
**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ
И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

УДК 624.131.1:551.252

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ КАРСТА
НА ПОДРАБОТАННОЙ ТЕРРИТОРИИ ВЕРХНЕКАМСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ
В г. БЕРЕЗНИКИ ПЕРМСКОГО КРАЯ**

© 2016 г. **В. И. Осипов, Ю. А. Мамаев, А. А. Ястребов**

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., д.13, стр. 2, Москва, 101000 Россия. E-mail: matmaev47ya@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.07.2015 г.

Статья посвящена характеристике воздействий геохимических факторов на развитие карстовых процессов в надсоляных толщах месторождения калийных солей на территории г. Березники в центре Верхнекамского месторождения в Пермском крае РФ.

Район исследования включает левобережные участки долины р. Камы и прилегающие возвышенности, сложенные коренными осадочными породами пермского возраста. В пределах района исследований активно развиваются суффозионно-карстовые процессы с формированием на земной поверхности многочисленных мульд оседания и крупных провалов. С 1986 по 2014 г. на подработанных территориях Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации (СБ ГПА) образовалось 5 провалов глубиной 80–100 м с плановыми размерами от 80 × 110 до 300 × 400 м. Формирование провалов обусловлено влиянием техногенных и природных факторов, из которых к числу важнейших можно отнести геохимические процессы в надсоляной толще горных пород мощностью около 200 м, перекрывающей соляную толщу.

Показана важная роль геохимического состава подземных вод, газовой составляющей и техногенного загрязнения природных сред в изменении состояния и свойств горных пород, активизации карстового процесса и формировании провалов.

Проанализированы геохимические особенности процессов растворения и массопереноса в карстующихся породах надсоляной толщи калийных залежей. Изучались и оценивались состав, состояние и физико-механические свойства горных пород надсоляной толщи; химический состав подземных вод; воздействие ведущих факторов, определяющих процесс растворения карстующихся пород; изменчивость химических процессов взаимодействия горных пород разного петрографического состава и подземных вод с разной минерализацией и газовой составляющей. Выполненные исследования легли в основу оценки современных инженерно-геологических условий района работ и разработки прогнозов развития опасных геологических процессов, в первую очередь карстовых, обуславливающих оседания и провалы земной поверхности.

Ключевые слова: *надсоляная толща, суффозионно-карстовые процессы, подземные воды, минерализация, свободная углекислота, техногенез.*

Надсоляная толща в центре Верхнекамского месторождения калийных солей включает сверху вниз по разрезу горные породы терригенно-карбонатной (ТКТ) и соляно-мергельной толщ (СМТ), которые залегают над мощной (до 400 м) соляной толщей, включающей продуктивные слои калийно-магниевого солей. Граница раздела соленосных и надсоляных отложений сложная, с зонами фациальных замещений и переходов, сформированных в результате процессов их растворения и массопереноса подземными водами.

Надсоляная толща сложена скальными и полускальными породами низкой прочности трещиноватыми, сильно выветрелыми, закарстованными с водопроводящими трещиноватыми и выщелоченными зонами (коллекторами), которые развиты по всему разрезу. К ним относятся трещинно-кавернозные глинистые известняки, трещиноватые мергели, песчаники и алевролиты терригенно-карбонатной толщи, трещиноватые и кавернозные загипсованные глинистые и известковистодоломитовые мергели соляно-мергельной толщи.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА

Рассматриваемая территория характеризуется сложными гидрогеологическими условиями [2, 3, 5]. На территории выделяют два основных гидрогеологических комплекса подземных вод: четвертичных аллювиальных подземных вод; подземных вод в сложнопостроенной толще пермских отложений.

Комплекс четвертичных аллювиальных подземных вод широко развит на данной территории в границах разноуровневых и разновозрастных аллювиальных террас. Преимущественно это пресные пластово-поровые безнапорные горизонты с инфильтрационным питанием, имеющие тесную гидравлическую связь, в том числе с уровнем Камского водохранилища, абсолютные отметки которого ежегодно циклически изменяются от 101.0 до 109.0 м и превышают естественные (неподсыпанные) отметки поверхности I надпойменной террасы. Глубина залегания уровня подземных вод составляет от 0.3 до 3.0 м. В пределах коренного берегового склона подземные воды могут залегать на глубинах от 5 до 12 м и более. Генеральное направление движения и разгрузка потока подземных вод осуществляются в сторону долины р. Камы.

В комплексе подземных вод коренных пород пермского возраста в зависимости от условий фильтрации выделяются трещинно-грунтовые, пластово-трещинные, трещинно-карстовые и другие типы подземных вод. Подземные воды данного комплекса обладают напором с пьезометрическими уровнями на 10–20 м ниже уровней пресных аллювиальных вод. Минерализация и солевой состав вод весьма различны и изменяются от пресных до рассолов с минерализацией до 300 г/дм³ [3, 5]. Питание подземных вод инфильтрационное, а также за счет перетекания из четвертичных водоносных горизонтов в выветрелые сильно трещиноватые зоны. Разгрузка подземных вод происходит частично в долину р. Камы, в том числе в ее древний переуглубленный врез, глубиной более 100 м.

По условиям залегания, гидрогеологическим и литологическим особенностям водосодержащих пород надсоляной толщи выделяют две гидродинамические зоны: активного и затрудненного водообмена.

В условиях активного водообмена, окислительной среды и дренирующего влияния регионального эрозионного вреза – долины р. Камы, включая ее древнюю переуглубленную долину, формируются пресные подземные воды верхних слоев зоны полного водонасыщения пород. Глубина распространения зоны активного водообмена с наиболее интенсивным протеканием современных гиперген-

ных процессов составляет 40–50 м. Водоносные горизонты имеют тесную гидравлическую связь.

В нижележащих водоносных горизонтах относительно сохранных, слабо выветрелых пород сформирована зона затрудненного водообмена с застойными участками, обусловленными снижением трещинной проницаемости пород. При слабой фильтрации в поровых растворах устанавливается сульфатное и карбонатное равновесие, замедляющее процессы растворения и массопереноса карстующихся пород.

На большей части исследуемой территории подземные воды данного горизонта относятся к солоноватым, соленым и рассолам. По преобладающим компонентам химического состава они хлоридные натриевые, химический тип их – сульфатный, подтип – сульфатно-натриевый или хлоридно-магниевый. Разгрузка солоноватых, соленых подземных вод и рассолов происходит в западном направлении в сторону переуглубленной долины р. Пра-Камы.

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАДСОЛЯНОЙ ТОЛЩИ

Для подземных вод надсоляной толщи в районе г. Березники характерно природное высокое содержание хлора, железа, марганца и других компонентов.

В целом на данной территории в условиях ненарушенного гидрохимического режима подземных вод установлена закономерность изменения состава и минерализации подземных вод с глубиной. В верхней части разреза развиты пресные гидрокарбонатные, реже сульфатные воды, с минерализацией 0.2–0.3 г/дм³, в средней – солоноватые и соленые сульфатные, сульфатно-натриевые воды, в нижней – рассолы от слабых до высококонцентрированных с сульфатно-натриевым и хлоридно-магниевым составом.

Один из источников, обуславливающий нарушение гидрогеохимического режима подземных вод, – высокоминерализованные соленые шахтные воды калийных рудников с большим содержанием загрязняющих веществ, которые могут подниматься по горным выработкам и разгружаться в вышележащие водоносные горизонты.

Значительное влияние на изменение гидродинамического режима и химического состава подземных вод оказывает также постоянная откачка пресных вод объемом около 150 тыс. м³/сут из надсолевых водоносных горизонтов. Помимо истощения запасов пресных вод это способствует попаданию в пресные водоносные горизонты терригенно-карбонатной толщи некондиционных глубинных высокоминерализованных вод соляно-

Большой удельный вклад в этот процесс вносит карбонатный карст в терригенно-карбонатных толщах пород. Факторы его активизации в данном районе – ежегодные циклически меняющиеся процессы подтопления территории и обводнения массивов горных пород водами Камского водохранилища, а также сильная загрязненность атмосферного воздуха, почв, грунтов, подземных и поверхностных вод выбросами, выпусками и отходами химических производств. Карбонатные породы рассматриваемой территории распространены по всему геологическому разрезу надсоляной толщи и представлены почти всеми известными петрографическими разностями: известняками, доломитами, мергелями и карбонатными глинами. В разрезе толщи отсутствует мел.

Растворимость карбонатов, как и других пород группы простых солей, определяется химико-минералогическим составом пород, их структурно-текстурными особенностями, типом и свойствами растворителя, а также термодинамическими условиями (давлением и температурой), в которых развивается процесс растворения. На растворимость карбонатных пород влияют содержание свободной углекислоты в растворах, а также микробиологические процессы в грунтах.

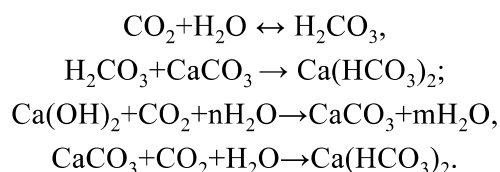
В геологической истории Земли известны периоды, когда содержание диоксида углерода в атмосфере и подземных водах в несколько раз превышало его содержание в настоящее время. Эти периоды приходились на времена, наступавшие после глобальных катастроф на Земле: глобальные вулканические процессы, столкновения с астероидами и др. Терригенно-карбонатные породы верхней перми, слагающие с поверхности на глубину территорию Верхнекамского месторождения солей и имеющие возраст около 300 млн лет, как минимум дважды, примерно 149 и 65 млн лет назад, переживали такие периоды, что не могло не отразиться на их строении, состоянии и свойствах.

Современный период также характеризуется повышенным содержанием диоксида углерода в атмосфере, обусловленным техногенезом.

На рассматриваемой территории в настоящий период ее геологического развития созданы условия, при которых на карбонатные породы надсоляной толщи воздействуют все виды химической агрессивности водных растворов: выщелачивающая, магниезиальная, общекислотная, сульфатная и углекислотная.

Углекислотная (карбонатная) агрессивность часто возникает совместно с выщелачивающей агрессивностью за счет формирования в поровых растворах углекислоты H_2CO_3 , которая разрушает

карбонатные породы. Этому содействует повышенное содержание в растворах свободной CO_2 , которое приводит к образованию растворимых бикарбонатов кальция, способных к выщелачиванию:



Необходимо подчеркнуть важное значение для интенсификации процессов растворения и выщелачивания карбонатных пород и в целом активизации карста, присутствие в подземных водах района большого количества свободной углекислоты, которое может изменяться от 7–9 мг-экв/дм³ (условно фонового значения) до 50, 100 и даже 300 мг-экв/дм³ на участках сильного химического загрязнения. Такое большое содержание свободной углекислоты в подземных водах сформировалось за сравнительно непродолжительное время и продолжает увеличиваться. По приближенным оценкам это может ускорять процесс карстообразования в карбонатных породах в 30–40 раз [4].

Присутствие свободной углекислоты в поровых растворах обусловлено в том числе диссоциацией метана в водной среде: $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$, накопление которого может происходить при выщелачивании массивов соляных пород, залегающих на глубине, и дегазации деформируемых тектоническими и/или техногенными процессами толщ горных пород и заземленных газозащитных шапок в подземных выработках.

Насыщению массивов горных пород метаном и двуокисью углерода способствуют газовые эманы с поверхности семи нефтяных месторождений, открытых и эксплуатируемых на площади Березниковских калийных рудников.

Газоносность пород промышленных пластов калийных солей, например, сильвинита, обусловленная связанными газами: внутрикристаллическими, межкристаллическими, адсорбированными на поверхности кристаллов, пор и трещин, в объемном выражении оценивается не более 0.1 м³/м³ с примерным компонентным составом: азот – до 50%, углекислый газ (CO_2) – до 15%, метан (CH_4) – до 4%, тяжелые углеводороды – до 2%, водород (H_2) – 1%. Газоносность, обусловленная свободными газами, характеризуется большим объемом – до 0.4 м³/м³ и несколько другим компонентным составом: азот – 85%, метан – до 15%, тяжелые углеводороды – до 3%, углекислый газ и водород – до 1%. Обнаружение в скважинах в составе подпочвенного газа гелия и водорода может свидетельствовать о глубинном потоке газов,

свободно разгружающихся в атмосферу по трещинам. Местами скопления свободных газов могут быть: участки интенсивного смятия соляных пластов в складки, локальные зоны замещения сильвинитовых слоев каменной солью и глиной, зоны тектонических нарушений.

Фильтрация подземных вод через известняковые толщи приводит к еще большему повышению агрессивности поровых растворов и ускорению процессов растворения и окисления карбонатных пород.

По данным гидрохимических мониторинговых исследований в наблюдательных скважинах на участке провалов № 2 (2010 г.) и № 3 (2011 г.) установлен факт существенного увеличения минерализации и концентрации отдельных химических элементов подземных вод в период, предшествующий провалам земной поверхности [1].

Механизм, объясняющий увеличение минерализации подземных вод в приповерхностной части геологического разреза, а также рост концентраций отдельных химических элементов (брома, кальция, калия и других) в процессе приповерхностных и внутрипластовых обрушений стенок провалов и (или) искусственной засыпки шахты (воронки) карстового провала, может быть описан следующим образом.

В процессе засыпки шахты, заполненной водой, по мере увеличения объема ее засыпки происходит вытеснение сильно минерализованных вод глубоких горизонтов вверх к дневной поверхности. При этом происходит формирование восходящих конвекционных потоков, доставляющих вверх сильно минерализованные воды, что и фиксируется гидрохимическим опробованием наблюдательных скважин.

При обрушении стенок карстовой шахты (расширение ее плановых размеров) или провале искусственной засыпки (как на провале № 3 шахтного поля БКПРУ-1), очевидно, происходит кратковременное значительное увеличение (всплеск) минерализации подземных вод вблизи дневной поверхности, а затем связь с глубоко залегающими сильно минерализованными водами прекращается. Минерализация вод довольно быстро начинает снижаться до условно фоновых значений в результате устойчивой фильтрации подземных вод в сторону р. Камы.

Анализируя данный пример как аналог процессов деформирования и разрушения толщ горных пород на глубине, на уровне заложения подземных выработок затопленных рудников, можно сделать заключение, что в указанном районе на участках развития заметных деформаций земной поверхности в наблюдательных гидрогеологичес-

ких скважинах могут фиксироваться повышенные значения минерализации подземных вод и концентрации отдельных химических элементов, которые следует рассматривать как индикаторы-предвестники активизации опасных процессов разрушения массивов пород на глубине, с возможным отражением их на поверхности в виде роста величин и скоростей деформаций земной поверхности и, в крайнем случае, образования воронок или провалов.

Выполненные исследования подтвердили разноплановый и сложный характер геохимических условий и процессов в надсолевой толще пород калийных месторождений, а также влияние природных и техногенных геохимических факторов на развитие карстовых процессов. Их учет необходим при анализе результатов комплексных мониторинговых наблюдений и разработке защитных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В.П., Костикова И.А. О связи изменений химического состава подземных вод территории г. Березники с развитием провальных процессов // Геоэкология. 2015. № 6. С. 505–513.
2. Зверев В.П., Мигунов Л.В. Термодинамическое моделирование гидрогеохимических процессов в надсолевой толще Верхнекамского района // Литология и полезные ископаемые. 1994. № 2. С. 78–85.
3. Максимович Н.Г., Первова М.С. Влияние перетоков минерализованных вод Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей на приповерхностную гидросферу // Инженерные изыскания. 2012. № 1. С. 22–28.
4. Мамаев Ю.А. Эколого-геологическая обстановка территорий старых металлургических заводов Урала // Тр. Междунар. конф. “Эволюция инженерно-геологических условий Земли в эпоху техногенеза”. М.: Изд-во МГУ, 1997.
5. Трофимов В.И., Кочнева М.Н. Гидрогеологическое прогнозирование карстовых процессов на шахтном поле БКПРУ-1 ОАО “Уралкалий” // Горное эхо. 2012. Вып. 2. Пермь: ГИ УрО РАН. С. 33–45.

REFERENCES

1. Zverev, V.P., Kostikova, I.A. *O svyazi izmenenii khimicheskogo sostava podzemnykh vod territorii g. Berezniki s razvitiem proval'nykh protsessov* [Relationship between the groundwater chemical composition and ground collapse development in Berezniki area]. *Geoekologiya*, 2015, no. 6, pp. 505–513 (in Russian).
2. Zverev, V.P., Migunov, L.V. *Termodinamicheskoe modelirovanie gidrokhimicheskikh protsessov v nadsolevoi*

- tolshche Verkhnekamskogo raiona* [Thermodynamic simulation of hydrogeochemical processes in the above-salt massif in Verkhnekamskii region]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1994, no. 2, pp. 78–85 (in Russian).
3. Maksimovich, N.G., Pervova, M.S. *Vliyanie perezotov mineralizovannykh vod Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliino-magnievyykh solei na pripoverkhnostnyuyu gidrosferu* [Effect of mineralized water overflow on the surface hydrosphere in the Verkhnekamskoe deposit of potassium-magnesium salts]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2012, no. 1, pp. 22–28 (in Russian).
 4. Mamaev, Yu.A. Ecological and geological conditions in the area of old metallurgical works. *Trudy Mezhdunar. Konf. "Evolyutsiya inzhenerno-geologicheskikh uslovii Zemli v epokhu tekhnogeneza"* [Proc. Intern. Conf. "Evolution of Engineering Geological Conditions on the Earth in the Era of Technogenesis"], Moscow, MGU, 1997. (in Russian).
 5. Trofimov, V.T., Kochneva, M.N. *Gidrogeologicheskoe prognozirovaniye karstovykh protsessov na shakhtnom pole BKPRU-1 OAO "Uralkalii"* [Hydrogeological prediction of karst processes in the mine field BKPRU-1 OAO "Uralkalii"], *Gornoe ekho*, 2012, issue 2, Perm, Mining Institute, Ural Division RAS Publ., pp. 33–45 (in Russian).

GEOCHEMICAL SPECIFICS OF KARST DEVELOPMENT IN THE MINED AREA OF VERKHNEKAMSKOE POTASH SALT DEPOSIT, BEREZNIKI, PERM KRAI

V. I. Osipov, Yu. A. Mamaev, A. A. Yastrebov

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences
Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: mamaev47ya@mail.ru*

The paper assesses the impact of geochemical factors on karst development in the above-salt massifs in the center of Verkhnekamskoe potash salt deposit, in the town of Berezniki, Perm krai, Russia. The study area involves the left-bank sites of the Kama River valley and the adjacent upland composed of Permian sedimentary bedrock. Suffosion and karst develop intensely in this area promoting the formation of numerous surface subsidence landforms and large sinkholes. Five collapses occurred within the mined area of Solikamsk-Berezniki urban industrial agglomeration since 1986 till 2014 to produce sinkholes of 80–100 m deep and ranging in size from 80 × 110 to 300 × 400 m. Sinkhole formation was induced by both technogenic and natural factors, the geochemical processes in the above-salt rock massif (of about 200 m thick) being among the most important.

The important role of groundwater geochemistry, gas component, and technogenic contamination of the environment in the transformation of rock properties and state, as well as in karst intensification and collapse formation is shown.

The geochemical specifics of dissolution and mass transfer in karstified rocks of the above-salt massif in the potash salt deposit area are analyzed. The following parameters were studied and estimated: composition, state, and physico-mechanical properties of above-salt rock massif; chemical composition of groundwater; the impact of leading factors controlling the dissolution of karst-prone deposits; variability of chemical interaction between different petrographic varieties of rocks and groundwater of different mineralization and gas content. The studies performed formed the basis for the assessment of present-day engineering geological conditions in this area and for the prediction of geohazard development, karst, resulting in surface settling and sinkholes, above all.

Keywords: *above-salt massif, suffusion and karst, groundwater, mineralization, carbon dioxide, technogenesis.*