гидросферы приведено в следующей схеме.

Пористость геосфер и оболочек (¹⁹)			
Тропосфера	> 0,99	Гидросфера	> 0,99
Педосфера	0,55	Пелосфера	0,5
Гипопедосфера	0,45		
	0,35		
Стратисфера	0,30		
	0,20		
Метаморфосфера	0,04		
	0,01		
Гранитосфера	0,01		
		Криосфера:	
		Снег	0,75
		Фирн	0,40
		Лед глетчеров	0,04
			0,01
		Лед морской	0,03

Криосфера, приуроченная главным образом к поверхности геоида, сложенная веществом, переходящим из жидкого состояния в твердое и подвергающимся метаморфизму при низких температурах и небольших давлениях, иллюстрирует закон нашей планеты — убывание пористости с ростом давления.

Поэтому в разрезе земли можно пользоваться только данными о преобразованном льде криосферы или снега. Пористость снега 0,75% соответствует пространственному его положению между тропосферой и педосферой. Все продукты диагенеза и метаморфизации снега будут обладать пористостью, характерной для других термодинамических обстановок земли. В этом состоит особенность фазовой геосферы. Поэтому средней пористостью криосферы, при показе изменения пористости геосфер с глубиной, пользоваться нельзя: она выведена по преобладающим на земле глетчерному и морскому льдам.

Между тем, пористость морского льда (называемого А. В. Добровольским магматическим), как гетерогенного образования, естественно несколько выше, чем пористость магматической гранитосферы.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Арнольд-Алябьев, Тр. 4-й гидр. конф. Балт. стран (1932).
² В. И. Арнольд-Алябьев, Тр. Ком. вечн. мерзл., **3**, 127 (1933). ³ Н. Т. Varnes, Ice Engineering, 1928. ⁴ W. Brennecke, Aus dem Arch. d. deutsch. Seewarte, **29**, 1, 216 (1921). ⁵ В. И. Вернадский, Очерки геохимии, 1924.
⁶ В. И. Вернадский, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., **6**, 251 (1942).
⁷ А. А. Григорьев, Опыт аналитическ. характеристики состава и строения физико-географич. оболочки земного шара, 1937. ⁸ A. V. Dobrowolski, Historia Naturalna Loda W, 1923. ⁹ A. V. Dobrowolski, Bull. Soc. Fr. de Mineral., **54**, 5 (1931). ¹⁰ A. V. Dobrowolski, Biuletyn Tow. Geof. w. Warsz., **9-10**, 11, 54 (1934). ¹¹ E. Drygelski, Deutsche Südpoler Expedition 1901-1903, **1**, Geographie. ¹² H. J. Emelius, J. W. Jancses, A. King, F. G. Pearson, Purcell and H. V. A. Priscue, J. Chem. Soc., 1207 (1934). ¹³ Н. Н. Зубов, Некоторые свойства морского льда, 1932. ¹⁴ Н. Н. Зубов, Морские воды и льды, 1941, стр. 276. ¹⁵ А. Ф. Лактионов, Тр. Ин-та изуч. Севера, **49**, 71 (1931). ¹⁶ F. Leduc, C. R., **142**, 149 (1906). ¹⁷ С. О. Макаров, Ермак во льдах, 1901. ¹⁸ Г. А. Максимович, ДАН, XXXI, № 6, 478 (1941). ¹⁹ Г. А. Максимович, ДАН, XXXVII, № 7-8, 245 (1942). ²⁰ Г. А. Максимович, Природа, **5**, 15 (1943).
²¹ Г. А. Максимович, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., VIII, 5, 298 (1944).
²² F. Malmgren, The Norwegian North Polar Expedition 1918-1925, Scientific Results, **1**, 5, 67 (1927). ²³ М. Ф. Розен, Изв. ЦГМБ ЦУМОП, **8**, 221 (1929).