
**ПРИРОДНЫЕ
И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

УДК 556.114

**ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ КАРСТА
В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

© 2015 г. В. П. Зверев, И. А. Костикова

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

Поступила в редакцию 01.10.2014 г.

Карст рассматривается как геологический и физико-химический процесс взаимодействия природных вод с растворимыми горными породами. Его развитие возможно только при наличии неравновесных условий в системе подземные воды и конгруэнтно растворимой горной породы. Показано, что активный процесс образования карста, приводящий к образованию подземных полостей и ходов, возможен при наличии конвективного массопереноса растворенного вещества, способного в сравнительно короткие отрезки времени перераспределять значительные его массы. Особенности развития карста рассмотрены на примерах его образования в карбонатных, сульфатных и хлоридных растворимых горных породах.

Ключевые слова: карстовый процесс, методы изучения, подземные воды, растворение, термодинамический анализ, индекс неравновесности, карст в известняках, гипсах и каменной соли.

Необходимость изучения карстового процесса в нашей стране наиболее остро обозначилась в конце 1930 – начале 1950 гг. в связи с началом проектирования и строительства крупных гидроэлектростанций в бассейне р. Волги, где в их основании часто залегали растворимые горные породы: известняки и гипсы [23]. Большую роль в изучении карста сыграли и освоение месторождений полезных ископаемых, расположенных в районах распространения растворимых горных пород, и активное строительство промышленных объектов, проводившееся на начальных этапах без достаточно профессионального инженерно-геологического сопровождения.

Важнейшим этапом изучения карста в нашей стране стало проведенное Отделением геолого-географических наук АН СССР в 1956 г. Научное совещание по изучению карста [36], на котором были подведены итоги его исследования, но, в то же время, выявлены различные подходы к изучению карста, обусловленные в основном научными интересами исследователей: геологов, инженер-геологов, географов и гидрогеологов.

Несмотря на то, что с того времени прошло более полувека, методологические подходы к изучению карста остались прежними.

Наибольшее развитие получили работы географического направления [4–7, 14, 21–23, 35 и др.], включающие исследования морфологии поверхностных форм проявления карста: провалов, воронок, карров, польев, создающих специфический карстовый ландшафт, и позволяющих проводить районирование территорий по степени распространения карста. Обычно развитие карстового процесса в том или ином районе устанавливается по проявлению поверхностных карстовых форм – воронок и провалов. Воронки, как правило, имеют достаточно древнее происхождение, а провалы образуются в современное время, но об их возникновении в большинстве случаев становится известно обычно уже постфактум.

Естественно, что в последнее время наибольшее внимание стали уделять исследованиям механизмов образования современных карстовых провалов, реализуемых в более молодых осадочных толщах, перекрывающих растворимые горные породы [1, 2, 18, 30, 36–39 и др.]. Это как механические карстово-провальные формы, образующиеся в результате обрушения кровли полостей карстового происхождения, так и карстово-суффозионные процессы, возникающие в районах перекрытия растворимых пород песчаными толщами и связанные с изменением гидродинами-

ческого режима подземных вод. Все это лишь косвенно указывает на современную реализацию процесса и не позволяет надежно прогнозировать его развитие в будущем ни в пространстве, ни во времени.

Собственно карст, как показали Ф.П. Саваренский [33] и Д.С. Соколов [34], – это геологический и физико-химический процесс взаимодействия природных вод с растворимыми горными породами, который неизбежно развивается там, где имеется одновременное сочетание растворимых и водопроницаемых горных пород и растворяющих их движущихся подземных вод.

К сожалению, в последние десятилетия применение гидрогеохимических и физико-химических методов изучения процессов развития карста из-за их большой трудоемкости и недостаточно высокого профессионализма изыскателей существенно снизилось.

В связи с этим авторы считают необходимым остановиться на этом, по их мнению, необходимом направлении изучения карста более подробно.

Основные хорошо растворимые породобразующие минералы – кальцит, доломит, гипс, ангидрит и галит. Растворимость кальцита, входящего в состав известняков, мергелей, мела, мрамора и т.п., в дистиллированной воде – 0.013 г/л, а в природных водах в зависимости от давления CO_2 достигает первых сотен миллиграммов на 1 л. Растворимость гипса изменяется от 2.1 г/л в маломинерализованных водах до 7.3 г/л в растворах NaCl. Наибольшей растворимостью обладает галит – до 318 г/л.

Как и всякая гетерогенная реакция взаимодействия воды и породы, образование карста складывается из трех отдельных стадий [9]:

- поступление растворителя – природных вод к поверхности горной породы (известняков, доломита, гипса, каменной соли),
- собственно процесс конгруэнтного растворения, при котором вещество пород полностью переходит в растворенное состояние,
- удаление растворенных в воде продуктов реакции от поверхности растворения.

Поскольку параметры системы, в пределах которой происходит образование карста, практически неизменны, растворение пород в подземных водах обуславливается величиной градиента концентрации между жидкой фазой и насыщенным пограничным слоем, существование которого

предполагается на поверхности растворяющегося тела.

Взаимодействие между горными породами и природными водами, изменение минерального вещества которых направлено к равновесию с гидрогеохимической средой, можно рассматривать как отдельные химические реакции растворения [17]. Начальные продукты этих реакций – растворимые минералы и вода, конечные – ионы и нейтральные молекулы, перешедшие в результате взаимодействия в жидкую фазу, или, если начальное минеральное вещество полностью перешло в водный раствор, только последние. Для каждой реакции растворения определены и табулированы термодинамические константы равновесия для стандартных условий – K° .

Энергетически каждая реакция определяется суммой свободных энергий образования продуктов реакций в их свободном состоянии ($\Delta G^\circ_{\text{прод. реакц.}}$) минус сумма свободных энергий образования исходных веществ в их свободном состоянии ($\Delta G^\circ_{\text{исход. вещ.}}$):

$$G^\circ_{\text{реакц}} = \Delta G^\circ_{\text{прод. реакц}} - \Delta G^\circ_{\text{исход. вещ.}}$$

Свободная энергия реакции в стандартном состоянии ($G^\circ_{\text{реакц}}$) связана с константой равновесия следующей зависимостью: $\Delta G^\circ_{\text{реакц}} = -1.364 \ln K^\circ$. Используя понятие активностей и переходя к десятичным логарифмам, это уравнение можно записать в виде, где T – температура реакции:

$$\Delta G^\circ_{\text{реакц}} / (2.303T) = \lg a_{\text{прод. реакц}} / a_{\text{исход. вещ.}} - \lg K^\circ, \\ \lg K^\circ / (a_{\text{прод. реакц}} / a_{\text{исход. вещ.}}) = \Delta G^\circ_{\text{реакц}} / (2.303T).$$

Используя эти соотношения, можно подойти к оценке равновесно-неравновесных условий, существующих между природными водами и практически любым минералом. В стандартных условиях (25 °C и 1 атм), близких к условиям поверхностных и приповерхностных частей земной коры, степень неравновесности природных вод с определенным минералом рассчитывается для конкретной системы, содержащей химические элементы, входящие в состав данного минерала, по уравнению

$$I = \lg (a_{\text{прод. реакц}} / a_{\text{исход. вещ.}}) / K^\circ = \lg Q / K^\circ,$$

где Q – квотант реакции [3].

Т. Пачес [41] степень неравновесности назвал индексом неустойчивости (disequilibrium index). Чем меньше величина I , тем дальше находится рассматриваемая система от состояния равновесия, и тем больше неравновесность природных

вод по отношению к изучаемому минералу. Изучение равновесно–неравновесного состояния между различными типами подземных вод и основными породообразующими минералами в системе вода – растворимая порода, позволяет судить о возможности их растворения в условиях данной гидрогеохимической среды, т.е. является первым и необходимым шагом в изучении процессов развития карста.

Характер растворения во многом связан с распределением свободной энергии поверхностного слоя минерала. В общем виде чем выше свободная энергия на поверхности минерала, тем более растворим и реакционно способен кристалл в этом месте. Обычно это участки дислокаций, где при взаимодействии кристалла с раствором образуются конические ямки травления. При высоких значениях агрессивности раствора удаление вещества контролируется конечными скоростями диффузии растворяемых компонентов. В результате углы растворяются быстрее, чем ребра, а ребра быстрее, чем грани. Кристалл при растворении стремится принять форму сферы или эллипсоида.

Поскольку мелкие частицы имеют очень большую поверхность, свободная энергия поверхности вносит значительный вклад в общую свободную энергию частиц. Следует отметить, что поверхностная свободная энергия в водных системах всегда положительна. Небольшие частицы всегда менее устойчивы и растворяются быстрее, чем крупные. Скорость процессов растворения кальция, ангидрита, гипса и галита контролируется режимом диффузионного массопереноса [40].

Начальная скорость растворения наиболее распространенных минералов [16] варьирует в широких пределах: от 10^{-17} до 10^{-7} моль/см²с. Скорость растворения минералов во многом определяет время достижения равновесия в системе вода – порода.

Физико-химические, термодинамические и кинетические методы изучения взаимодействия в системе вода – порода впервые были использованы Н.В. Родионовым [31], Д.С. Соколовым [34], В.П. Зверевым [8] и другими исследователями для выделения участков развития современного карстового процесса в конкретных геологических и гидрогеологических условиях изучаемого района.

Собственно карстовый процесс, приводящий к образованию подземных полостей и ходов, возможен при наличии конвективного массопереноса растворенного вещества подземными водами,

способного в сравнительно короткие отрезки времени перераспределять значительные массы. При движении подземных вод по трещинам или уже по новообразованным ходам значение индекса неравновесности в системе вода – растворимая порода постепенно возрастает, и процессы растворения породы и образования карста постепенно затухают до полного прекращения.

Подобные методы в свое время были успешно использованы одним из авторов в исследованиях карста района г. Дзержинска в низовьях р. Оки, а также при оценке устойчивости гипсов в основаниях действующих и проектируемых гидротехнических сооружений Предуралья [8, 11].

Наиболее характерный пример развития гипсового карста изучен в районе г. Дзержинска на левом берегу р. Оки, несколько выше Нижнего Новгорода [13]. Верхняя часть разреза горных пород в долине р. Оки сложена мощной (до 50–60 м) толщей песчаных аллювиальных отложений, залегающих как на отдельных прослоях глин и алевролитов уржумского и разрушенных известняках и доломитах казанского яруса верхней перми, так и непосредственно на гипсах-ангидритах сакмарского яруса нижней перми. Поток подземных вод, имеющих инфильтрационное питание, в долине реки направлен поперек ее русла к основной дрене, где и происходит его разгрузка, осложняясь на отдельных участках влиянием водозаборов.

Ярким показателем процесса развития карста в районе г. Дзержинска служит изменение индекса равновесно–неравновесного состояния в системе подземные воды–гипсы (таблица), значения которого закономерно изменяются от резко отрицательных – высоко неравновесные (–2.327– –1.634) в верхних частях четвертичной аллювиальной толщи, через промежуточные в известняках и доломитах казанского яруса (–0.826– –0.215) и на границе с гипсами сакмарского яруса (–0.066– –0.004), до положительных – равновесных (0.07–0.004) в толще гипсов сакмарского яруса. Отрицательные значения индекса неравновесности подземных вод (–0.05– –0.430), разгружающихся в долине р. Оки в виде источников, показывают, что процесс растворения гипсов в зависимости от скорости движения подземных вод может как заканчиваться в толще породы по мере достижения равновесного состояния, так и продолжаться на всем пути движения подземных вод от области питания до мест разгрузки.

Основное растворение пластов гипса происходит с их поверхности, создавая аккумуляцион-

Индексы неравновесности (I) в системе подземные воды – гипсы в районе г. Дзержинска

Скважина	Возраст	Глубина, м	Минерализация, мг/л	Концентрация, мг/л		Индекс неравновесности I
				Ca	SO ₄	
Скв. 46	Q	19.5	211.9	30.1	32.9	-2.327
Скв. 46	Q	44.5	737.4	158.3	388.5	-0.826
Скв. 46	Q	60	1629.1	420.8	1055.1	-0.215
Скв. 46	P _{1s}	97	2230.4	611.2	1501.1	-0.004
Скв. 71	Q	35	253.0	52.1	103.7	-1.634
Скв. 71	P _{2kz}	54	980.2	254.5	600.8	-0.529
Скв. 71	P _{2kz}	93	2746.4	631.3	1639.4	-0.01
Скв. 748	Q	7.2	253.0	34.0	149.8	-1.666
Скв. 749	P _{2kz}	31.2	1653.3	438.1	1002.4	-0.217
Скв. 748	P _{2kz}	53.65	4379.6	626.3	2255.0	0.07
Скв. 732	P _{2kz}	44.9	243.1	64.5	72.4	-1.716
Скв. 732	P _{2kz}	48.5	919.3	228.8	508.6	-0.628
Скв. 724	P _{2kz}	61.2	1509.9	400.2	1027.1	-0.328
Скв. 79		105	5588.5	648.3	2105.2	-0.044
Скв. 74	P _{1s}	97.3	6062.2	801.6	2128.3	0.004
Родник 149			1065.3	300.6	686.4	-0.430
Родник 538			1508.7	403.8	977.7	-0.242
Родник 132			1050.3	551.1	1309.2	-0.066
Родник 60			2060.0	574.5	1396.0	-0.050

ные емкости. Их масштабы (размеры) и наличие мощной песчаной аллювиальной толщи контролируют интенсивность развития суффозии, что и приводит к образованию провалов и воронок на поверхности (рисунок). Естественное растворение гипсов сопровождается переходом в жидкую фазу соответствующей массы горной породы. По нашим данным, с левого берега р. Оки, площадью ~90 км², включая территорию города, ежегодно выносится 1.15×10^{10} г гипса, т.е. интенсивность его выщелачивания составляет 4.05 г/км²·с, что дает представление об объемах выщелачиваемых пород и соответственно о масштабах развивающейся суффозии. Конечно, это осредненные дан-

ные, которые могут быть значительно больше или меньше в конкретном месте [9].

Наибольшее значение оценка возможности развития современного карстового процесса имеет при гидротехническом строительстве в районах распространения растворимых горных пород и особенно гипсов и соляных пород.

Примером удачного прогноза развития карстового процесса могут служить исследования, выполненные в основании Камской ГЭС, где на сравнительно небольшой глубине под плотиной залегают ангидриты и гипсы кунгурского яруса перми. При изысканиях и строительстве ГЭС

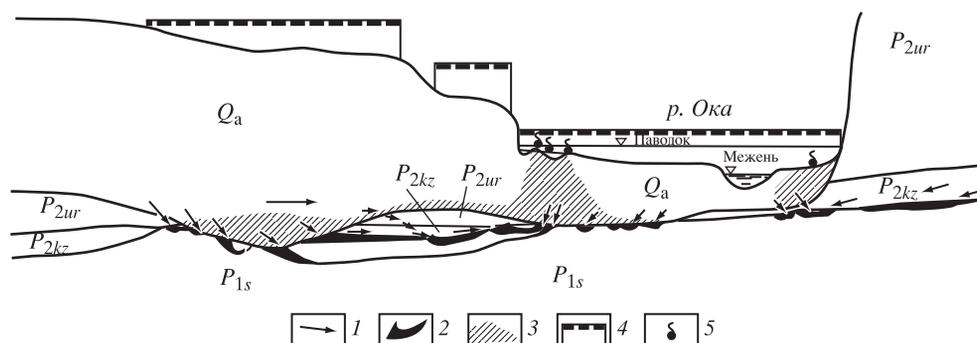


Схема развития гипсового карста на Русской платформе (нижнее течение р. Оки). 1 – направление движения неравновесных с гипсом подземных вод выщелачиваемых отложений; 2 – места развития карстовых полей и каналов; 3 – участки повышенной минерализации аллювиальных вод в местах разгрузки карстовых вод; 4 – районы вероятного образования на поверхности карстовых форм рельефа; 5 – разгрузка карстовых вод на поверхность.

было показано, что подземные воды, контактирующие с сульфатными породами, не агрессивны по отношению к сульфату кальция, и поэтому был сделан вывод, что ожидать развития карста под плотиной не приходится [28, 29].

Однако достаточно активная фильтрация под плотиной подземных вод уржумского и верхне-соликамского водоносных горизонтов, питание которых существенно возросло в пределах водохранилища, привело к значительному снижению минерализации подземных вод под плотиной. В результате на отдельных участках подземные воды верхне-соликамского водоносного горизонта, контактирующие с гипсами, стали достаточно агрессивными по отношению к ним [8, 20, 25, 26].

Выполненные в 1968 г. по заданию “ГИДРО-СПЕЦПРОЕКТА” специальные исследования, в рамках проекта “Опытно-инъекционные (изыскательские) работы по “химическому” уплотнению существующей противофильтрационной завесы в основании бетонной водосливной плотины Камской ГЭС”, подтвердили, что под плотиной в тех же местах продолжался рост агрессивности к гипсам подземных вод, которые достигли находящихся под плотиной растворимых гипсов, и что можно ожидать развития процесса их растворения с вытекающими последствиями. На основании этого было принято решение о существенном укреплении находящейся под плотиной и зданием ГЭС мощной цементационной завесы, что со временем было выполнено, и Камская ГЭС благополучно работает до настоящего времени.

Удивительно, что в монографии “Безопасность плотин на растворимых породах (на примере Камской ГЭС)” [24], вышедшей в г. Пермь, исследования степени агрессивности подземных вод по отношению к гипсам, изложенные выше и положенные в обоснование проекта укрепления цементационной завесы плотины Камской ГЭС, даже не упомянуты.

При изысканиях под створ проектировавшейся Верхнекамской ГЭС, чуть выше г. Соликамска, основная проблема заключалась в необходимости сохранения пластов каменной и даже калийных солей, залегавших частично в основании и в левом борту проектируемой плотины. Изученный район включает Соколовскую брахисинклиналь и Соликамскую брахиантиклиналь, выполненные породами уфимского и кунгурского ярусов верхней перми. В пределах первого (сверху) водоносного горизонта химический состав подземных вод, дренируемых р. Камой, постепенно изменя-

ется с глубиной от гидрокарбонатных смешанного катионного состава с минерализацией 0.2–0.5 г/л через сульфатно-хлоридные натриевые (M 1.0–0.0 г/л) до хлоридно-натриевых (M 30–300 г/л).

Детальное изучение минералогических и гидрогеохимических условий возможности сохранения хорошо растворимых горных пород в основании гидротехнических сооружений при фильтрации под плотиной на примере проектирования Верхнекамской ГЭС [11, 27], показало, что сохранение каменных и калийных солей, сверху и снизу повсеместно фациально переходящих в гипсы, от выщелачивания в этом районе возможно лишь при поддержании гидрогеохимического режима подземных вод, обеспечивающего устойчивость гипсов, находящихся в состоянии постоянно поддерживаемого химического равновесия с циркулирующими на контакте с ними подземными водами и защищающих от растворения гипсы.

Если необходимость исследования современной карстовой активности в гипсах и ангидритах гидрогеохимическими методами сомнений не вызывает, то для карбонатных пород она менее очевидна. К сожалению, многие специалисты, исходя из низкой растворимости карбоната кальция и считая, что его растворение в современную эпоху не происходит, полагают, что образование провалов в этих породах контролируется только механическим разрушением закарстованных в предыдущие эпохи карбонатных толщ и процессами суффозии [18, 19].

Наиболее существенное влияние антропогенные процессы оказывают на активизацию карстовых процессов в карбонатных породах в пределах крупных городских агломераций, где происходит значительное изменение как гидрогеохимических, так и гидродинамических параметров. В результате увеличивающихся водоотборов подземных вод и все возрастающих потерь из городских и промышленных коммуникаций происходит резкое увеличение интенсивности водообмена (в 10 раз и более) и, как следствие, увеличение скорости движения подземных вод и соответственно скорости растворения карбонатов кальция.

Детально особенности и масштабы современного развития карста рассмотрены на примере территории г. Москвы, где карстовые процессы обусловлены наличием мощной (до 200 м) толщи растворимых и водопроницаемых карбонатных пород карбона, залегающих на глубине нескольких десятков метров под терригенными мезозойско-кайнозойскими отложениями. Развитие собственно карстовых процессов в этих породах

было приурочено к временам континентальных перерывов, отмечавшихся в раннем и среднем карбоне, перми и на границе юры и мела. С конца позднего мела континентальный этап развития территории продолжается и до настоящего времени. Считается, что наиболее активно карст развивался вблизи крупных эрозионных врезов. Современные проявления карста на территории г. Москвы наблюдаются в пределах сравнительно узкой полосы надпойменной террасы на левом берегу р. Москвы на северо-западе города.

В естественных ненарушенных условиях к породам карбона был приурочен мощный напорный водоносный горизонт, разгрузка которого осуществлялась в основном в долинах р. Москвы и низовьев р. Яузы. В процессе фильтрации от областей питания, находящихся в основном южнее г. Москвы, вода каменноугольных отложений постепенно приходила в равновесие с карбонатными породами, что служило защитой от растворения известняков и образования современного карста на территории города.

Развитие г. Москвы, расширение границ города в XIX и XX вв., рост промышленности и населения требовали постоянного увеличения объемов водоснабжения. Широко использовались как подземные, так и поверхностные воды, в результате чего гидрогеологические условия территории Московской городской агломерации претерпели существенные изменения. В результате интенсивной эксплуатации подземных вод каменноугольных отложений и, в первую очередь, подольско-мячковского горизонта, а также под влиянием откачек при строительстве метрополитена в пределах в основном центральной части Москвы произошло значительное снижение их пьезометрических уровней, опустившихся ниже уровня грунтовых вод. Были созданы благоприятные условия для перетока вод через гидрогеологические «окна» в пределах долин рек Москвы и Яузы в нижележащие горизонты карбонатных закарстованных пород и для резкого увеличения интенсивности водообмена. В результате возникли условия для потерь воды и из русел рек. Их доля в общем балансе подземных вод территории Москвы, по данным В.С. Ковалевского [16], возросла практически от 0 до 45%. Одновременно с этим возросло питание подземных вод за счет различных утечек из водопроводных и канализационных сетей.

Все это в свою очередь привело и к существенному изменению гидрогеохимических условий. Если в естественных условиях высокие напоры подземных вод способствовали сохранению в ка-

менноугольном водоносном горизонте более или менее закрытой системы с невысокими парциальными давлениями CO_2 , то развитие депрессионной воронки привело к созданию благоприятной обстановки для формирования открытой системы и увеличению парциального давления CO_2 до значений, характерных для грунтовых вод: $10^{2.5}$ – $10^{3.2}$ Па. Одновременно с этим происходит увеличение концентрации водородных ионов и снижение величины рН вод каменноугольных отложений от 7.7–8.04 до 5.7–6.5.

Другой важный фактор, который должен влиять на развитие карстового процесса, – наблюдаемое с начала 1960 гг. увеличение кислотности атмосферных осадков, периодически отмечаемое в гумидной зоне Европейской России, в том числе и в пределах Московской городской агломерации [12]. Оно заключается в увеличении концентрации ионов SO_4^{2-} и H^+ , т.е. в снижении величины рН, которое составляет в среднем 5.0–5.5, достигая в отдельных случаях 4.0–4.5.

Термодинамическое моделирование, выполненное с использованием программы SOLMINEQ [42], позволило оценить индекс равновесно-неравновесного состояния всех типов природных вод, включая атмосферные осадки, подземные воды зоны активного водообмена и подземные воды, циркулирующие в подверженных карстообразованию карбонатных породах, по отношению к карбонату кальция в Хорошово – в районе наиболее активного карстопроявления в г. Москва.

Установлено, что индекс неравновесности в фоновом составе атмосферных осадков, составляет –5.143, в кислых осадках –6.209, в подземных водах, залегающих выше карбонатной толщи –1.328, и –0.788 и +0.354 соответственно в верхней и нижних частях подольско-мячковского горизонта каменноугольной карбонатной толщи.

Полученные данные позволяют заключить, что в современных условиях, обусловленных антропогенной деятельностью, в процессе инфильтрации атмосферных осадков в толщу пород, особенно во время активного снеготаяния, происходит постепенное выщелачивание карбонатных разностей, включая дресву в древних карстовых воронках [12], вскрытых бурением в этом районе. Все это, а также образование карстовых воронок на поверхности показывает, что развитие карстового процесса в верхах карбонатной толщи под влиянием антропогенной деятельности происходит в современную эпоху. По мере инфильтрации воды в низы толщи происходит насыщение их

карбонатом кальция, и процесс карстообразования здесь прекращается.

Установлено, что средняя интенсивность выщелачивания карбонатных пород, оцененная по выносу иона кальция, в пределах зоны развития карстово-суффозионных процессов на территории г. Москвы оказалась равной $3.33 \text{ г/км}^2 \cdot \text{с}$, что на порядок превышает подобные значения для платформенного карбонатного карста, развивающегося ниже местных базисов дренирования, и практически совпадает со значениями интенсивности выщелачивания гипсов в районе г. Дзержинска, о которых говорилось выше. Неудивительно, что в обоих случаях частоты возникновения современных карстовых провалов достаточно сопоставимы [9].

К сожалению, как показано выше, в последние десятилетия применение физико-химических методов изучения карста из-за значительной его трудоемкости и недостаточно высокого профессионализма изыскателей существенно снизилось [15, 32]. Весьма вероятно, что отсутствие необходимых исследований привело к катастрофическому затоплению калийных шахт в Березняках [10, 43].

ВЫВОДЫ

В заключение следует подчеркнуть, что, по мнению авторов, единственный объективный прямой метод прогноза развития карста – гидрогеологический. К сожалению, недостаток внимания к деятельности подземных вод, как основного механизма развития карстового процесса, обозначился еще со времени проведения Научного совещания по изучению карста (1956 г.), когда было дано определение карста как совокупности “геологических процессов и созданных ими явлений в земной коре и на ее поверхности, вызванных химическим растворением горных пород и выраженных в образовании в земной коре пустот, в разрушении и изменении структуры и состояния пород...” [36, вып. 1, стр. 3]. Из приведенной цитаты видно, что роль подземных вод как движущей силы процесса карстообразования во внимание не принималась.

Современное образование карста следует оценивать методами термодинамического и гидродинамического моделирования при обязательном учете геологической и гидрогеологической обстановки в изучаемом районе. В зависимости от поставленных задач и получаемых результатов

можно выделить следующие этапы и методы гидрогеохимического изучения карста [43]:

– исследование равновесно-неравновесного состояния в системе подземные воды – растворимые горные породы, которое позволяет судить о возможности развития карстового процесса в изучаемом районе и выделять участки его наиболее вероятной реализации;

– оценка количества растворимой горной породы, выносимой подземными водами с единицы площади, или объема растворимых пород в единицу времени, позволяющая судить о масштабе развития карстового процесса и объемах образующихся полостей;

– термодинамическое и гидродинамическое компьютерное моделирование интенсивности растворения пород, позволяющее определить количество вещества, выносимого подземными водами в исследуемом участке образования карста, и дать прогноз развития карста в будущем.

В пределах карстоопасных участков необходим систематический контроль химического состава и гидродинамического режима подземных вод с одновременным созданием постоянно действующих компьютерных моделей, включающих термодинамический и кинетический анализ процессов, реализуемых в системе вода – порода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникеев А.В.* К проблеме локального прогнозирования устойчивости закарстованных территорий // Вестн. МГУ. Сер. геол. 1999. № 4. С. 48–56.
2. *Аникеев А.В.* Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // Геоэкология. № 6. С. 544–553.
3. *Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л.* Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. 368 с.
4. *Гвоздецкий Н.А.* Проблемы изучения карста и практика. М.: Мысль, 1972. 391 с.
5. *Гвоздецкий Н.А.* Карстовые ландшафты М.: Изд-во МГУ, 1988. 112 с.
6. *Горбунова К.А.* Карст гипса СССР. Пермь: Изд-во ПГУ, 1977. 84 с.
7. *Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н., Катаев В.Н. и др.* Карстоведение. Ч. 3. Инженерное карстоведение: учебн. пособие. Пермь: Изд-во ПГУ, 2011. 288 с.
8. *Зверев В.П.* Гидрогеохимические исследования системы гипсы–подземные воды. М.: Наука, 1967. 99 с.

9. *Зверев В.П.* Подземные воды земной коры и геологические процессы. 2-е изд. М.: Научный мир, 2007. 256 с.
10. *Зверев В.П.* Система природных вод Земли. М.: Научный мир, 2013. 312 с.
11. *Зверев В.П., Мигунов Л.В.* Термодинамическое моделирование гидрогеохимических процессов в надсолевой толще Верхнекамского района // Литология и полезные ископаемые. 1994. № 2. С. 78–85.
12. *Зверев В.П., Путилина В.С.* Массопотоки диоксида углерода и интенсивность его взаимодействия с горными породами // Геоэкология. 1999. № 6. С. 518–525.
13. *Ильин А.Н., Капустин А.П., Коган И.А. и др.* Карстовые явления в районе города Дзержинска Горьковской области // Тр. Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского. 1960. 121 с.
14. *Кавеев М.С.* Динамика образования карстовых провалов на примере исследования в Среднем Поволжье // Известия АН СССР. Сер. общ. 1961. Вып. 1. С. 39–47.
15. *Катаев В.Н.* Основы создания системы мониторинга закарстованных территорий (на примере Пермского края) // Геоэкология. 2013. № 1. С. 25–41.
16. *Ковалевский В.С.* Влияние изменений климата на подземные воды // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 3. С. 158–170.
17. *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.* Геохимия подземных вод. М.: Наука, 2004. 667 с.
18. *Кутепов В.М.* Карстовая и карстово-суффозионная опасность // Гражданская защита. Т. 2. М.: Энциклопедия, 2007. С. 10.
19. *Кутепов В.М., Кожжевникова В.Н.* Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 151 с.
20. *Лыкошин А.Г., Молоков Л.А., Парабучев И.А.* Карст и строительство гидротехнических сооружений. М.: Гидропроект, 1992. 324 с.
21. *Максимович Г.А.* Основы карстоведения. Вопросы морфологии. Вопросы морфологии, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское кн. изд-во, 1963. Т. 1. 444 с.
22. *Максимович Г.А.* Основы карстоведения. Пермь: Пермское кн. изд-во, 1983. Т. 1. 444 с.
23. *Максимович Г.А., Горбунова К.А.* Карст Пермской области. Пермь: Пермское кн. изд-во, 1958. 180 с.
24. *Максимович Н.Г.* Безопасность плотин на растворимых породах (на примере Камской ГЭС). Пермь: ООО ПС “Гармония”, 2006. 212 с.
25. *Маменко Г.К.* Камская плотина на р. Каме // Геология и плотины. М.: Энергия, 1967. Т. 5. С. 9–39.
26. *Маменко Г.К.* Изучение сохранности гипсоносных пород в основании Камской гидроэлектростанции // Гидротехническое строительство. 1969. № 5. С. 16–21.
27. *Осипов В.И., Зверев В.П., Костикова И.А., Мамаев Ю.А.* О гидрогеохимических особенностях взаимодействия воды и пород в Верхнекамском соленосном бассейне // Геоэкология. 2014. № 5. С. 404–409.
28. *Прочухан Д.П.* Проблема растворимости гипса в гидротехническом строительстве // Тез. докл. на Научн. сов. по изучению карста. М.: Изд-во АН СССР. 1956. Вып.7. С. 16–19.
29. *Прочухан Д.П., Ломтадзе А.М., Натис Н.А.* Инженерно-геологические условия сооружений Камской ГЭС//15 лет Ленингр. Отделения “Гидропроект”: Информ. сб. Л.: Гидропроект, 1959.
30. *Постоев Г.П.* Предельное напряженное состояние в грунтовом массиве при формировании карстового провала (расчет предельного значения диаметра провала) //Инженерная геология. 2011. № 1. С. 28–33.
31. *Родионов Н.В.* Инженерно-геологические исследования в карстовых районах. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 183 с.
32. *Саваренский И.А., Миронов Н.А.* Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: Изд. ПНИИИС, 1995. 167 с.
33. *Саваренский Ф.П.* Избранные сочинения / Отв. ред. Н.Н. Славянов. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 412 с.
34. *Соколов Д.С.* Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
35. *Ступишин А.В.* Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1967. 291 с.
36. Тезисы докладов на Научном совещании по изучению карста. 30 января – 3 февраля 1956 г. М.: Изд-во АН СССР, 1956. Вып. 1–13. 248 с.
37. *Толмачев В.В.* Методы оценки карстовой опасности для строительных целей: состояние и перспективы // Геоэкология. 2012. № 4. С. 354–363.
38. *Толмачев В.В., Карпов Е.Г., Хоменко В.П. и др.* Механизм деформации горных пород над подземными карстовыми формами // Инженерная геология. 1982. № 4. С. 46–59.
39. *Толмачев В.В., Ройтер Ф.* Инженерное карстоведение. М.: Недра, 1990. 152 с.
40. *Berner R.A.* Rate control of mineral dissolution under Earth areaface conditions // AM. Sci. 1978. V. 278. № 9. P. 1235–1252.
41. *Paces T.* Chemical characteristics and equilibrium in natural water felsik rock – CO₂ system // Geochem. et Cosmochem. Acta. 1972. V. 36. P. 217–240.
42. *Perkins E.H., Kharaka Y.K., Gunter W.D., Debrael J.D.* Geochemical modeling of water-rock interaction using SOLMIEQ 88 // ACS Symposium series. 1990. № 416. P. 117–127.
43. *Zverev V.P.* Hydrogeochemical hazard of karst development // Enviromental Geoscience and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safete / Abstrats to Proceedings. М.: ИП Киселева Н.В. 2011. P. 262–265.

HYDROGEOCHEMICAL FEATURES OF KARST DEVELOPMENT UNDER MODERN CONDITIONS

V. P. Zverev, I. A. Kostikova

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

Karst is regarded as a geological and physicochemical process of interaction between the natural water and soluble rocks. Its development is possible only in case of non-equilibrium conditions in the “subsurface water – congruently soluble rock” system. It is shown that intense karst development, leading to the formation of underground cavities and passages, is possible in the presence of convective mass transfer of dissolved substance, which is capable to redistribute considerable volumes in relatively short time. Specific features of karst development are considered by the example of its manifestation in carbonate, sulfate and chloride deposits.

Keywords: *karst, methods of study, subsurface water, dissolution, thermodynamic analysis, the index of disequilibrium; karst in limestone, gypsum and rock salt.*