

## Техногенная трансформация ландшафтно-геохимических процессов в районе добычи калийно-магниевых солей

© 2014. Е. А. Хайрулина, к.г.н., в.н.с.,

Естественнонаучный институт Пермского государственного национального  
исследовательского университета,  
e-mail: elenakhay@gmail.com

В работе проанализированы основные ландшафтно-геохимические процессы, трансформация которых произошла в результате разработки Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (Пермский край). Основное техногенное воздействие связано с проявлением процессов галогенеза, в результате которого происходит засоление почв, поверхностных и подземных вод. Из всего многообразия ландшафтно-геохимических процессов наибольшей трансформации подверглись седиментогенез, в результате которого в донных отложениях рек происходит накопление техногенного вещества и биогенез со сменой зональной таёжной растительности на солеустойчивые виды. Поступление техногенных высокоминерализованных вод приводит к активизации сульфидогенеза и оксидогенеза. Эти процессы наблюдаются как в донных отложениях, так и в местах площадной разгрузки грунтовых вод в долине реки. Наибольшей трансформации подвергаются подчинённые наземные и аквальные ландшафты в районах добычи калийно-магниевых солей.

This paper presents the main geochemical processes in landscapes that have transformed in result of Upper Kama potassium and magnesium salts deposit development (Perm krai). Halogenesis is the main technogenic impact, which resulted in salinization of soils, surface water and groundwater. Biogenesis and sedimentogenesis are the most transformed landscape-geochemical processes. There takes place accumulation of technogenic matter in river sediments and the change of taiga vegetation to salt resistance species.

Highly mineralized technogenic water activates sulfidogenesis and oxidogenesis. These processes are observed in the river sediment, and in the river valley where groundwater is discharged. In the territory of salt deposit development alluvial terrestrial and aquatic landscapes are the most transformed.

Ключевые слова: ландшафтно-геохимические процессы, месторождение калийно-магниевых солей, техногенная трансформация.

Keywords: geochemical processes in landscape, potassium and magnesium salts deposit, technogenic transformation.

Формирование природно-техногенных геосистем в условиях разработки месторождений полезных ископаемых связано с привлечением техногенного вещества в миграционные циклы химических элементов и трансформацией зональных ландшафтно-геохимических процессов.

Согласно М. А. Глазовской [1], ландшафтно-геохимические процессы – совокупность взаимосвязанных биогеохимических, физико-химических, физических явлений, в результате совместного действия которых в ландшафтной сфере и её подсистемах идёт, при воздействии солнечной энергии и внутренней энергии Земли, постоянное возобновление живого вещества, трансформация органических, органоминеральных и минеральных соединений, сопровождающееся пространственной дифференциацией химических элементов.

Целью работы является выявление основных ландшафтно-геохимических процессов, которые подверглись техногенной трансформации на территории крупнейшего в России разрабатываемого месторождения солей – (ВКМС) (Пермский край).

Химический анализ включал общий анализ поверхностных и подземных вод, водной вытяжки из почв методом капиллярного электрофореза на приборе КАПЕЛЬ-105. Определение микроэлементов в водах, почвах и донных отложениях проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на ELAN 9000 после микроволнового кислотного разложения.

Выполнение минералогического анализа почв и донных отложений осуществлялось Б.М. Осовецким и Г.А. Исаевой (сектор наноминералогии ПГНИУ). Проводилось отмучивание образцов, частицы глинистой фракции

размером менее 0,01 мм были удалены. Минералогический анализ более крупных частиц выполнялся с использованием бинокулярного микроскопа Nikon 104 (Япония).

Формирование месторождения в Предуральском краевом прогибе связано с галогенными осадками лагунного типа, отложившимися в ранней перми. Промышленное освоение месторождения началось в 30-е годы XX века. Площадь месторождения составляет 6,5 тыс. км<sup>2</sup>. Содержание KCl в руде 18–34%. Геологические запасы месторождения по карналлитовой породе составляют 96,4 млрд т, по сильвинитам – 112,2 млрд т, по каменной соли – 4,65 трлн т. Ежегодная добыча калийно-магниевых солей осуществляется в объёме около 40 млн т в год. Добытая руда обогащается флотационным и галургическим способами на обогатительных фабриках рудоуправлений. Калийно-магниево-соли обогащены до промышленных значений бромом и оксидом рубидия.

Основными факторами, влияющими на трансформацию природной среды в пределах разрабатываемых месторождений, являются геохимическая специфика разрабатываемой толщи и особенности технологического процесса [2]. Согласно металлогеническому районированию Пермского края [3] район калийно-магниевых солей обогащён Na, K, Rb, Li, Cs, Fr, Be, Mg, Sr, Ba, Ra, Au, Pt и металлами платиновой группы.

Калийное производство, как и другие горнодобывающие предприятия, сопровождается накоплением значительного количества отходов разного фазового состава (шламохранилище, солеотвал, рассолосборники). Галитовые отходы и глинисто-солевые шламы характеризуются высоким содержанием Ba, Fe, Cd, Co, Mn, Cu, Ni, Rb, Sr, Cr, Zn, Br [4].

Атмосферные осадки фильтруются сквозь тело солеотвала и шламохранилища, формируют техногенные стоки. Стоки с солеотвалов характеризуются хлоридно-натриевым составом. Минерализация сточных вод составляет до 362 г/л с рН 6,6. Содержание хлоридов достигает 207 г/л, сульфатов 3,7 г/л, натрия 128 г/л, калия 20 г/л. Среди микроэлементов наибольшие концентрации достигают Sr, Mn, Rb, Br, Ba, Cr, Zn, Li, V и ряд других редких элементов.

Стоки с шламохранилища также представлены хлоридно-натриевой фацией. Минерализация составляет 139 г/л. Содержание хлоридов достигает 79 г/л, сульфатов – 2 г/л, натрия – 36 г/л, калия – 19 г/л. Среди микроэ-

лементов преобладают те же элементы: Sr, Mn, Rb, Br, Ba, Zn, Li, V и др.

Стоки с отвалов и шламохранилищ без очистки поступают в поверхностные и подземные воды, вызывая наибольшую трансформацию химического состава приповерхностной гидросферы на значительной территории. Активная миграция техногенного вещества приводит к трансформации естественных ландшафтно-геохимических процессов.

В условиях большого количества осадков и с учётом характера поступления загрязняющих веществ в окружающую среду одним из наиболее важных ландшафтно-геохимических процессов в формировании природно-техногенных геосистем на исследуемой территории является гидрогенез.

*Гидрогенез* (по А.И. Ферсману) – совокупность геохимических процессов в зоне гипергенеза, связанная с проникновением воды в литосферу и сопровождающаяся растворением, переносом и вторичным выпадением из растворов различных минералов [1]. Гидрогенез включает два миграционных потока – атмохимический и гидрохимический. В атмогидрохимических круговоротах наиболее активно мигрируют легкорастворимые соединения.

В случае накопления солей в ландшафтах проявляется галогенез. *Галогенез* – это направленный ландшафтно-геохимический процесс, в результате которого идёт аккумуляция в ландшафтах легкорастворимых солей [1]. В природных условиях галогенез проявляется в аридных и субаридных ландшафтах или в экстраконтинентальных холодных регионах страны, где происходит криогенная метаморфизация природных вод. На исследуемой территории, процессы галогенеза имеют техногенное происхождение. Источником солей являются извлекаемые на поверхность соленосные горные породы и отходы калийного производства. Их дальнейшая миграция происходит в составе водных и воздушных потоков.

**Гидрохимический миграционный поток.** Природные поверхностные воды характеризуются гидрокарбонатно-кальциевой фацией с минерализацией 330 мг/л и рН 7,4. Подземные воды, в основном разгружающиеся на поверхность, относятся к шешминскому водоносному комплексу, характеризующемуся гидрокарбонатно-кальциевой фацией с минерализацией 263 мг/л и рН 7,6.

Поскольку основными загрязнителями при разработке калийных месторождений

являются легкорастворимые соли, именно они активно мигрируют в поверхностных и подземных водах, формируя контрастные техногенные геохимические аномалии и распространяясь на значительное расстояние.

В районе воздействия солеотвалов и шламохранилищ гидрокарбонатно-кальциевая фация поверхностных вод сменяется на хлоридно-натриевую. Минерализация поверхностных вод достигает 14 г/л, концентрация хлоридов увеличивается до 9 г/л, натрия до 2,7 г/л и калия до 1 г/л при pH 7,5. По превышению над природным фоном ( $K_c$ ) макрокомпоненты распределяются следующим образом:  $K^+$ (894) >  $SO_4^{2-}$ (287) >  $Cl^-$ (285) >  $Na^+$ (261) >  $Mg^{2+}$ (14) >  $Ca^{2+}$ (11). Микроэлементы имеют более контрастные превышения над фоном (по  $K_c$ ):  $Mn$ (580) >  $Pb$ (362) >  $Tl$ (107) >  $Ge$ (88) >  $Sr$ (60) >  $Rb$ (43) >  $Co$ (29).

Несмотря на фильтрацию сточных вод солеотвалов и шламохранилищ через почву и грунты, трансформация химического состава подземных вод проявляется не менее ярко, чем поверхностных, особенно по содержанию основных водных мигрантов.

Минерализация достигает 11,6 г/л, концентрация хлоридов увеличивается до 6,9 г/л, натрия до 2,5 г/л и калия до 1,2 г/л при pH 7,1. Среди макрокомпонентов наибольшие коэффициенты концентрации отмечены для  $K^+$ (2046) >  $Cl^-$ (889,2) >  $Na^+$ (275) >  $SO_4^{2-}$ (179,2) >  $Mg^{2+}$ (50,1). Среди микроэлементов превышения над фоном менее значительны, по значению  $K_c$  элементы располагаются следующим образом:  $Pb$ (87) >  $Sr$ (78) >  $Co$ (39) >  $Mn$ (7). Появляются многие редкоземельные элементы, которые не были обнаружены в природных подземных водах (Tm, Sm, Lu, Eu, Yb и др.).

В результате поступления с поверхностным стоком высокоминерализованных сточных вод вблизи отвалов и в местах выхода высокоминерализованных подземных вод на поверхность в долинах рек формируются очаги почвенного засоления. Концентрация водорастворимых солей в почвенном растворе достигает 0,58 %, что соответствует «сильной» степени засоления. Тип засоления содово-сульфатный –  $Cl^-$ :  $SO_4^{2-}$  < 1;  $HCO_3^-$  <  $SO_4^{2-}$  [5].

#### Атмохимический миграционный поток.

Солеотвалы являются не только источником загрязнения гидросферы, но и атмосферы. По оценкам некоторых предприятий калийной отрасли с отвалов сдувается около 3,6 млн тонн вещества в год. При этом необходимо учесть, что в зимнее время воздействие отвалов на химический состав атмосферного воздуха будет

проявляться менее ярко из-за остановки процессов растворения на поверхности отвалов в период отрицательных температур [6].

Даже при отсутствии добывающего комплекса вблизи отвалов наблюдается увеличение содержания приоритетных загрязнителей в атмосферном воздухе – хлорида калия и взвешенных веществ. Например, в населённом пункте, расположенном на расстоянии более 4 км от калийных предприятий, превышение предельно-допустимых максимально разовых концентраций в воздухе (ГН 2.1.3.1983-05) может превышать в 4 раза. Таким образом формируются площадные техногенные аномалии с повышенной минерализацией почвенного покрова.

*Механогенез.* Важную роль в формировании природно-техногенных ландшафтов играет техногенный механогенез. В результате извлечения на поверхность калийных пород на территории Верхнекамского месторождения накоплено более 270 млн т галитовых отходов и более 30 млн м<sup>3</sup> глинисто-солевых шламов [4].

*Седиментогенез* – это совокупность процессов, приводящих к образованию и накоплению осадков. В условиях техногенеза донные отложения водоёмов, рек, озёр и морей свидетельствуют об особенностях современного осадконакопления [7].

Обилие атмосферных осадков и расчленённость рельефа изучаемой территории обеспечивают высокую степень водной миграции химических элементов. В связи с этим возрастает роль донных отложений в перераспределении химических веществ в системе вода – донные отложения.

В водной вытяжке из донных отложений в зоне влияния шламохранилищ и солеотвалов преобладают хлориды – 28 г/л, натрий – 13 г/л, калий – 2,9 г/л при pH 7,2. Относительно фоновых значений ( $K_c$ ) обнаружены превышения для  $Na$ (137) >  $Cl$ (131) >  $K$ (130) >  $SO_4$ (79). Наибольшим значением  $K_c$  среди микроэлементов в донных отложениях обладает Mn ( $K_c$  4).

В донных отложениях рек накапливаются техногенные компоненты. Так, в донных отложениях р. Лёнвы (ниже стока со шламохранилища) были обнаружены сферулы и железные агломераты.

*Оксидогенез* – процессы окисления железа и марганца в условиях свободного доступа воздуха. В природных условиях процессы оксидогенеза могут наблюдаться в лесных подстилках [1], в гидроморфных почвах в верхних

горизонтах формируются ферроксигит, гематит и гетит [8]. На окислительных барьерах в кислых солончаках формируются своеобразные «железные шляпы» в результате накопления оксидов железа [9, 10].

Отходы калийного производства содержат высокие концентрации железа. В галитовых отходах содержание железа изменяется от 380 до 990 мг/кг, а в глинисто-солевых шламах – от 1450 до 4200 мг/кг. Сточные воды солеотвалов и шламохранилищ обогащают поверхностные и подземные воды железом.

В долинах рек в местах выхода высокоминерализованных грунтовых вод на поверхность резко увеличивается содержание железа в водной вытяжке из почв до 88 мг/л. В условиях окислительного режима двухвалентное железо окисляется с образованием гидрогетита, гетита, магматита и других железистых образований. В таких местах формируются пятна охристого цвета с отсутствием растительности. Минералогический анализ верхнего горизонта почв (глубиной 0–2 см) показал, что содержание железистых образований достигает 73,9 % от нерастворимой части пробы, а ожелезнённые растительные остатки – 20 %.

Формирование окислительных барьеров происходит и в донных отложениях р. Лёнва. Высокое содержание Mn на фоне других микроэлементов (Kc 4) свидетельствует об осаждении данного элемента на поверхности донных отложений в окислительных условиях щелочных речных вод.

*Сульфидогенез.* В условиях поступления обогащённых сульфатами техногенных вод в донных отложениях, засоленных почвах и «солёных» болотах усиливаются процессы сульфидогенеза – восстановление серы сульфатов до сероводорода и образования сульфидов [1].

При взаимодействии сульфидов с углекислотой, выделяющейся при разложении органических остатков, образуются углекислые соли и сероводород. Анализ содержания сероводорода в донных отложениях и в почвах в местах площадной разгрузки высокоминерализованных подземных вод в долине р. Лёнва показал резкое увеличение концентрации сероводорода до 23,1 мг/л. Значение показателя Eh изменяется от -198 до -249 мВ, что свидетельствует о развитии резко восстановительных условий.

Высокое содержание сульфатов в поверхностных водах и образование сероводорода способствуют формированию в донных отложениях гидротроилитового горизонта чёрного цвета ниже окислительного горизонта охристого цвета.

В природных условиях гидротроилит – водный сульфид железа – образуется в сульфатных водоёмах степной и пустынной зон [9], где развивается десульфуризация и продуцируется  $H_2S$ .

*Биогенез* – совокупность геохимических процессов, обусловленных созданием и разложением органического вещества в ландшафтах [1].

Для фоновых природных комплексов, как и в целом для растений таёжной зоны, характерно интенсивное накопление марганца, цинка и бария. Коэффициент биологического поглощения данных элементов в зональных природных комплексах превышает 20 [11].

Солевой стресс сопровождается гибелью типичных таёжных видов растений, однако стимулирует захват освобождающихся экотопов солеустойчивыми ассоциациями. На фоне естественной растительности своеобразной растительной формацией выделяются «солёные болота» [5]. Несмотря на очевидное экологическое неблагополучие, обусловленное высоким уровнем засоления, для них характерна весьма устойчивая и продуктивная травянистая формация из сорно-рудеральных и галофитных видов с преобладанием тростника и мари сизой.

Среди микроэлементов в растительности концентрируются Rb и Sr. Коэффициенты концентрации Rb и Sr в почвенном субстрате превышали фон до трёх раз (Kc 1,2–3) [5]. Это свидетельствует о формировании специфической щелочнометалльной биогеохимической аномалии, развивающейся под влиянием двух факторов: повышенной концентрации Rb в промышленном шламе и подщелачивания почвенной среды, вызывающей его осаждение.

В аквальных ландшафтах преобладает макроритная водоросль *Enteromorpha*, семейства *Ulvaceae* (определение выполнено Н.А. Мартыненко). Данный вид является показателем высокого содержания хлоридов [12].

Некоторые из перечисленных ландшафтно-геохимических процессов встречаются в таёжных ландшафтах, например сульфидогенез, седиментогенез, оксидогенез, другие же не характерны для этой природной зоны, например, галогенез. Поступление техногенных высокоминерализованных вод приводит к активизации существующих и появлению новых ландшафтно-геохимических процессов, формированию специфических природно-техногенных систем с высокой минерализацией и преобладанием галогенеза, сульфидогенеза и оксидогенеза в подчинённых наземных

и аквальных ландшафтах в районах добычи калийно-магниевых солей.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания 2014/153.*

### Литература

1. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 350 с.
2. Максимович Н.Г. Проблемы экологии и экономики при освоении минерально-сырьевой базы // Промышленная безопасность и экология. 2006. № 3. С. 27–29.
3. Попов А.Г. Металлогеническое районирование. Пермский край // Вестник Пермского университета. Геология. 2008. Вып. 10 (26). С. 103–110.
4. Бачурин Б.А., Бабошко А.Ю. Эколого-геохимическая характеристика отходов калийного производства // Горный журнал. 2008. № 10. С. 88–91.
5. Максимович Н.Г., Ворончихина Е.А., Хайрулина Е.А., Жекин А.В. Техногенные биогеохимические процессы в Пермском крае // Геориск. 2010. № 2. С. 38–45.
6. Рочев А.В. Формирование минералогической зональности соляных отвалов на Верхнекамском месторождении калийных солей: Дис... канд. геол.-мин. наук. Миасс: Институт минералогии УрО РАН. 2000. 106 с.
7. Опекунов А.Ю. Экологическая седиментология: учеб. пособие. СПб: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2012. 224 с.
8. Водяницкий Ю.Н., Васильев А.А., Кожева А.В., Сатаев Э.Ф. Особенности поведения железа в дерново-подзолистых и аллювиальных оглеенных почвах Среднего Предуралья // Почвоведение. 2006. № 4. С. 396–409.
9. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М: «Астрей-2000», 1999. 768 с.
10. Salama R.B., Otto C.J., Fitzpatrick R.W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization // Hydrogeology Journal. 1999. № 7. P. 46–64.
11. Хайрулина Е.А., Ворончихина Е.А. Оценка современного биогеохимического состояния заповедных экосистем Пермского края // Вестник Пермского университета. Серия Биология. 2007. Выпуск 5 (10). С. 155–160.
12. Унифицированные методы исследования качества вод. М.: СЭВ, 1983. 371 с.