

V. ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮЖНОГО УРАЛА

Р.Ф. Абдрахманов¹, В.Г. Попов²

¹ Институт геологии УНЦ РАН, Уфа, e-mail: hydro@anrb.ru

² Южно-Российский государственный университет (НПИ), Новочеркасск,
e-mail: popovvg@novoch.ru

Исследование вещественного состава, формирования и происхождения подземных вод горно-складчатых сооружений является одним из новых направлений региональной и генетической гидрогеохимии. Основы его были заложены фундаментальными трудами В.И. Вернадского и А.Е. Ферсмана, а в дальнейшем развито в работах И.К. Зайцева, Н.И. Толстихина, А.М. Овчинникова, Н.А. Маринова, Е.В. Пиннекера, Е.В. Посохова, Е.А. Баскова, В.А. Кирюхина, А.В. Кудельского, С.Р. Крайнова, С.Л. Шварцева и др.

В современной гидрогеологии и гидрогеохимии одной из малоизученных и дискуссионных является проблема глубинной зональности горных стран. Издавна утвердились представления о них в целом и об Урале в частности как о гидрогеологически открытых структурах, являющихся внешними зонами питания и создания напора глубоких подземных вод прилегающих платформ. Гидрогеологическая обстановка в орогенных областях и сопредельных районах краевых прогибов считалась неблагоприятной для сохранения залежей нефти и газа. Подземные воды в горных странах связывались главным образом с зоной региональной экзогенной трещиноватости пород, находящейся под воздействием процессов выветривания. Вследствие глубокой эрозионной расчлененности рельефа горных массивов, высоко приподнятых над прилегающими равнинами, в них под влиянием процессов инфильтрации сформировалась мощная зона пресных вод. Ниже зоны активной трещиноватости кристаллические породы считались водоупорными, за исключением локальных зон разломов, в которых обнаруживаются напорные воды различного газового состава, обычно с невысокой минерализацией.

Однако региональными исследованиями последних десятилетий установлено, что складчатые области не являются гидрогеологически однозональными структурами: они имеют не только широтную и высотную поясность, но и глубинную гидрогеологическую зональность. Решающее значение в формировании глубинной гидрогеохимической зональности горных стран отводится динамике подземных вод, в свою очередь зависящей от глубины залегания, характера и степени пустотности горных пород. Это явилось основанием для выделения в горно-складчатых областях не только зоны интенсивной циркуляции, но и зон замедленного водообмена и застойного гидрогеодинамического режима с содержащимися в них минерализованными водами различного происхождения.

С позиции этих представлений обнаружение в недрах орогенов солёных и рассольных вод стало восприниматься не как аномальное, а как закономерное явление, отражающее сущность нормальной вертикальной гидрогеохимической зональности, относящейся к категории фундаментальных свойств земной коры. Гидрогеохимия складчатых областей в на-

стоящее время рассматривается как результат сложного взаимодействия в пространстве и во времени различных гидрогеологических структур, интенсивного проявления на разных этапах их развития тектонической и магматической деятельности, исключительной ролью в жизни подземных вод седиментогенеза, складкообразования, ландшафтно-климатических и других условий.

Подземные воды Урала, расположенного на рубеже Европейского и Азиатского материков и разделяющего Восточно-Европейскую и Западно-Сибирскую артезианские области, имеют более чем 250-летнюю историю изучения. Несмотря на это, еще целый ряд кардинальных теоретических вопросов гидрогеологии Урала оставались до последнего времени не вполне решенными. Прежде всего к ним относятся вопросы геохимии и формирования глубинных вод, гидрогеологических взаимоотношений Урала с Предуральским прогибом и Восточно-Европейской платформой, кинетики литолого-гидрогеохимических процессов в зоне гипергенеза, геохимии и генезиса месторождений минеральных вод и др.

В связи с этим возникла необходимость на современном уровне знаний всестороннего комплексного анализа закономерностей размещения и формирования подземных вод в различных структурно-формационных зонах Южно-Уральской гидрогеологической складчатой области (ГСО): Западно-Уральском адартезианском бассейне (ААБ) пластовых трещинно-карстовых вод, Центральном-Уральском и Магнитогорском бассейнах трещинных вод. В них, помимо типичных метаморфических и интрузивных гидрогеологических массивов (ГМ), соответствующих выходам на поверхность кислых, средних, основных и ультраосновных пород (I этаж ГСО), развитие получили гидрогеологические интермассивы и адмассивы, связанные с вулканогенно-осадочными толщами палеозоя (II этаж ГСО). Карбонатные породы, обычно залегающие в понижениях рельефа среди кристаллических пород, слагают чехол внутри-структурных карстовых бассейнов и соответствуют III этажу ГСО. Наличие густой сети открытых взаимосвязанных между собой трещин в породах с жесткими кристаллизационными связями, их сильная тектоническая дислоцированность обуславливают формирование единой системы трещинных и трещинно-жильных вод.

В условиях среднегорного и низкогорного рельефа Южного Урала, глубоко расчлененного разветвленной речной сетью притоков Волги и Урала, определены пути перемещения и динамика инфильтрационных вод в зоне гипергенеза и главные особенности формирования их химического состава. Направление движения вод контролируется морфологией рельефа, литологическим и структурным факторами. Наибольшая концентрация подземного стока происходит в интенсивно трещиноватых и закарстованных карбонатных породах Западно-Уральского и внутригорных ААБ, а также в зонах проницаемых тектонических нарушений, глубоко (до 500–800 м и более) проникающих в тело ГМ и дренирующих окружающие породы.

Гидрогеологическая структура Магнитогорского мегасинклинория и Центральном-Уральского поднятия (в составе Башкирского, Зилаирского и Уралтауского бассейнов трещинных вод второго порядка) рассматривается как система гидродинамически разобщенных автономных ГМ различных типов с центробежным распределением стока, связь между которыми осуществляется в аллювии долин рек, пролювии склонов и внутригорных карстовых бассейнах. Длина путей перемещения инфильтрационных вод в ГМ зависит от типа и геометрии структур, но в общем случае, как правило, не превышает $n-10n$ км.

В соответствии с гидрогеологической поясностью горно-складчатого сооружения по мере уменьшения крутизны склонов (от 45 до 10°) и связанной с ней величины гидравлического градиента (от 0,05 до 0,01) действительные скорости движения вод снижаются от $n \times (10^2-10)$ до n м/сут, в результате чего период полного водообмена в высоко динамичных трещинных системах не превышает года. Одновременно по мере изменения гипсометрии рельефа наблюдается закономерный рост минерализации регионально-трещинных вод зоны выветривания.

Вещественный состав пород, климат и динамика подземных вод являются главными факторами, определяющими характер, направленность и интенсивность литолого-гидро-

геохимических процессов в системе «вода – порода – газ – ОВ» зоны гипергенеза. Наиболее низкая минерализация вод (30–200 мг/л) свойственна трещинным средам преимущественно кварцевого состава Центрально-Уральского бассейна. В формировании гидрогеохимических особенностей здесь существенное значение играет поступление солей с атмосферными осадками, средняя минерализация которых составляет 20 мг/л. Общий вклад минеральных веществ метеорного происхождения в солевой состав ультрапресных вод достигает 30–50% и более. Особенно велика доля атмосферных осадков (до 70–90%) в формировании сульфатного, хлоридного, иногда кальциевого ионов подземных вод. В закарстованных субплатформенных карбонатных осадках Западно-Уральского ААБ минерализация вод повышается до 400–500 мг/л, а в вулканогенно-осадочных толщах Магнитогорского бассейна — до 3–5 г/л и более в связи широким развитием процессов континентального засоления почвогрунтов зоны аэрации. Подземные воды приобретают пёстрый ионно-солевой состав.

Главную роль в формировании химического состава вод метаморфических, магматических и вулканогенно-осадочных образований рифея и палеозоя Южного Урала играет гидролиз (углекислотное выщелачивание) слагающих их алюмосиликатных и силикатных минералов. В результате обмена ионов водорода, источником которого служит диссоциация угольной кислоты и частично самой воды, на ионы металлов в кристаллической решётке силикатов в Центрально-Уральском и Магнитогорском бассейнах в зависимости от геохимической специализации минералов (альбит, анортит, микроклин, оливин и др.), литологии и генезиса пород формируются гидрокарбонатные воды различного катионного состава и мощные (до 100–200 м) мезозойско-кайнозойские глинистые коры выветривания, состоящие из вторичных минералов (каолинита, гиббсита, окисных и гидроокисных минералов железа, алюминия и др.).

В условиях Урала при кратковременном взаимодействии инфильтрационных вод с труднорастворимыми полиминеральными алюмосиликатными и силикатными породами, состоящими из минералов ряда $Ab-An$, $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$, Fe_3O_4 и др., литолого-гидрогеохимическое равновесие в системе «вода – первичные алюмосиликаты» не достигается, в результате чего образуются воды с низкой минерализацией и обычно смешанного катионного состава. В такой ситуации вода покидает горную породу в сильно ненасыщенном химическими соединениями состоянии. Не способствуют установлению равновесия низкие концентрации в водах CO_2 и генетически связанного с ней иона H^+ , трещинный тип коллекторов, определяющий небольшую площадь взаимодействия твёрдой и жидкой фаз, а также наличие на поверхности минералов защитной плёнки, состоящей из окислов кремния, алюминия и железа.

В гидродинамически активной трещинной алюмосиликатной среде кинетика инконгруэнтных гидролитических процессов, протекающих по внутридиффузионному механизму, не способна обеспечить накопления в подземных водах сколько-нибудь значительных количеств соды. Одна из причин этого состоит в сложном минеральном составе водовмещающих силикатных пород. Другая причина заключается в том, что гидролитические процессы инициируют и контролируют массообмен в литолого-гидрогеохимических системах, заключающийся в переводе металла из жёстко фиксированного в кристаллической решётке состояния в гидратированную карбонатную форму. Аккумуляция в подземных водах $NaHCO_3$, имеющего высокую растворимость, в этом случае наступит только после того, как будет достигнут предел растворимости $CaCO_3$. Однако гидрогеохимические параметры, необходимые для осаждения из гидрокарбонатных вод $CaCO_3$ ($pH > 7,4$, концентрация $HCO_3^- > 300$, минерализация > 600 мг/л), на Южном Урале в ходе гидролитических процессов в алюмосиликатных породах никогда не достигаются.

Околонеутральные маломинерализованные содовые воды Урала (pH 7,0–7,5, минерализация 0,06–0,6 г/л, $NaHCO_3 < 20-30$, редко 40–50%) в геохимическом отношении кардинально отличаются от щелочных гидрокарбонатных натриевых вод Предуралья (pH 7,4–8,8, минерализация 0,6–1,2 г/л, $NaHCO_3+Na_2CO_3$ до 80–92%). Геохимические различия этих вод объясняются разными процессами их формирования и, таким образом, имеют под собой генетическую основу. Как установлено экспериментальным путём, образование чистых содовых

вод в терригенной верхнепермской формации Волго-Камского артезианского бассейна, являющейся продуктом преимущественно морского седиментогенеза, обусловлено не гидролитическими, а обменно-адсорбционными процессами в системе « HCO_3 – Са-вода – адсорбированный Na глинистых осадков».

Вопреки сложившимся представлениям о водоупорности гидрогеологических массивов ниже зоны выветривания, выполненные исследования в глубоких и сверхглубоких скважинах, горных выработках позволяют утверждать, что открытая трещиноватость пород разного уровня и происхождения распространена до глубины 3000–4000 и даже 6000 м. На этих и, не исключено, нескольких больших глубинах в существующих *PT*-условиях Урала следует ожидать и наличие гравитационной воды в жидком состоянии. Однако, имея в виду характер гидравлической связи регионально-трещинных вод зоны выветривания и трещинно-жильных вод зон разломов, энергетические возможности рельефа Урала, а также неуклонное снижение с глубиной проницаемости пород, вряд ли можно допустить проникновение вод современной инфильтрации на глубину >1000–1500 м.

Исследование глубинной гидрогеохимической зональности Южного Урала позволяет утверждать, что в пределах всех гидрогеологических структур маломинерализованные кислородно-азотные воды различного состава на глубине >1000 м сменяются солёными водами содового типа, а >2000–3000 м — метановыми хлоркальциевыми рассолами с минерализацией до 100–200 г/л и более, содержащими спектр галофильных и биофильных микроэлементов. Рассолы связаны с осадочными, вулканогенно-осадочными и осадочно-метаморфическими толщами протерозоя – палеозоя, которые в силу надвигового (аллохтонного) строения Урала оказались литологически и тектонически изолированными от воздействия гипергенных факторов. В своем большинстве они являются продуктом седиментогенеза в лагунно-морских бассейнах различной солёности и последующей метаморфизации в системе «рассол – порода» под влиянием процессов альбитизации, доломитизации, обменной адсорбции и др.

Доказано, что глубокие комплексы палеозоя и позднего протерозоя Предуральского и Волго-Камского АБ, с одной стороны, не имеют прямой гидрогеологической связи с комплексами Западно-Уральского ААБ — с другой. Влияние западного склона Урала как внешней области питания и создания напора вод нижнего этажа осадочного чехла Восточно-Европейской платформы ограничивается только верхней, сравнительно узкой примыкающей к нему зоной прогиба, где существуют очаги разгрузки вод глубинного геохимического облика. Главная причина региональной разобщённости орогенных, предгорных и платформенных гидрогеологических структур и сохранения древних седиментогенных рассолов в недрах передовых складок Урала и Предуральского прогиба заключается в экранирующем воздействии региональных надвигов, препятствующих существованию в глубоководных комплексах палеозоя латеральных потоков с горного сооружения на платформу.

Помимо известных на Южном Урале и в Предуралье инфильтрогенных и седиментогенных вод, в зоне сопряжения Урала и Предуральского прогиба впервые был выявлен и исследован новый для региона генетический тип глубинных растворов — конденсатогенные воды, связанные с нефтегазовыми и нефтегазоконденсатными залежами. Установлено, что сопряжённые процессы генерации углеводородных газов и подземной дистилляции воды протекают на глубине >5000–7000 м в недрах горно-складчатого Урала в относительно напряжённых *PT*-условиях ($T > 100$ °С, $P > 50$ МПа). Отсюда из зоны газообразования по проницаемым разломам происходит восходящая субвертикальная струйная разгрузка водоуглеводородных флюидов на глубину 1900–2400 м в зону пониженных T и P , в результате чего в франско-турнейском комплексе внутренней зоны Предуральского прогиба происходит образование углеводородных газовых скоплений и маломинерализованных конденсатогенных вод. Следствием этих процессов служит инверсионная и сложная гидрогеохимическая зональность палеозойского осадочного чехла. Процессы дистилляции – конденсации воды и генерации углеводородов объясняют как наблюдающуюся ассоциацию опреснённых рассолов

с газоконденсатными и газонефтяными месторождениями Среднего Предуралья, так и геохимическую специфику подземных вод и нефтей.

В связи с совместным образованием углеводородов и конденсатогенных вод последние являются поисковым критерием газоконденсатных и нефтегазоконденсатных залежей. Признание факта образования единого флюида «углеводороды – конденсатогенные воды», а также геологически небольшого возраста вод позволяет считать запасы углеводородов в залежах с оторочкой конденсатогенных вод восполняемыми.

Основные ресурсы пресных вод хозяйственно-питьевого назначения сосредоточены в самой верхней части разреза мощностью от нескольких (бассейн р. Таналык в Зауралье) до 200–300 м (в трещиноватых и закарстованных породах Западно-Уральского ААБ); в среднем — в магматических, метаморфических и вулканогенно-осадочных толщах позднего протерозоя – палеозоя Урала — 60–80 м. Общие ресурсы пресных подземных вод региона оцениваются в 4,8 млн. м³/сут, а прогнозные эксплуатационные ресурсы — в 2,1 млн. м³/сут, часть из которых (0,41 млн. м³/сут) отбирается на месторождениях для обеспечения населения питьевой водой.

В отличие от пресных подземных вод месторождения минеральных вод на Южном Урале очень редки: Красноуральские — в зоне передовых складок, Ассинское — в Инзерском синклинории Центрально-Уральского поднятия и Мулдаккульское — в Магнитогорском мегасинклинории. Они относятся к разным геохимическим типам: первые представлены сульфидными (H₂S 30–56 мг/л, минерализация 35–78 г/л) и радоновыми водами (минерализация 7,6–13,5 г/л, Rn 14–25 нСи/л), второе — сульфатно-хлоридными (минерализация 2,6 г/л) и хлоридными (минерализация 18,9 г/л), а третье — сульфатно-хлоридными магниевонариево-кальциевыми (минерализация 6–12 г/л) водами.

Однако, несмотря на геохимическую специфику вод каждого месторождения, они имеют и одну общую черту: по условиям формирования относятся к гидроинжекционным, которые наиболее свойственны горно-складчатым областям. Месторождения этого типа по сравнению с пластовыми месторождениями платформ имеют более сложные гидрогеологические условия, локальное распространение в зонах восходящей разгрузки по зонам разломов в разной степени глубинных вод в вышележащие комплексы. В результате процессов смешения их с маломинерализованными водами зоны интенсивной циркуляции образуется широкая гамма различных по ионно-солевому, газовому и микрокомпонентному составу минеральных вод. Глубинная составляющая месторождений минеральных вод Южного Урала представлена талассогенными солёными водами и рассолами, захоронёнными в осадочных породах рифея и палеозоя и претерпевшими метаморфизацию на стадии эпигенеза, что подтверждено результатами гелиевых и изотопных исследований.

Бальнеологический интерес представляют кислые сульфатные полиметалльные воды (типа блявинских и гайских), развитые в зонах окисления медно-колчеданных месторождений Магнитогорского синклинория (Учалинского, Сибайского и др.).

Южный Урал — старейший рудодобывающий регион страны. Характерной особенностью техногенеза горнорудного профиля является глубокое проникновение техногенных процессов в геологическую среду (до 2000 м). Наиболее интенсивно техногенез проявляется на территориях, где одновременно производится промышленное освоение целой группы близко расположенных друг к другу месторождений полезных ископаемых (Баймакский, Учалинский и другие рудные районы).

Техногенная деградация подземной гидросферы горнорудных районов Южного Урала носит локальный в пространстве (карьеры глубиной до 470 м с отвалами высотой до 80 м), но длительный во времени характер и обусловлена накоплением твёрдых и сбросом жидких отходов. Трещинный и трещинно-жильный характер подземных вод, слабое развитие перекрывающих пород способствуют проникновению концентрированных растворов, содержащих тяжёлые металлы, в водоносные горизонты. Все это приводит к формированию на территории горнорудных узлов гидрогеохимических полей техногенно трансформированных вод.