

---



---

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ**

---



---

УДК 556.114

**ИНТЕНСИВНОСТЬ РАЗВИТИЯ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ**© 2018 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: kostikova@geoenv.ru*

Поступила в редакцию 23.10.2017 г.

Оценка интенсивности выщелачивания растворимых горных пород, определяющая развитие карстового процесса, выполнена на глобальном геосферном уровне и на региональных и локальных примерах. Показано, что единственный прямой метод, позволяющий оценивать масштабы современного карстового процесса, — определение массы горной породы, переходящей в природный водный раствор и выносимой подземными водами с единицы ее площади. Для всех основных типов растворимых горных пород (карбонатов, сульфатов, хлоридов) установлено четкое увеличение модуля выщелачивания от глобального уровня к региональному и локальным. Для карбонатных пород модуль выщелачивания возрастает на три порядка, изменяясь от 0.17 до 3.65 г/с·км<sup>2</sup>, сульфатных на три порядка — от 0.072 до 25.6 г/с·км<sup>2</sup>, хлоридов на четыре порядка — от 0.061 до 225.0 г/с·км<sup>2</sup>. Показано, что рост интенсивности выщелачивания растворимых горных пород под влиянием активизации антропогенной деятельности определяется в основном нарушениями естественного гидродинамического режима подземных вод, достигая в отдельных случаях нескольких раз.

**Ключевые слова:** карстовый процесс, подземные воды, интенсивность выщелачивания, растворимость, горные породы, карбонаты, сульфаты, хлориды, антропогенное влияние, геосферные уровни: глобальный, региональный, локальный.

DOI: 10.7868/S0869780318030031

Изучение интенсивности и прогноз развития карстовых процессов ведется обычно на основании косвенных методов, фиксирующих уже их конечный итог: наличие пустот в толще растворимых пород, распространение карстовых воронок на поверхности и т.п. [2, 13, 18, 19, 24, 27]. Единственный прямой метод, позволяющий оценивать современные масштабы карстового процесса, — определение массы горной породы, переходящей в природный водный раствор и выносимой подземными водами в единицу времени как в целом с площади распространения массива растворимой породы, так и для единицы ее площади.

Масса осадочной оболочки континентального блока земной коры оценена А.Б. Роновым [23] в  $2.12 \cdot 10^{24}$  г. Горные породы, в которых реализуется карстовый процесс, распространены достаточно широко. Содержание карбонатных пород в них составляет  $0.410 \cdot 10^{24}$  г [23]. Массы солей (хлоридов) и сульфатов значительно меньше —  $0.021 \cdot 10^{24}$  г и  $0.007 \cdot 10^{24}$  г соответственно.

Растворимость кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ), входящего в состав известняков, мергелей, мела, мрамора

и т.п., составляет в дистиллированной воде 0.013 г/л, а в природных водах, в зависимости от давления  $\text{CO}_2$ , достигает сотен миллиграммов на 1 л. Растворимость гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) изменяется от 2.1 г/л в маломинерализованных водах до 7.3 г/л в минерализованных растворах. Наибольшей растворимостью обладает галит ( $\text{NaCl}$ ) — до 318 г/л. Таким образом, растворимость карстующихся пород меняется в пределах 4-х порядков, влияя на особенности и скорость развития карста в различных породах.

Существенно отличается и интенсивность массопотоков подземных вод, контролирующей развитие карстового процесса в толще земной коры. Так, действительная скорость их переноса изменяется от  $(1.3-1.8) \cdot 10^{-3}$  см/с в зоне активного водообмена, до  $0.95 \cdot 10^{-5}$  см/с в зоне сравнительно активного и до  $\sim 2.0 \cdot 10^{-7}$  см/с в зоне замедленного водообмена — т.е. тоже в пределах 4-х порядков [6].

Все это, наряду с растворяющей способностью воды, и определяет интенсивность развития карста [26], которая далеко не одинакова на основных

геосферных уровнях: глобальном, региональном и локальном.

Химический состав подземных вод, дренирующих хорошо растворимые породы, несколько отличается от зонального. Для карбонатов это увеличение невелико, но для хорошо растворимых гипсов и особенно каменной соли химический состав подземных вод имеет аномальный состав, характеризуемый более высокой минерализацией и повышенным содержанием отдельных компонентов.

Подземный сток, определяющий развитие карстового процесса зоны активного водообмена осадочной оболочки земной коры, составляет  $10.1 \cdot 10^{18}$  г/год [7]. Скорость выщелачивания карбонатов всей осадочной оболочки континентальной коры [6] на глобальном уровне составляет  $0.73 \cdot 10^{15}$  г/год, т.е. удельное значение интенсивности его выщелачивания —  $0.17$  г/с·км<sup>2</sup>. Скорость выщелачивания сульфатов и хлоридов, оцененная для осадочной оболочки платформ континентов, — соответственно  $0.316 \cdot 10^{15}$  и  $0.259 \cdot 10^{15}$  г/год, а удельные значения их выщелачивания —  $0.074$  и  $0.061$  г/с·км<sup>2</sup>.

На более низких геосферных уровнях интенсивность выщелачивания хлоридов, сульфатов и карбонатов зависит от геолого-структурных, ландшафтных и гидрогеологических условий отдельных регионов, а также влияния антропогенной деятельности, особенно в пределах промышленных территорий и городских агломераций, существенно отличаясь от региональных значений [5].

Необходимость исследования интенсивности выщелачивания хлоридов и сульфатов сомнений не вызывает. Для карбонатных пород эта проблема решается неоднозначно. К сожалению, многие специалисты [16, 21], исходя из низкой растворимости карбоната кальция, считают, что развитие карста и образование провалов в этих породах в современную эпоху контролируется только механическим разрушением закарстованных в предыдущие периоды карбонатных толщ и процессами суффозии.

Интенсивность выщелачивания растворимых пород на региональном и локальных уровнях рассматривается на примерах территории России.

### ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ КАРБОНАТОВ

На региональном уровне рассмотрена хорошо изученная Московская синеклиза Восточно-Европейской платформы, геолого-структурное строение которой определяет гидродинамические особенности и условия формирования хи-

мического состава подземных вод, характеризующихся сложной системой водоносных горизонтов и комплексов, приуроченных к осадочной толще карбонатно-терригенных пород палеозойского, мезозойского и четвертичного возраста. Карбонатные породы осадочной формации каменноугольных и девонских отложений представлены в основном известняками и доломитами, мощностью от ~200 м на юго-западе до ~3500 м на северо-востоке. Эта часть Восточно-Европейской платформы является водоразделом Балтийского, Черного, Азовского морей, занимая площадь около  $461 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>. Суммарный массопоток подземных вод на этой территории составляет  $29.37 \cdot 10^{15}$  г/год [7, 17].

Каменноугольно-девонский водоносный комплекс характеризуется преобладанием в разрезе многоэтажной водонапорной системы с трещинно-пластовыми и карстово-пластовыми преимущественно сравнительно маломинерализованными (200–750 мг/л) гидрокарбонатно-кальциевыми, реже магниевыми-кальциевыми водами. В северо-восточном направлении условия водообмена усложняются, что приводит к росту минерализации и изменению химического состава подземных вод. Водоносный комплекс каменноугольных отложений и верхние водоносные горизонты девона находятся под влиянием местной речной сети [21].

Показано [1], что подземные воды не равновесны с основным пороодообразующим минералом — кальцитом, и в большинстве случаев равновесны с доломитом, создавая благоприятные условия для растворения карбонатов и выноса кальция.

В результате химических реакций воды с растворимыми породами в жидкую фазу поступают определенные количества химических элементов, что дает возможность определить массу растворенной породы и количественно оценить интенсивность развития карстовых процессов. Установлено, что интенсивность растворения карбонатов для рассмотренной центральной части Европейской России  $3.67 \cdot 10^{12}$  г/год [5]. Удельное значение интенсивности выщелачивания карбонатов в пределах рассмотренной территории составляет  $0.26$  г/с·км<sup>2</sup>, что выше, чем для континентов в целом.

Оценка интенсивности выщелачивания карбонатов, залегающих ниже местного базиса дренирования, выполнена на примере территории г. Москвы площадью  $877$  км<sup>2</sup>, ограниченной МКАД, находящейся в центре Московской синеклизы Восточно-Европейской платформы.

Карст г. Москвы обусловлен широким распространением растворимых водопроницаемых карбонатных каменноугольных пород, залегающих под терригенными мезозойско-кайнозойскими отложениями на глубине нескольких десятков метров [21]. В естественных условиях к каменноугольным отложениям был приурочен напорный водоносный горизонт, разгрузка которого сосредоточивалась в долинах рек Москвы и Яузы. В результате усиленной эксплуатации подземных вод каменноугольных отложений, связанной с расширением границ города, ростом промышленности, населения и откачек «Метростроя», были созданы благоприятные условия для увеличения их водообмена [13].

Изменился и химический состав подземных вод. В естественных условиях более или менее закрытой системы с невысокими парциальными давлениями  $\text{CO}_2$ , подземные воды каменноугольного водоносного горизонта были равновесны с известняками карбона [10]. Развитие депрессионной воронки способствовало формированию открытой системы, росту парциального давления  $\text{CO}_2$  и изменению значений pH подземных вод каменноугольных отложений от 7.5–8.0 до 5.5–6.5, что привело к некоторому нарушению равновесно-неравновесного состояния в системе вода–порода и увеличению средней интенсивности их растворения за последние 60 лет от  $7.65 \times 10^9$  до  $17.08 \times 10^9$  г/год [5, 10]. Ранее модуль выщелачивания карбонатов на территории г. Москвы был несколько выше, чем для всего региона –  $0.28$  г/с·км<sup>2</sup>, в настоящее время он составляет  $0.62$  г/с·км<sup>2</sup> [10].

Оценка интенсивности выщелачивания карбонатов в горно-складчатых регионах, залегающих выше местного базиса дренирования, выполнена на примере Горного Крыма, относящегося к бассейну Черного моря, где первая гряда Крымских гор – классический район распространения карста. Скорость развития процесса выщелачивания в подобных природных условиях определяется большой разницей между абсолютными отметками подземных вод, областей питания и разгрузки подземных вод, достаточно высокой нормой атмосферных осадков, значительной расчлененностью рельефа, что обуславливает более высокие значения подземного стока в пределах горно-складчатых сооружений по сравнению с платформенными областями.

Наиболее характерный район развития карста в Крыму – плато Чатыр-Даг, находящийся на абсолютных отметках ~900 м, с отдельными вершинами, достигающими 1500 м. Оно представляет

изолированный массив верхнеюрских известняков мощностью до 500 м, поверхность которого представлена значительным количеством карстовых воронок (их число приближается к тысяче), и пологими увалами. Средняя часть плато через систему поноров и колодцев, соединяющих поверхность и подземные полости до выдержанного водоносного горизонта на контакте с таврическим флишем, дренирует всю поверхность массива, площадь которого составляет  $46.5$  км<sup>2</sup>, а модуль подземного стока –  $20$ – $25$  л/с·км<sup>2</sup> [5, 20].

Подземные воды карбонатных пород в зоне активного водообмена характеризуются гидрокарбонатным кальциевым составом, минерализация которых изменяется от 0.1 до 0.4 г/л сверху вниз по разрезу.

Термодинамическим моделированием состояний химических элементов в подземных водах, дренирующих карбонатные породы верхнеюрских карбонатных пород [6], установлено, что в зоне инфильтрации атмосферных осадков они высоко неравновесны, а в области разгрузки они насыщены по отношению к карбонату кальция. Это показывает, что подземные воды атмосферного происхождения в ходе переноса от области питания к местам разгрузки, взаимодействуя с карбонатными породами, производят большую работу по их выщелачиванию. Таким образом, растворение известняков и вынос его продуктов с подземными водами приводит к образованию системы карстовых полостей – пещер, количество которых достигает двухсот.

Методом стехиометрического баланса масс [6] оценена интенсивность выноса иона  $\text{Ca}^{2+}$  подземными водами, составляющая  $2.03$  г/с·км<sup>2</sup>. Исходя из этого скорость выщелачивания массива верхнеюрских известняков массива Чатыр-Даг оценена в  $3.65$  г/с·км<sup>2</sup>, что на порядок выше, чем в центральной части Русской платформы.

Сравнительные результаты интенсивности выщелачивания карбонатов подземными водами на различных геосферных уровнях: глобальном, региональном и локальном приведены в табл. 1.

### ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СУЛЬФАТОВ

На региональном уровне интенсивность выщелачивания сульфатов рассмотрена на примере пермско-триасовой пестроцветной толщи Центральной части Восточно-Европейской платформы площадью  $5.4 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>, приуроченной к бассейну р. Оки [2, 5, 20]. Особенности формирования

**Таблица 1.** Интенсивность выщелачивания карбонатов

Геосферный уровень	Площадь, км <sup>2</sup>	Масштаб выщелачивания, г/год	Интенсивность выщелачивания, г/с·км <sup>2</sup>
Глобальный	134.8·10 <sup>6</sup>	0.73·10 <sup>15</sup>	0.17
Региональный	461·10 <sup>3</sup>	3.67·10 <sup>12</sup>	0.26
Локальный, ниже базиса дренирования	877	17.08·10 <sup>9</sup>	0.62
Локальный, выше базиса дренирования	46.5	5.35·10 <sup>9</sup>	3.65

химического состава подземных вод пестроцветной толщи обусловлены литолого-геохимическим составом пород, содержащих существенные количества гипсов и ангидридов. Подземный сток на этой территории сравнительно невысок, составляя 0.38 л/с·км<sup>2</sup> [3, 17]. Основываясь на данных о подземном стоке и выносе им масс Са<sup>2+</sup> и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> [5] с территории распространения пермско-триасовой пестроцветной толщи, оценена интенсивность выщелачивания сульфатов, составляющая 0.71 г/с км<sup>2</sup>.

Характерный пример локальных условий выщелачивания сульфатов и развития карстовых процессов ниже местных базисов дренирования – левобережная часть низовьев долины р. Оки в районе г. Дзержинска площадью 89.6 км<sup>2</sup>, где разрез сложен мощной (до 60 м) толщиной песчаных аллювиальных отложений, залегающих на размытой поверхности аллювиальных отложений, представленных глинами и алевролитами татарского яруса, разрушенными известняками и доломитами казанского яруса, и гипсово-ангидридовой толщей артинского яруса, к которым и приурочено развитие карста [4, 14]. Естественный поток подземных вод аллювиальных отложений и известняков казанского яруса, модуль подземного стока которых составляет 5.4 л/с·км<sup>2</sup>, направлен к основной дрене – р. Оке.

Основное растворение пластов гипса происходит с их поверхности, создавая аккумуляционные емкости, размеры которых в сочетании с наличием мощной песчаной аллювиальной толщи, контролируют интенсивность развития суффозии, что и приводит к образованию провалов и воронок на поверхности. Растворение гипсов сопровождается переходом в жидкую фазу соответствующей массы горной породы. По нашим данным, с левого берега р. Оки, включая территорию города, ежегодно выносятся 1.15·10<sup>10</sup> г сульфата кальция, т.е. интенсивность его выщелачивания составляет 4.05 г/с·км<sup>2</sup>, что дает представление об объемах выщелачиваемых пород и соответствен-

но масштабах развивающейся суффозии. Конечно, это осредненные данные, которые могут быть значительно больше или меньше в конкретном месте [8].

Локальные условия выщелачивания сульфатов и развития карстовых процессов ниже местных базисов дренирования показаны на примере нижней части склона долины р. Уфы [25] (от поймы и до высоты 30–40 м), сложенной в нижней части гипсами, в верхней – красноцветной континентальной толщей уфимского яруса, к которой приурочен горизонт грунтовых вод. Фильтрация через толщу гипсов к области дренирования приводит к их интенсивному выщелачиванию. Подземный сток с участка долины площадью 1 км<sup>2</sup> равен 7.9 л/с, а вынос сульфата кальция – 4.01·10<sup>9</sup> г/год. Таким образом, интенсивность выщелачивания гипсов составляет 256 г/с·км<sup>2</sup>.

Сравнительные результаты интенсивности выщелачивания сульфатов подземными водами на различных геосферных уровнях: глобальном, региональном и локальном приведены в табл. 2.

#### ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ХЛОРИДОВ

Наиболее крупные регионы развития отложений каменных солей на территории России – Ангаро-Ленский краевой прогиб (~ 0.6·10<sup>6</sup> км<sup>2</sup>), Прикаспийская синеклиза (~ 0.1·10<sup>6</sup> км<sup>2</sup>), Предуральский краевой прогиб (~ 0.6·10<sup>6</sup> км<sup>2</sup>) [15].

Региональная оценка интенсивности выщелачивания солей выполнена на примере Соликамской впадины северной части Предуральского краевого прогиба, находящейся на левом берегу р. Кама между реками Вишера на севере и Яйва на юге. На большей части рассматриваемой территории распространены пермские отложения, отличительной чертой которых является широкое развитие соленосных формаций.

Таблица 2. Интенсивность выщелачивания сульфатов

Геосферный уровень	Площадь, км <sup>2</sup>	Масштаб выщелачивания, г/год	Интенсивность выщелачивания, г/с·км <sup>2</sup>
Глобальный	134.8·10 <sup>6</sup>	0.316·10 <sup>15</sup>	0.072
Региональный	5.4·10 <sup>3</sup>	0.12·10 <sup>12</sup>	0.71
Локальный, ниже базиса дренирования	89.6	11.5·10 <sup>9</sup>	4.05
Локальный, выше базиса дренирования	1.0	4.01·10 <sup>9</sup>	25.6

Таблица 3. Интенсивность выщелачивания солей

Геосферный уровень	Площадь, км <sup>2</sup>	Масштаб выщелачивания, г/год	Интенсивность выщелачивания, г/с·км <sup>2</sup>
Глобальный	134.8·10 <sup>6</sup>	0.516·10 <sup>15</sup>	0.061
Региональный	6.5·10 <sup>3</sup>	1.68·10 <sup>12</sup>	8.2
Локальный, ниже базиса дренирования	250	0.2·10 <sup>12</sup>	25.4
Локальный, выше базиса дренирования	100	700·10 <sup>9</sup>	225.0

Галогенные отложения Соликамской впадины относятся к филипповскому (гипсы, карбонаты) и иренскому (гипсы, соли) горизонтам кунгурского яруса нижней перми и нижней части соликамского горизонта (глины, мергели, соли) уфимского яруса верхней перми. Соляные породы представлены гигантской линзообразной залежью, вытянутой с севера на юг на 200 км, шириной до 50 км, площадью примерно 6.5 тыс. км<sup>2</sup>. В составе толщи соляных пород выделяются подстилающая каменная соль (350 м), калийные соли (80 м), покровная каменная соль (18 м). Выше покровной каменной соли залегают терригенно-карбонатная (мощность 50–60 м) и соляно-мергельная (мощность до 70 м) толщи, которые содержат достаточно мощные пласты гипсов, переслаивающиеся с глинисто-мергелистыми слоями, защищающие в значительной мере каменную соль от выщелачивания в естественных условиях [4, 11].

Химический состав подземных вод, дренируемых р. Камой, постепенно изменяется 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).

Подземный сток на этой территории составляет 2.24 л/с·км<sup>2</sup> [20]. Основываясь на данных о подземном стоке и выносе им масс NaCl с тер-

ритории распространения пермско-триасовой пестроцветной толщи, оценена интенсивность выщелачивания каменной соли, достигающая 8.2 г/с км<sup>2</sup> [5].

Локальная оценка интенсивности выщелачивания отложений каменной соли, находящихся ниже местных базисов дренирования, выполнена на примере Индерского купола Прикаспийской синеклизы, где растворяется поверхность соляного массива, выше которого находятся закарстованные гипсы и глинистые породы кепрока. Мощность водоносного горизонта равна 15 м, трещиноватость – 5% [15]. Разгружающимися подземными водами, имеющими минерализацию в верхней части водоносного горизонта 2–3 г/л, а на поверхности соли – 320 г/л, с площади 250 км<sup>2</sup> выносятся около 0.2·10<sup>12</sup> г NaCl. Таким образом, интенсивность выщелачивания составляет 25.4 г/с·км<sup>2</sup>.

На примере поднятий соляных тел в районе оз. Баскунчак Прикаспийской синеклизы выполнена локальная оценка интенсивности выщелачивания солей, находящихся выше местных базисов дренирования. Суммарная площадь наиболее поднятых и подвергающихся выщелачиванию штоковых вершин – дериватов соляного массива, судя по площади развития гипсового кепрока, составляет приблизительно 100 км<sup>2</sup>. Соляные источники, функционирующие в пределах этой территории,

**Таблица 4.** Сравнительная интенсивность выщелачивания горных пород на основных геосферных уровнях

Геосферный уровень	Интенсивность выщелачивания пород, г/с·км <sup>2</sup>		
	Карбонатных	Сульфатных	Солей
Глобальный	0.17	0.072	0.061
Региональный	0.26	0.71	8.2
Локальный, ниже базиса дренирования	0.62	4.05	25.4
Локальный, выше базиса дренирования	3.65	25.6	225.0

выносят по данным Г.В. Короткевича [15] порядка  $0.7 \cdot 10^{12}$  г/км<sup>2</sup> NaCl. Таким образом, интенсивность выщелачивания солей составляет 225.0 г/с·км<sup>2</sup>.

Данные об интенсивности выщелачивания солей подземными водами на различных геосферных уровнях: глобальном, региональном и локальном приведены в табл. 3.

#### СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА

Сравнительная оценка интенсивности выщелачивания различных типов растворимых горных пород, определяющих развитие карстового процесса, рассмотрена на основных геосферных уровнях: глобальном и на отдельных примерах регионального и локального уровней. В последнем выделены территории, где карстовый процесс реализуется ниже и выше местных базисов дренирования. Для всех основных типов растворимых горных пород: карбонатов, сульфатов и солей (хлоридов), установлено увеличение модуля их выщелачивания от глобального уровня к региональному и локальным (табл. 4), которое четко определяется величиной их растворимости в природных водах.

Для карбонатных пород модуль выщелачивания возрастает на три порядка, сульфатных — на три порядка, а солей — на четыре порядка. Для карбонатных пород он изменяется от 0.17 до 3.65 г/с·км<sup>2</sup>, сульфатных — от 0.072 до 25.6 г/с·км<sup>2</sup>, и солей — от 0.061 до 225.0 г/с·км<sup>2</sup>.

#### ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Несомненно, важнейший фактор активизации современных процессов развития карста — антропогенная деятельность, влияние которой показано ниже на примерах выше рассмотренных природных объектов.

Карбонатный карст развивается не повсеместно по площади, а приурочивается к ослабленным

зонам, в пределах которых интенсивный водоотбор из каменноугольного водоносного горизонта Московской городской агломерации привел к увеличению интенсивности водообмена и скоростей движения подземных вод.

В результате были созданы благоприятные условия для растворения карбоната кальция. Причем наиболее интенсивно этот процесс развивался не в монолитных карбонатных породах, а в пределах участков древних карстовых нарушений и провалов, заполненных раздробленным до щебня, дресвы и муки карбонатом кальция [16]. Именно здесь в силу весьма значительных поверхностей взаимодействия воды и породы и уже отмеченных выше гидродинамических и гидрогеохимических условий произошло растворение карбонатного цемента и наиболее мелких частиц разрушенных известняков. В конечном итоге это привело к активизации суффозионных процессов и образованию хорошо известных провалов в районе Хорошевского шоссе, где интенсивность процессов выщелачивания карбоната кальция достигает 3.33 г/с·км<sup>2</sup> [8], т.е. почти в 5 раз выше, чем в среднем на территории г. Москвы, приближаясь к значениям, полученным для карбонатного карста Горного Крыма.

Удачным примером влияния действия водозаборов на интенсивность выщелачивания сульфатов является г. Дзержинск Нижегородской области и его окрестности, уже рассмотренные выше. Здесь сосредоточено несколько крупнейших химических комбинатов, для функционирования которых отбиралось  $36.6 \times 10^{12}$  г/год (13.0 л/с·км<sup>2</sup>), что составляет ~65% от полного массопотока подземных вод и на порядок больше, чем глобальные и региональные удельные значения интенсивности водозабора подземных вод [7]. В результате возрастает скорость водообмена и соответственно интенсивность выщелачивания гипсов, приближаясь к 10–20 г/с·км<sup>2</sup>, т.е. почти достигая вели-

чин, характерных для подобных пород, расположенных выше местных базисов дренирования.

Весьма вероятно, что отсутствие необходимых исследований привело к катастрофическому затоплению калийных шахт в г. Березники. Один из авторов, во время работы в ЛГГП им Ф.П. Саваренского, участвовал в изысканиях под створ проектировавшейся Верхне-Камской ГЭС выше г. Соликамска. Им было просмотрено значительное количество кернового материала и было установлено [4, 11], что сохранение каменных и калийных солей, залежавших частично в основании и в левом борте проектируемой плотины, возможно лишь при поддержании гидрогеохимического режима подземных вод, обеспечивающего устойчивость гипсов, фациально переходящих в соляные породы и защищающих их от контакта с высоко агрессивными по отношению к ним подземными водами и соответственно от активного растворения. Значения интенсивности выщелачивания солей, судя по последствиям в г. Березники, приближаются к показателям интенсивности выщелачивания, полученным для территорий, расположенных выше местного базиса дренирования. Весьма вероятно, что эти условия не были учтены при проектировании и эксплуатации калийных шахт в районе Березников, что, скорее всего, и привело к значительному росту водообмена в результате интенсивных откачек, ускоренному растворению гипсов, а затем каменных солей, и прорыву подземных вод в шахты, приведшему к катастрофическим последствиям [9, 22].

Таким образом, из рассмотренных примеров и практики следует, что активизация карстовых процессов происходит в значительной мере в результате нарушения естественного гидродинамического режима подземных вод, что приводит к значительному увеличению водообмена, скоростей движения подземных вод и масс воды, взаимодействующих с растворимой породой, и соответственно росту интенсивности ее выщелачивания от нескольких раз до одного порядка.

На увеличение растворимости сульфатов и солей органические и неорганические компоненты, загрязняющие подземные воды, влияют мало. Исключением являются карбонатные горные породы, растворимость которых под влиянием изменения парциального давления  $\text{CO}_2$  может возрастать до двух раз [12].

## ВЫВОДЫ

Оценка интенсивности выщелачивания растворимых горных пород, определяющих развитие карстового процесса, выполнена на глобаль-

ном геосферном уровне и на отдельных примерах регионального и локального уровней. Для всех основных типов растворимых горных пород: карбонатов, сульфатов и солей (хлоридов), установлено четкое увеличение модуля интенсивности их выщелачивания от глобального уровня к региональному и локальным. Для карбонатных пород модуль интенсивности выщелачивания возрастает на три порядка, изменяясь от 0.17 до 3.65 г/с·км<sup>2</sup>, сульфатных на три порядка – от 0.072 до 25.6 г/с·км<sup>2</sup>, а солей на четыре – от 0.061 до 225.0 г/с·км<sup>2</sup>.

Показано, что рост интенсивности выщелачивания растворимых горных пород под влиянием активизации антропогенной деятельности определяется в основном нарушениями естественного гидродинамического режима подземных вод, достигаая в отдельных случаях нескольких раз.

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что единственным прямым методом, позволяющим оценивать современные масштабы карстового процесса, является определение массы горной породы, переходящей в природный водный раствор и выносимой подземными водами в единицу времени как в целом с территории распространения массива растворимой породы, так и с единицы его площади. Количественная оценка интенсивности выщелачивания позволяет оценить объем образующихся полостей и трещинного пространства, которое может участвовать в процессе суффозии, что позволит более обоснованно подходить к прогнозу как развития карстовых провалов, так и количества и размеров образующихся воронок в пределах изучаемой территории.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л.* Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. 368 с.
2. *Гвоздецкий Н.А.* Проблемы изучения карста и практика. М.: Мысль, 1972. 392 с.
3. *Горбунова К.А.* Карст гипса СССР. Учеб. пособие. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 1977. 83 с.
4. *Зверев В.П.* Гидрогеохимические исследования системы гипсы – подземные воды. М.: Наука, 1967. 99 с.
5. *Зверев В.П.* Роль подземных вод в миграции химических элементов. М.: Недра, 1982. 186 с.
6. *Зверев В.П.* Подземные воды земной коры и геологические процессы. 2-е изд. М.: Научный мир, 2007. 255 с.
7. *Зверев В.П.* Система природных вод Земли. М.: Научный мир, 2013. 311 с.
8. *Зверев В.П., Костикова И.А.* Гидрогеохимические особенности развития карста в современных условиях // Геоэкология. 2015. № 3. С. 248–256.

9. Зверев В.П., Костикова И.А. О связи изменений химического состава подземных вод территории г. Бerezники с развитием провальных процессов // Геоэкология. 2015. № 5. С. 499–504.
10. Зверев В.П., Костикова И.А. Об интенсивности развития карбонатного карста // Геоэкология. 2017. № 4. С. 13–18.
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. Злобина В.Л. Влияние эксплуатации подземных вод на развитие карстово-суффозионных процессов. М.: Наука, 1986. 133 с.
14. Ильин А.Н., Капустин А.П., Коган И.А. и др. Карстовые явления в районе города Дзержинска Горьковской области // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского. Т. 32. Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. 123 с.
15. Короткевич Г.В. Соляной карст. Л.: Недра, 1970. 255 с.
16. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 151 с.
17. Лебедева Н.А. Естественные ресурсы подземных вод Московского артезианского бассейна. М.: Наука, 1972. 148 с.
18. Максимович Г.А. Основы карстведения / Перм. гос. ун-т им. А.М. Горького. Пермь: Кн. изд-во, 1969. Т. 2. 529 с.
19. Максимович Г.А., Горбунова К.А. Карст Пермской области. Пермь: Кн. изд-во, 1958. 180 с.
20. Миграция химических элементов в подземных водах СССР: труды. ГИН АН СССР. Вып. 261 / Кол. авт.: Зверев В.П., Кононов В.И., Ильин В.А. и др. М.: Наука. 1974. 236 с.
21. Москва. Геология и город / Под ред. В.И. Осипова и О.П. Медведева /. М.: Моск. учеб. и Картолитогр., 1997. 399 с.
22. Осипов В.И., Зверев В.П., Костикова И.А., Мамеев Ю.А. О гидрогеохимических особенностях взаимодействия воды и пород в Верхнекамском соленосном бассейне // Геоэкология. 2014. № 5. С. 404–409.
23. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 182 с.
24. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: Изд. ПНИИИС. 1995. 167 с.
25. Скворцов Г.Г. О скорости развития карста в гипсах // Вопросы изучения подземных вод и инженерно-геологических процессов. М.: Изд. АН СССР, 1955. С. 173–176.
26. Соколов Д.С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
27. Толмачев В.В. Методы оценки карстовой опасности для строительных целей: состояние и перспективы // Геоэкология. 2012. № 4. С. 354–363.

## REFERENCES

1. Garrels, R.M., Christ, C.L. *Rastvory, mineraly, ravnovesiya* [Solutions, Minerals and Equilibria]. Moscow, Mir Publ., 1968. 368 p. (in Russian).
2. Gvozdetkii, N.A. *Problemy izucheniya karsta i praktika* [Problems in karst study and practice]. Moscow, Mysl Publ., 1972. 392 p. (in Russian).
3. Gorbunova, K.A. *Karst gipsa SSSR* [Gypsum karst of the USSR]. Study guide, Perm, Izd. Permskogo univ., 1977. 83 p. (in Russian).
4. Zverev, V.P. *Gidrogeokhimicheskie issledovaniya sistemy gipsy – podzemnye vody* [Hydrogeochemical studies in the gypsum-groundwater system]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 99 p. (in Russian).
5. Zverev, V.P. *Rol' podzemnykh vod v migratsii khimicheskikh elementov* [The role of groundwater in the migration of chemical elements]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 182 p. (in Russian).
6. Zverev, V.P. *Podzemnye vody zemnoi kory i geologicheskie protsessy* [Subsurface waters of the earth's crust and geological processes]. 2nd edition, Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2007. 255 p. (in Russian).
7. Zverev, V.P. *Sistema prirodnykh vod Zemli* [The system of natural water of the Earth]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2013, 311 p. (in Russian).
8. Zverev, V.P., Kostikova, I.A. Hydrogeochemical features of karst development under modern conditions. *Geoekologiya*, 2015, no. 3, pp. 248–256. (in Russian).
9. Zverev, V.P., Kostikova, I.A. Changes in groundwater chemical composition in the Berezniki area as related to the sinkhole development. *Geoekologiya*, 2015, no. 5, pp. 499–504. (in Russian).
10. Zverev, V.P., Kostikova, I.A. About the intensity of carbonate karst development. *Geoekologiya*, 2017, no. 4, pp. 13–18. (in Russian).
11. Zverev, V.P., Migunov, L.V. Thermodynamic modeling of hydrogeochemical processes in the above-salt strata in the Verkhnekamskii region. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1994, no. 2, pp. 78–85. (in Russian).
12. Zverev, V.P., Putilina, V.S. CO<sub>2</sub> mass flow and the intensity of its interaction with rocks *Geoekologiya*, 1999, no. 6, pp. 518–525. (in Russian).
13. Zlobina, V.L. *Vliyanie ekspluatatsii podzemnykh vod na razvitie karstovo-suffozionnykh protsessov* [The influence of exploitation of underground waters on the development of karst-suffusion processes].

- ence of groundwater intake on the development of karst-suffusion process]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 133 p. (in Russian).
14. Il'in, A.N., Kapustin, A.P., Kogan, I.A. at all. *Karstovye yavleniya v rayone goroda Dzerzhinsk Gor'kovskoi oblasti* [Karst phenomena in the area of the Dzerzhinsk town, Gor'kii oblast]. *Trudy Laboratorii gidrogeologicheskikh problem im. F.P. Savarenskogo*. [Proc. of the Savarenskii Laboratory of hydrogeological problems]. Akad. nauk SSSR Publ., 1960, no. 32, 123 p. (in Russian).
  15. Korotkevich, G.V. *Solyanoi karst* [Salt karst]. Leningrad, Nedra Publ., 1970. 255 p. (in Russian).
  16. Kutepov, V.M., Kozhevnikova V.N. *Ustoichivost zakarstovannykh territorii*. [Sustainability of the karst territories]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 151 p. (in Russian).
  17. Lebedeva, N.A. *Estestvennye resursy podzemnykh vod Moskovskogo artezianskogo basseina* [Natural groundwater resources in Moscow artesian basin]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 148 p. (in Russian).
  18. Maksimovich, G.A. *Osnovy karstovedeniya* [Fundamentals of karstology]. Perm, Perm book publ., 1969. Vol. 2. 529 p. (in Russian).
  19. Maksimovich, G.A., Gorbunova, K.A. *Karst Permskoi oblasti* [Karst in Perm region]. Perm, Perm book publ., 1958. 180 p. (in Russian).
  20. *Migratsiya khimicheskikh elementov v podzemnykh vodakh SSSR* [Migration of chemical elements in groundwater in the USSR], Zverev V.P., Kononov V.I., Ilin V.A. *Trudy GIN AN SSSR* [Proc. of the Geological Institute of the USSR Academy of Sciences]. Nauka Publ., 1974, vol. 261. 236 p. (in Russian).
  21. *Moskva. Geologiya i gorod* [Moscow. Geology and the city], V.I. Osipov, O.P. Medvedev, Eds. Moscow, Mosk. ucheb. i kartolitogr. Publ., 1997. 399 p. (in Russian).
  22. Osipov, V.I., Zverev, V.P., Kostikova, I.A., Mamaev, Yu.A. Hydrogeochemical features of water-rock interaction in Verkhnekamskiy saliferous basin. *Geoekologiya*, 2014, no. 5. pp. 404–409. (in Russian).
  23. Ronov, A.B., Yaroshevskii, A.A., Migdisov, A.A. *Khimicheskoe stroenie zemnoi kory i geokhimicheskii balans glavnykh elementov* [Chemical structure of the Earth's crust and the geochemical balance of major elements]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 182 p. (in Russian).
  24. Savarenskii, I.A., Mironov, N.A. *Rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam v raionakh razvitiya karsta* [Guideline for engineering geological survey in the karst areas]. Moscow, PNIIS Publ., 1995. 167 p. (in Russian).
  25. Skvortsov, G.G. About the speed of development of gypsum karst. *Voprosy izucheniya podzemnykh vod i inzhenerno-geologicheskikh protsessov* [Aspects of the study of groundwater and engineering-geological processes]. Moscow, Izd. AN SSSR, 1955, pp. 173–176. (in Russian).
  26. Sokolov, D.S. *Osnovnye usloviya razvitiya karsta* [Basic conditions for the development of karst]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1962. 322 p. (in Russian).
  27. Tolmachev, V.V. Methods of karst hazard assessment for the construction purposes: state-of-art and prospects. *Geoekologiya*, 2012, no. 4, pp. 354–363. (in Russian).

## THE INTENSITY OF KARST PROCESS

**V.P. Zverev**, **I.A. Kostikova**

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences (IEG RAS),  
Ulansky per.13, str.2, P.O. Box 145, Moscow, 101000 Russia. E-mail: kostikova@geoenv.ru*

The intensity of soluble rock leaching, which determines the development of karst process, was studied both for a planetary scale and for regional and local cases. The determination of rock mass that passes into the natural water solution and to be removed by the groundwater per unit square of rock is proved to be the only direct method of assessing the speed of modern karst process. For all major types of soluble rocks (carbonates, sulfates, chlorides) we revealed that leaching rate increases from the global level to regional and local levels. For carbonate rocks, the leaching rate increases by three orders of magnitude (from 0.17 to 3.65 g/s·km<sup>2</sup>); for sulfate rocks, by three orders of magnitude (from 0.072 to 25.6 g/s·km<sup>2</sup>), and for chlorides, by four orders of magnitude (from 0.061 to 225.0 g/s·km<sup>2</sup>). The increase in the dissolution of rocks due to human activities is mainly caused by the disturbance of the natural hydraulic ground flow regime.

**Key words:** *karst, groundwater, leaching intensity, solubility, rock formation, carbonate minerals, sulfate minerals, rock salt, influence of human activities, planetary scale, regional scale, local scale.*