УДК 556.31

Гидроминеральные ресурсы восточного склона Фенноскандинавского щита

Г.С. Бородулина

Институт водных проблем Севера Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия
bor6805@yandex.ru

Дается краткая характеристика гидрогеологических условий и основных типов минеральных вод восточного склона Фенноскандинавского щита. Описываются месторождения: лечебно-питьевых минеральных железистых, бальнеологических радоновых средней концентрации, хлоридно-натриевых вод без специфических компонентов, дается характеристика условий формирования химического состава вод. Особое внимание уделено проблеме формирования хлоридных и гидрокарбонатных натриевых подземных вод на кристаллическом щите.

Hydromineral Resources of the Eastern Slope of the Fennoscandian Shield

Galina S. Borodulina

Institute Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, RAS, Petrozavodsk, Russia

This article provides a brief description of the hydrogeological conditions and main types of mineral groundwater on the eastern slope of the Fennoscandian Shield. Explored deposits are described: medicinal and drinking mineral iron waters, balneological radon groundwater, and chloride-sodium groundwater without specific components. It also describes the conditions under which the chemical composition of the waters is formed. Particular attention is given to the formation of chloride and sodium bicarbonate groundwater on the crystalline shield.

Карелия занимает центральную и наиболее обширную часть восточного склона Фенноскандинавского щита и на юго-востоке граничит с Русской платформой. На большей части территории формируются водоносные системы Балтийского гидрогеологического массива, и лишь южная и восточная части относятся к артезианским бассейнам. Массив сложен гранито-гнейсовыми комплексами архейского фундамента, на которых залегают вулканогенно-осадочные отложения протерозоя, перекрытые маломощным покровом ледниковых отложений. Гидрогеологические условия открытого кристаллического массива характеризуются отсутствием региональных водоупоров и повсеместным распространением

трещинных вод. Несмотря на общие и простые на первый взгляд гидрогеологические условия региона, неравномерное развитие трещиноватости кристаллических пород, пестрота литологического состава и невыдержанная мощность четвертичных отложений, создают разнообразные обстановки локализации месторождений и проявлений пресных и минеральных подземных вод. Преимущественное растпространение имеют гидрокарбонатные кальциево-магниевые воды, средняя величина минерализации 0.3 мг/л. Один из самых высоких показателей озерности региона с учетом Ладожского и Онежского озер исторически определил решение вопроса водоснабжения в пользу поверхностных вод. Доля подземных вод в общем балансе водоснабжения не превышает 6%, что является минимальным показателем в России [1].

Территория входит в Балтийскую область Восточно-Европейской провинции радоновых и железистых минеральных вод, формирующихся в коре выветривания и зонах разломов массивов пород архей-протерозоя. Третьим типом минеральных вод в Карелии, являются воды с минерализацией более 1 г/л без специфических компонентов и свойств, распространенные в платформенных отложениях, реже на кристаллическом щите. В настоящее время в республике действует один курорт – Марциальные воды, и одно медицинское учреждение, использующее радоновые воды для внекурортного обслуживания. В то же время в регионе имеются предпосылки для более широкого использования минеральных вод различных типов. Подземные воды преимущественно пресные, хотя встречаются солоноватые, от слабокислых до щелочных, по химическому типу – от наиболее широко распространенных гидрокарбонатных кальциево-магниевых до гидрокарбонатных натриевых, гидрокарбонатных магниевых, сульфатных и хлоридно-натриевых [2].

Месторождение железистых вод «Марциальные воды» находится в 50 км к северу от Петрозаводска, формируется в денудационно-тектонической долине оз. Габозеро (бассейн р. Шуя), в западной части Онежской палеопротерозойской структуры, сложенной вулканогенно-осадочными породами. Подземные воды месторождения приурочены к межморенным песчано-гравийным отложениям и верхней трещиноватой зоне шунгитсодержащих пиритизированных сланцев и долеритов. Естественные источники были обнаруженны при Петре I, который и явился в 1719 г. основателем первого в России курорта. В современном виде курорт действует с 1964 г. и использует в лечебно-питьевых целях подземные воды четырех самоизливающих скважин. Маломинерализованные (0.2–0.8 г/л) высокожелезистые (Fe^{2+} до 100 мг/л) сульфатные магниево-кальциевые воды в качестве характерного типа («марциальный») представлены в ГОСТах. Они представляют собой очень локальную и мало распространенную, но чрезвычайно характерную по своему генезису и химическому составу группу вод, которые формируются на небольших глубинах в зонах окисления пиритизированных пород [3].

Палеогеографические реконструкции предполагают, что сульфатная зона окисления сформировалась в период последнего оледенения, ее сохранности способствовали дефицит жидких осадков в морозных условиях и быстрое поднятие уровня подземных вод при потеплении климата. Состав воды формируется за счет смешения вод разного возраста – основной вклад дают современные воды инфильтрационного происхождения и небольшую долю все еще вносят реликтовые воды, сформировавшиеся при таянии мерзлоты. Присутствие реликтовой воды доказано наблюдениями за содержаниями дейтерия и кислорода-18 и других изотопных трассеров ($^{3}He/^{4}He$, $^{20}Ne/^{4}He$, $^{234}U/^{238}U$ и $\delta^{13}C$) [4, 5]. Архивные данные и современные наблюдения обнаруживают исчерпание реликтовой ледниковой компоненты растворителя и ее замену современными атмосферными водами. Определен возраст органогенных отложений в базальной части торфяной залежи (глубина 2.3 м) в районе скважин, и получена калиброванная радиоуглеродная дата 9640 ± 150 л. н., следовательно, керновый материал характеризует практически весь период голоцена. Вековые и межгодовые вариации в структуре составляющих компонентов подземного стока отражаются в близкой к обратной зависимости величин содержания железа и изотопного

отношения урана по разрезу залежи, что объясняется гидролизом железа (и фиксацией его в отложениях) в окислительных условиях и повышением миграционной способности урана [3].

Радоновые воды на территории Карелии имеют широкое распространение, что традиционно связывают с повышенным содержанием радиоактивных элементов в кристаллических породах. Высокие содержания радионуклидов приурочены к зонам гидротермального и вторичного изменения пород, которые наиболее интенсивно проявляются в местах тектонических нарушений, в зонах сопряжения интрузивного и метаморфического комплексов, в пределах зон дробления [1, 6]. Характерной особенностью радоновых вод является отчетливая связь с повышенным содержанием урано-радиевой минерализации в породах и степенью их трещиноватости. Примером такого типа месторождения является Кондокский участок радоновых вод (11 км г. Костомукша). Зона трещиноватости приурочена к надвигу позднеоргенной гранитной интрузии на осадочно-вулканогенные породы архея, и на участках дробления пород наблюдаются изменения гидротермального и метасоматического характера. Здесь при проведении поисково-оценочных работ в Костомукшском железорудном районе выявлены повышенная радиоактивность пород и родники с пресной слабокислой воды гидрокарбонатного (сульфатно-гидрокарбонатного) состава и высокой концентрацией радона (3300–4800 Бк/л). Оценены запасы месторождения, минеральная радоновая вода средней концентрации используется в бальнеологических целях в отделении радонотерапии городской больницы. Анализ геологических и гидрогеологических условий Кондокского участка показывает, что активные породы не имеют больших размеров, обеспечивающих достаточное время соприкосновение воды с породой, поэтому небольшая скорость движения подземных вод при прочих равных условиях становится важным фактором в формировании радоновых вод высокой концентрации. Известны и другие многочисленные источники радоновых вод в регионе, исследованиями ИВПС КарНЦ выявлены проявления средне- и высокорадоновых вод (до 9400 Бк/л), которые перспективны для дальнейших геологоразведочных работ [1, 2].

К типу минеральных лечебных вод с минерализацией более 1 мг/л и не содержащих биологически активные компоненты относится Олонецкое месторождение минеральных хлоридно-натриевых вод с минерализацией 4–8 г/л, приуроченное к нижней части нижнекотлинского горизонта Русской платформы. Разведанные запасы оценены в количестве 18.8 $м^3$/сут, в настоящее время месторождение не эксплуатируется. Соленые воды встречаются и в кристаллических породах щита, и проблема их формирования вызывает особый интерес. Считалось, что такое явление как соленые воды на щитах невозможно связать с какими-либо древними и современными морскими бассейнами и рассматривали альтернативные (автохтонные) процессы. Открытие в ходе бурения параметрической скважины в пределах Онежской структуры мощной (194 м) галитовой толщи в породах, относящихся к раннему докембрию Земли (ятулий), опровергло этот вывод [6]. Возможность поступления глубинных соленых вод в верхние части коры подтверждается существованием в пределах структуры естественного источника «Соляная яма», солоноватая вода которого (4 г/л) является результатом смешения с пресными приповерхностными водами, а первичная соленость вод, вероятно, значительно выше. Известная максимальная минерализация воды (7.2 г/л) и концентрация хлор-иона (3.8 г/л) в западной части Онежской структуры зафиксированы в скважине, вскрывшей напорную воду на глубине 100 м. Тот факт, что соседние скважины вскрыли пресные воды, свидетельствует о приуроченности разгрузки солоноватых вод к локальной тектонической зоне. Характерной особенностью хлоридных вод является высокое содержание гелия – на порядок выше, чем в водах других типов. Так, концентрация гелия в воде вышеупомянутой скважины составила 5.5×10^{-2} мл/л.

Подземные воды верхней зоны нижнепротерозойских пород щита являются инфильтрогенными в отличие от подземных вод платформы, которые с ростом минерализации обедняются натрием и значительно обогащаются кальцием и имеют признаки метаморфизованных вод. Изотопный состав хлоридных вод обеднен тяжелыми изотопами, «легче» среднемноголетнего состава атмосферных осадков (δ^2H = −84‰ и

$\delta^{18}O$ = –11.7‰) [7], но подземные воды платформенной окраины несколько отличаются от вод кристаллического массива: состав их более тяжелый, и в отдельных случаях наблюдается кислородный сдвиг (обогащение тяжелым кислородом за счет изотопного обмена с породами), что подтверждает процесс метаморфизма захороненных морских вод. Воды «Соляной ямы» характеризуются самым тяжелым изотопным составом (рис. 1).

Другой особенностью региона является появление в различных породах древнего щита щелочных гидрокарбонатных натриевых (содовых) подземных вод невысокой минерализации (до 0.5 г/л) и низкой жесткости, что связано с определенной стадией взаимодействия подземных вод с алюмосиликатами, приводящего к выпадению карбонатов и накоплению натрия. Иногда скважинами вскрываются гидрокарбонатные бессульфатные натриевые воды с высоким содержанием аммонийного азота, по комбинации признаков указывающих на процесс сульфатредукции и возможный источник углеводородного заражения геологического разреза. Последнее подтверждается исследованиями ученых Института геологии КарНЦ, которые выявили наличие аморфного углерода в магматических породах Заонежской свиты, который (углерод) образовался в результате миграции и осаждения из гидротермальных флюидов [8]. Изотопный состав свидетельствует о биогенном происхождении углерода, а вероятным его источником считается палеопротерозойский нефтяной резервуар Заонежской свиты (феномен Шуньга) [8].

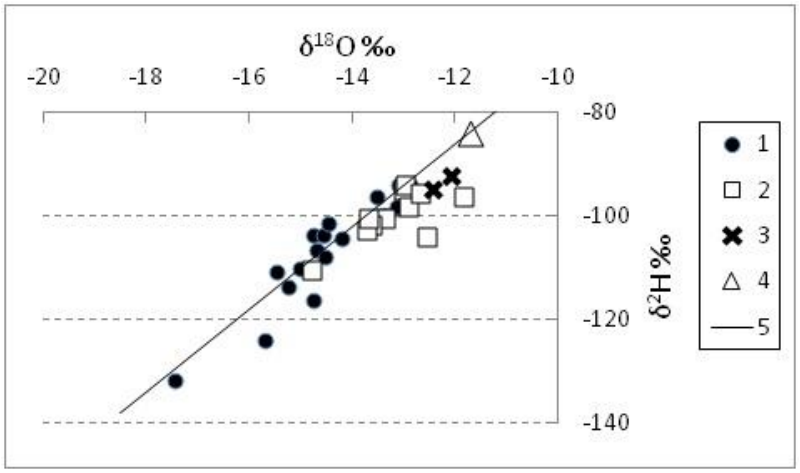


Рисунок 1 – Расположение точек изотопного состава хлоридных вод относительно локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ).

1 – воды кристаллического массива, 2 – воды платформенной окраины; 3 – «Соляная яма»; 4 – среднее атмосферных осадков, 5 – ЛЛМВ

Таким образом подземные воды восточного склона Фенноскандинавского щита отличаются разнообразием химического состава, и Республика Карелия имеет большие возможности для использования их как источника водоснабжения и в качестве минеральных.

Работа выполнена в рамках государственного задания FMEN-2021-0003.

Список литературы

1. Водные ресурсы Республики Карелия и пути их использования для питьевого водоснабжения. Опыт карельско-финляндского сотрудничества / *Ред. Н.Н. Филатов, А.В. Литвиненко, А. Сяркиоя, Р. Порттикиви, Т. Регеранд.* Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2006. 263 с.

2. *Бородулина Г.С.* Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии / *Г.С. Бородулина, М.А. Левичев* // Горный журнал. 2019. № 3. С. 71–75.

3. *Бородулина Г.С.* Палеогеографические условия формирования сульфатных железистых вод на юго-восточном склоне Фенноскандинавского щита на примере «Марциальных вод» (Карелия) / *Г.С. Бородулина, И.В. Токарев, Т.С. Шелехова* // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2025. 70 (1). С. 52–69. DOI:10.21638/spbu07.2025.103.

4. *Бородулина Г.С.* Закономерности формирования железистых минеральных вод курорта «Марциальные воды» (Карелия) по благородным газам (3He/4He, 20Ne/4He) /

Г.С. Бородулина, И.Л. Каменский, В.И. Скиба, И.В.Токарев // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2020. 17. С. 61–65. DOI:10.31241/FNS.2020.17.011.

5. *Tokarev I.* Climatic causes of extreme disequilibrium of the uranium series (234U/238U) in groundwater of the North-West Russia / *I. Tokarev, E. Yakovlev, G. Borodulin et al.* // Hydrogeology Journal. 2025. 33(5). pp. 1–18. DOI: 10.1007/s10040-025-02925-z.

6. Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / *Отв. ред. Л.В.Глушанин, Н.В.Шаров, В.В. Щипцов.* Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2011. 431 с.

7. *Borodulina G.* Isotope composition of natural water in the Lake Onega basin / *G. Borodulina, I. Tokarev, E. Yakovlev* // Water. 2023. 15. 1855. DOI: 10.3390/w15101855.

8. *Chazhengina S.* Amorphous carbonaceous material in Paleoproterozoic pillow lavas (Onega Basin, NW Russia): Origin, source and migration / *S. Chazhengina, A. Stepanova, V. Ustinova, S. Svetov* // Lithos. 460–461. 2023. 107373. DOI: 10.1016/j.lithos.2023.107373.