

<sup>1</sup>А.Я. Гаев, <sup>2</sup>Ю.А. Килин, <sup>3</sup>И.Н. Алферов, <sup>4</sup>Т.И. Якшина

<sup>1</sup>A.Ya. Gayev, <sup>2</sup>Yu.A. Kilin, <sup>3</sup>I.N. Alferov, <sup>4</sup>T.I. Yakshina

<sup>1</sup>Оренбургский научный центр УрО РАН, <sup>2</sup>Институт «Пермгипроводхоз», <sup>3</sup>Оренбургский государственный университет, <sup>4</sup>Институт экологических проблем гидросферы

<sup>1</sup>Geoecology Department Urals Branch RAS, <sup>2</sup>Permgiptovodhoz Institute, <sup>3</sup>Orenburg State University, <sup>4</sup>Institute of Hydrosphere Ecological Problems

## ГИДРОГЕОЛОГИЯ МАССИВОВ КАРСТУЮЩИХСЯ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ РЕГИОНОВ УРАЛА

### HYDROGEOLOGY OF KARSTING SOILS SOLID MASSES, WITH THE URAL REGIONS VIEWED AS THE EXAMPLE

**Аннотация.** Карстующиеся породы и зоны сосредоточения карстовых вод занимают гипсометрически пониженное положение в рельефе, По мере его выравнивания уменьшаются показатели объема, но растет интенсивность карста, достигая максимума в переходной зоне, где формируется и основная часть крупных пещерных систем и полостей. При техногенезе карст становится круглогодичным, а интенсивность его растет на 2÷3 порядка, с чем и связана высокая аварийность сооружений и коммуникаций

**Abstract.** Karsting masses and karst water reservoirs are situated at a lower position in the hypsometric pattern of the ground, and as the relief pattern grows more even the karst soils are found to be of less size but of greater intensity. The soils of the strongest karsting rate are located at the transition area where the majority of large cave systems and vesicles is situated and being formed. Under the technogene influence the karst processes take place all over the year and the karst process becomes 2-3 degrees more intense, which results in constructions and communication lines being under the great accident risk.

На схемах гидрогеологического районирования России исследуемая территория относится к Уральской гидрогеологической складчатой области и Восточно-Русскому артезианскому бассейну с классом трещинно-карстовых вод трещинно-жильного типа для складчатых областей и пластового типа для платформенных артезианских бассейнов [1,2,3]. Развитию карста благоприятствует широкое распространение карстующихся пород, гумидный климат на значительной части территории, приподнятый и расчлененный рельеф местности. Хемогенные и хемогенно-обломочные породы от кембрийского до пермского возраста вмещают зоны сосредоточения карстовых вод по тектоническим разломам и зонам сочленения структур. Формы классического карста на Уфимском плато развиты на площади 11,8 тыс. км<sup>2</sup> при мощности зоны вертикальной циркуляции до 200 м, а переходной зоны до 20 м с подвешенными горизонтами, играющими роль емкостного регулятора ресурсов карстовых вод [4,5]. В них сосредоточены основные эксплуатационные водные ресурсы бассейна. Мощность зоны постоянного горизонтального стока достигает 70÷80 м и контролируется переуглубленным руслом р. Уфы доакчагыльского возраста. За счет вод зоны сифонной циркуляции формируются мощные восходящие источники (Красный Ключ, Сарва, Тюба и др.), выходящие из карстовых колодцев глубиной до 40 м. Модули подземного стока достигают весной 78÷300 л/сек•км<sup>2</sup>, зимой — всего 6,8÷7,4, составляя в среднем 15,3÷16,2 л/сек•км<sup>2</sup>. Модуль подземного стока почти на порядок выше у реки, чем на водоразделе. НСО<sub>3</sub>—Са воды с минерализацией 400÷580 мг/л в центре плато сменяются к периферии на SO<sub>4</sub>—Са с минерализацией 1500÷2700 мг/л. На глубине 200 м сформировались воды сульфатного состава. На участке Ясылского лога с высокой закарстованностью пород лунежской пачки величина карстовой денудации достигает 45 м<sup>3</sup>/год•км<sup>2</sup> (4-ый класс активности 0,045%), возрастая в бассейне р. Ар до 1170 м<sup>3</sup>. Развиты воронки, пещеры, трещины, каверны, подземные полости. Типичны карстовые реки с мешкообразной долиной, истоки их начинаются родниками, которые исчезают и появляются вновь, иногда вытекающие из пещер. Наиболее распространены карстовые

воронки, количество которых на Красноясыльском поле площадью 19 км<sup>2</sup> составило 2537 [5]. Воронки чаще всего располагаются цепочками с сохранившимися перемычками. Более зрелыми формами сульфатного карста являются карстовые и эрозионно-карстовые депрессии, с поперечником более 1 км, вытянутые вдоль восточного крыла Уфимского вала (Низковская, Дрежинская, Бурцевская, Мазуевская и Суксунско-Советинская).

Там, где сульфатные породы выходят на поверхность земли и контактируют с подземными водами, формируются воды сульфатного типа, приобретающие уже на небольших глубинах повышенную минерализацию и жесткость. Количество проб воды сульфатного типа на Уфимском плато достигает 60 %. На участках, где имеют место процессы техногенеза, сформировались воды хлоридно-магниевого подтипа, а на участках животноводческих ферм и комплексов воды азотного типа. Те и другие, как правило, не пригодны для хозяйственно-питьевого водоснабжения. В понижениях и в поймах рек, где имеют место четвертичные и более древние кайнозойские отложения, выявлены воды содового типа, составляющие по встречаемости до 10 % [2,4,6]. Гидрогеоэкологические проблемы территории обусловлены дефицитом вод хорошего питьевого качества.

По В.И. Вернадскому, в процессе развития открытой неравновесной системы вода – порода – газ – органическое вещество сформировалась вся гидросфера, атмосфера, биосфера, земная кора, осадочные, большая часть метаморфических и частично магматических пород и возникла жизнь. При рассмотрении процессов взаимодействия в системе вода – порода выделяют: а) гидратацию дегидратацию; б) растворение с полным переходом в раствор вещества твердой фазы и в) выщелачивание с обменом и накоплением в растворе продуктов гидратации воды на ионы, входящие в структуру минералов. На границе раздела пород и вод молекулы воды проникают в кристаллическую решетку минералов с образованием новых минералов. В системе **гипс – ангидрит** гипсы тяготеют к верхней части зоны активного водообмена, а ангидриты замещают их ниже по разрезу, что обычно объясняют влиянием подземных вод, температуры и давления. Моделирование карстовых процессов показало, что основную опасность для сооружений и коммуникаций представляют деформации типа оседания и растяжения в карстовых депрессиях. К ним приурочены зоны сосредоточения подземных вод, деятельность которых интенсифицирует процессы.

Геолого-геофизические и дистанционные методы эффективны при прогнозе подземных карстовых форм. В переходной зоне карст протекает в 3÷5 раз интенсивнее, чем в поверхностных условиях, а при техногенезе интенсивность его возрастает на 2÷3 порядка за счет разрыхления пород в зоне аэрации при строительстве и повышении температуры на участках продуктопроводов, где карст становится круглогодичным процессом.

Установлена высокая эффективность доочистки вод на геохимических барьерах неконсервативных элементов, легко деградирующих и выпадающих из раствора в пористой и трещинно-пористой среде карбонатного и теригенно-карбонатного коллектора. К таким элементам относятся тяжёлые металлы (Cu, Cr, V, Ni, Co и др.). При взаимодействии указанных пород с кислыми сульфатными растворами металлов установлена высокая степень сорбции породами ионов меди, хрома, цинка и др. при широкой вариации в природных водах концентраций ионов и солей Na, Ca, Mg, Fe. При этом установлено [1,2,4,6]: 1) основное значение играет эффект диффузии и поглощение компонентов-загрязнителей веществом породы; 2) коэффициенты диффузии компонентов в пористых средах можно вычислить, зная пористость пород и коэффициенты диффузии в свободном объёме; 3) коэффициенты диффузии неконсервативных компонентов в породах на 1÷5 порядков ниже, чем в свободном объёме жидкости; 4) известняки и песчаники на карбонатном и карбонатно-глинистом цементе являются наиболее активными породами, которые рекомендуется использовать в качестве геохимических барьеров для очистки вод от неконсервативных компонентов-загрязнителей.

Анализ результатов натуральных исследований по определению скорости растворения сульфатных пород показал [4, 6], что: 1) при использовании метода стандартных таблеток из

гипса и ангидрита с включениями доломита за восемь лет образцы потеряли до 51 % веса; 2) при этом, повысилась минерализация вод на поверхности озера в пещере; 3) при температуре воды от 3,0 до 4,4 °С и воздуха 2,9÷4,4 °С на поверхности воды появляется пленка из кальцита с включением редких кристаллов гипса; 4) в периоды весеннего и меньше осеннего периода подъема уровня воды, повышается скорость растворения сульфатных минералов; 5) в зоне сезонных и многолетних колебаний уровня трещинно-карстовых вод минерализация и содержание в них сульфат-иона снижаются в результате смешения с менее минерализованными речными водами; 6) максимальные потери веса образцов приурочены к зоне сезонных и многолетних колебаний уровня карстовых вод; 7) при низких температурах скорость растворения ангидрита с доломитом в сульфатных водах оказалась в 1,7 раза выше, чем гипса. Процессы растворения зависят от сезонно меняющейся величины дефицита насыщения воды сульфатом кальция [7]. При выравнивании сорбционной способности образцов, что в эксперименте произошло через 9 лет, скорости их растворения выровнялись. На поверхности земли гипс растворяется интенсивнее, чем ангидрит (с доломитом). В почве процессы растворения тех и других активизируются в весенне-летний период. В целом, эксперименты подтвердили высокую активность сульфатного карста по сравнению с карбонатным, особенно, в условиях зоны сезонных и многолетних колебаний уровня трещинно-карстовых вод.

С массивами карстующихся пород связаны опасные геологические процессы, наносящие существенный экономический ущерб сельскому хозяйству, промышленности, транспорту, разработке месторождений полезных ископаемых, населению, растительному и животному миру. Они нарушают экологическое равновесие. Карстопроявления на поверхности земли только в Пермской области развиты в 20 административных районах, в том числе на территории городов, районных центров, рабочих поселков, таких как Александровск, Гремячинск, Губаха, Кизел, Кунгур, Чусовой, Октябрьский, Орда, Суксун, Уинск, Полазна и мн. др. С ними связаны опасные деформации земной поверхности. Например, в северной части Уфимского плато активизации карста способствует наличие гипсов и ангидритов в геологическом строении, избыточное увлажнение и приуроченность карстующихся пород к ядрам и крыльям валлообразных поднятий и брахиантиклинальных складок. Закарстованные участки обычно сопровождаются процессами трещинообразования (тектоническими, бортового отпора и пр.) с формированием зон сосредоточения трещинно-карстовых вод. Нередко формируются лога, перпендикулярные к реке. Сток по ним осуществляется в обратном от реки направлении, к карстовым воронкам, что характерно, например, для северной части Уфимского плато. В ряде водотоков с мешкообразными долинами вода течет по днищам карстовых форм, многократно исчезая и появляясь вновь. На Красноясыльском поле площадью 19 км<sup>2</sup> карстовые воронки образуют цепочки с узкими перемычками с плотностью более 200 на км<sup>2</sup>. В междуречье Кунгура и Ирени и в Мазуевской карстовой депрессии наряду с цепочками воронок и котловин, установлены каверны, поноры, карры, ниши, подземные полости и пещеры, прослеженные бурением до глубины 40 м. Закартографированы воронки с диаметром до 50 м, от мелких до очень глубоких. Особенно закарстованы гипсы и ангидриты лунежской и демидковской пачек и, в меньшей степени туйские доломиты и известняки. Карстовые формы контролируются тектонической трещиноватостью [8].

Подземные воды растворяют и выщелачивают горные породы, почвы и грунты, переносят химические элементы в области разгрузки и переотлагают их на геохимических барьерах. Эти процессы подчиняются закономерностям вертикальной и широтной гидрогеохимической зональности и наиболее значительны в гумидной зоне с тенденцией уменьшения общей подземной химической денудации, например, в регионах Урала, с севера на юг от 20÷50 т/км<sup>2</sup> в год в таежных и лесостепных районах до 1÷10 т/км<sup>2</sup> в юго-западных районах Волго-Уральского междуречья. Структурно-тектонический фактор воздействует на химический сток, как через рельеф, так и через особенности и степень раскрытости геологической структуры, а так же через вещественный состав водовмещающих пород.

Интенсивность процессов зависит от неотектонической активности и нарушенности пород, с которой связано формирование зон сосредоточения подземных вод. В солях, гипсах и ангидридах воды отличаются высокой минерализацией и интенсивным подземным химическим стоком, до  $902 \text{ т/км}^2$  в год в бассейне р. Вишеры.

Для оценки химической денудации пород и интенсивности карстового процесса нами использовано понятие относительного модуля подземного химического стока, равного отношению модуля подземного химического стока к мощности дренируемой части разреза или водоносного пласта (зоны) [2, 4]. По параметрам объема и интенсивности карстового процесса установлено, что в различных геоморфологических районах и гидродинамических зонах по мере выравнивания рельефа в направлении от осевой зоны горного Урала на восток уменьшается показатель объема (модуль) выноса веществ из массивов пород, включая карстующиеся породы от  $14,4$  до  $5,5 \text{ т/км}^2$  в год. При этом, интенсивность карстового процесса и подземного химического стока, наоборот, возрастает, достигая максимума в зоне сезонных и многолетних колебаний уровня трещинно-карстовых вод. Именно в этой зоне и формируется основная часть пещерных систем и крупных подземных полостей.

Линейные субмеридиональные тектонические зоны контролируют характер развития карстовых и палеокарстовых форм, а так же направленность и унаследованность карстовых процессов. Очевидны и связи карстовых форм с палеотектоническим развитием земной коры и с залежами полезных ископаемых: нефти и газа в Приуралье, алмазов, руд железа, медных колчеданов, золота, рудных, редкометальных и др. месторождений на горно-складчатом Урале.

От гумидной зоны к полуаридной установлено закономерное уменьшение модуля подземного стока, увеличение минерализации вод, их жесткости и концентрации сульфатов и хлоридов. Для оценки масштабов, интенсивности и глубины развития карста использован модульный принцип расчетов: предельно допустимой концентрации ( $M_{пдк}$ ), подземного химического стока ( $M_{пкс}$ ) и предельно допустимого загрязнения или взаимодействия в системе вода — карстующиеся породы ( $M_{пдв}$ ). В целом, воздействие подземных вод на карстующиеся породы в полуаридной зоне заметно снижается, как и риски и общая уязвимость карстующихся пород по сравнению с гумидной зоной.  $M_{пдв}$  изменяется на платформе с севера на юг от  $20 \div 40 \text{ т/км}^2$  в год в таежных условиях до  $5 \div 20$  — в лесостепных и степных районах и менее  $5 \text{ т/км}^2$  — в сухостепных районах левобережья Урала и Волго-Уральского междуречья. Загипсованные породы восточного Предуралья с сульфатами и галоидами характеризуются аazonально высоким уровнем карстовых процессов. Высотная поясность осложняет широтную зональность уже на возвышенностях платформы, но рельефнее на Западном склоне Урала. Здесь модуль ПДВ возрастает до  $100 \text{ т/км}^2$  в год и более и до  $20 \div 40 \text{ т/км}^2$  в год на Южном Урале, и только в бассейне р. Урал и южнее снижается до  $5 \div 20 \text{ т/км}^2$ .

Вдоль периферийных зон неотектонически приподнятых структур интенсивность развития карста и подземной химической денудации в  $2 \div 3$  раза превышает соответствующие параметры в смежных блоках пород, не затронутых неотектоникой и новейшим трещинообразованием. К ним приурочены и зоны сосредоточения подземных вод, а на поверхности земли суходолы с зонами инфлюации, карстовыми котловинами, воронками и понорами. Органичные трубы соединяют поверхностные формы карста с подземными полостями. К этим зонам приурочены крупные родники с дебитом до  $2 \div 3 \text{ м}^3/\text{сек}$  (например, р.Талица у пос. Юртище на Сев. Урале, источник Шумиха в бассейне р. Ай и др.) [1,8,9]. Режим родников бывает устойчивым и неустойчивым. Последний обусловлен дренированием вод зоны сезонных и многолетних колебаний уровня трещинно-карстовых вод.

Несмотря на приуроченность к положительным глыбовым неотектоническим движениям в неоген-четвертичное время, массивы карстующихся пород и зоны сосредоточения трещинно-карстовых вод занимают гипсометрически пониженное положение в рельефе, Это обусловлено высокой интенсивностью суффозионно-карстовых

процессов в зонах сосредоточения трещинно-карстовых вод, к которым приурочены участки высокой аварийности сооружений и коммуникаций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гаев А.Я. Гидрогеохимия Урала и вопросы охраны подземных вод / А.Я. Гаев - Свердловск: Изд-во Урал, ун-та, 1989.- 368 с.
2. Гаев А.Я. О закономерностях и программе изучения карста (на примере Урала) // Инженерная геология карста. Доклады междунар. симпозиума. Пермь, 1993. С. 21-25.
3. Гидрогеология СССР. М.: Недра, 1970. Т. 13. 800 с.; 1972. Т. 14. 648 с.; 1972. Т.15. 344 с.; 1972. Т. 43. 272с.; 1973. Свод. том. Вып.4. 278 с.
4. Гаев А.Я. Особенности формирования карстовых коллекторов и трещинно – карстовых вод Урала / А.Я. Гаев, Р.Л. Ибрагимов, Ю.А. Килин и др. // Гидрогеология и карстование, выпуск 16. Перм. ун-т. Пермь-Оренбург, 2006. С. 234-246.
5. Горбунова К.А. Карст и пещеры Пермской области / К.А. Горбунова, В.Н. Андрейчук, В.П. Костарев, Н.Г. Максимович - Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. -200 с.
6. Гаев А.Я. О сквозном геоэкологическом мониторинге на закарстованных территориях / А.Я Гаев, В.Г. Гацков, Ю.А. Килин, И.И. Минькевич // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского: Сб. научн. Статей // Перм. ун-т. Пермь, 2004. С. 294-302.
7. Зверев В.П. Гидрохимические системы гипс - подземные воды / В.П. Зверев - М.: Наука, 1967.-148с.
8. Буданов Н.Д. Гидрогеология Урала / Н.Д. Буданов - М.: Наука, 1964. - 304 с.
9. Абдрахманов Р.Ф. Карст Башкортостана / Р.Ф Абдрахманов, В.И. Мартин, В.Г. Попов, А.П. Рождественский, А.И. Смирнов, А.И Травкин - Уфа: Информреклама, 2002. - 384 с.