

УДК 504.43

ЗАЩИТА ГЕОХИМИЧЕСКИМИ БАРЬЕРАМИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ДОЛИНАХ СРЕДНЕГО УРАЛА

© 2019 г. А.В. Скалин, В.А. Скалин, А.А. Скалин

*Научно-производственное объединение «Уралгеоэкология», г. Екатеринбург,
Россия*

Ключевые слова: месторождение подземных вод, трещинно-карстовые пласты, речная долина, инфильтрационный водозабор, геохимические барьеры, гидрогеоэкология, Средний Урал.

Рассмотрены особенности методики поисково-разведочных работ месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах в речных долинах Восточно-Уральской гидрогеологической складчатой области, эксплуатируемых инфильтрационными водозаборами. Определен вид месторождений подземных вод в метаморфических породах, где возможно производить водоподготовку в пластах на геохимических барьерах.

Представлены результаты экспериментальных гидрогеоэкологических исследований на геохимических барьерах Оброшинского месторождения подземных вод в трещинно-карстовых пластах, естественные ресурсы которого относятся по качеству к минеральным природным столовым водам для промышленного розлива. Обоснована возможность использования Оброшинского месторождения в качестве резервного источника питьевых подземных вод для водоснабжения г. Екатеринбурга.

В гидрогеологических складчатых областях широко распространены безнапорные подземные воды, недостаточно защищенные от загрязнения сверху слабоводопроницаемыми глинистыми слоями кор выветривания в зоне аэрации. Вместе с тем, возможно выделение видов месторождений, где происходит самоочищение подземных вод на геохимических барьерах. Однако водоподготовка в пластах на геохимических барьерах не рассматривалась при обосновании стратегии и тактики поисково-разведочных работ резервных водозаборов подземных вод, выполнявшейся в ходе последнего этапа региональной оценки пресных подземных вод Уральской сложной гидрогеологической складчатой области. Организация такой водоподготовки также не учитывается действующими санитарными нормами и правилами при определении границ зоны санитарной охраны водозаборов подземных вод.

В рамках проведения экспериментальных гидрогеоэкологических исследований авторами статьи предпринята попытка доказать, что геохимические барьеры могут являться эффективным средством защиты от загрязнения подземных вод в пластах. В качестве объектов исследований выбраны месторождения подземных вод трещинно-карстовых пластов в речных долинах, характеризующихся сравнительно большими величинами запасов вод, где возможно сооружать береговые водозаборы. Опытные исследования произведены на Оброшинском месторождении подземных вод в трещинно-карстовых пластах метаморфических пород, расположенном в четырех км северо-западнее г. Екатеринбурга на мысе Гамаюн Верх-Исетского пруда. Оброшинское месторождение разведано за счет собственных средств НПО «Уралгеоэкология», а его естественные ресурсы под наименованием минеральных природных столовых вод «Гамаюн» утверждены Государственной комиссией по запасам по категории В для промышленного розлива.

ОБОСНОВАНИЕ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПЛАСТАХ

По аналогии с классификацией технологических схем водоподготовки в наземных сооружениях предлагается подразделить средства и методы водоочистки в пластах на два класса. В класс безреагентных входит гидрогеодинамический метод очистки подземных вод от загрязнения взвешенными нефтепродуктами, основанный на использовании физического принципа расслоения несмешивающихся жидкостей, различающихся по плотности примерно на 20 % [1]. К классу реагентных следует отнести способ очистки подземных вод на геохимических барьерах, которые имеют электрохимическую природу.

Гидрогеоэкологические основы миграции подземных вод разработаны В.А. Мироненко и В.Г. Румыниным [2]. Первая типизация геохимических барьеров предложена А.И. Перельманом: карбонатный, кислородный, восстановительный, сероводородный, сульфатный, кислый, сорбционный барьеры [3]. Процессы самоочищения подземных вод вследствие осаждения нормируемых элементов на геохимических барьерах впервые были изучены С.Р. Крайновым и В.М. Швецом [4], на Урале – А.Я. Гаевым и др. [5], Я.Я. Яндыгановым и др. [6].

Решение задачи по обеспечению реагентной водоподготовки в трещинно-карстовых пластах можно начать с рассмотрения метода аналогии между управляемой техногенной миграцией подземных вод в зоне гидрогеохимического щелочного карбонатного барьера и технологическим процессом искусственной водоочистки с применением в качестве коагулянта железного купороса и подщелачиванием известью. Как известно, железный купорос Fe_2SO_4 в результате реакции нейтрализации преобразуется с выделением углекислого газа CO_2 в гидроксид железа $Fe(OH)_2$, который в присутствии

растворенного кислорода в воде очень быстро переходит в гидроксид железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Гидроксид железа образует в воде золи с положительным зарядом в грануле. Для связывания в зоне реакции образующихся при гидролизе ионов водорода и уголекислоты добавляют известь, которая кроме прямого назначения, являясь электролитом, оказывает коагулирующее влияние, а ее нерастворимая часть действует как механический сорбент. Гидроксиды железа флокулируют и соосаждаются с частицами взвеси, а также сорбируют на поверхности своих частиц бактерии, гуминовые вещества и другие соединения, например, ионы тяжелых металлов [7]. В качестве примера процесса водоподготовки можно привести реакцию нейтрализации известковым молоком отработанных горячих кислотных сульфатных железосодержащих растворов на шламонакопителях трубных заводов Среднего Урала [6].

ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТРЕЩИННО-КАРСТОВЫХ ВОД В РЕЧНЫХ ДОЛИНАХ

В Восточно-Уральской гидрогеологической складчатой области безнапорные подземные воды подвергаются загрязнению вследствие промышленного техногенеза [7]. На близлежащих к мегаполисам территориях воды родников часто загрязнены или содержат повышенные концентрации радона-222 [9]. Актуальной задачей становится решение вопросов создания резервных источников питьевых подземных вод для крупных городов Среднего Урала [10–12].

В качестве объекта гидрогеоэкологических исследований для разработки методов защиты безнапорных подземных вод от загрязнения посредством геохимических барьеров был выбран тип месторождений пресных подземных вод (МППВ) в трещинно-карстовых пластах, пересекающих речные долины (согласно типизации Л.С. Язвина и Б.В. Боревского [13]), которые характеризуются значительными объемами эксплуатационных запасов подземных вод (ЭЗПВ). Унифицированная методика поисково-разведочных работ для МППВ данного типа, в целом, разработана [13], за исключением использования геохимических барьеров как средства защиты подземных вод от загрязнения.

В Восточно-Уральской гидрогеологической складчатой области предлагается, согласно принципу иерархии, подразделить тип МППВ трещинно-карстовых пластов в речных долинах на два региональных вида: западноуральский и восточноуральский. Критерием выделения видов является нахождение сорбционного гидроксидного геохимического барьера в метаморфических породах, поисковым признаком которого служат линейные зоны осадочных железных руд. Например, Исетская рудная полоса месторождений кремнистого железняка разрабатывалась в XIX в. рудниками Исетским, Четыре брата, Клоповским, Решетским, Оброшинским (с севе-

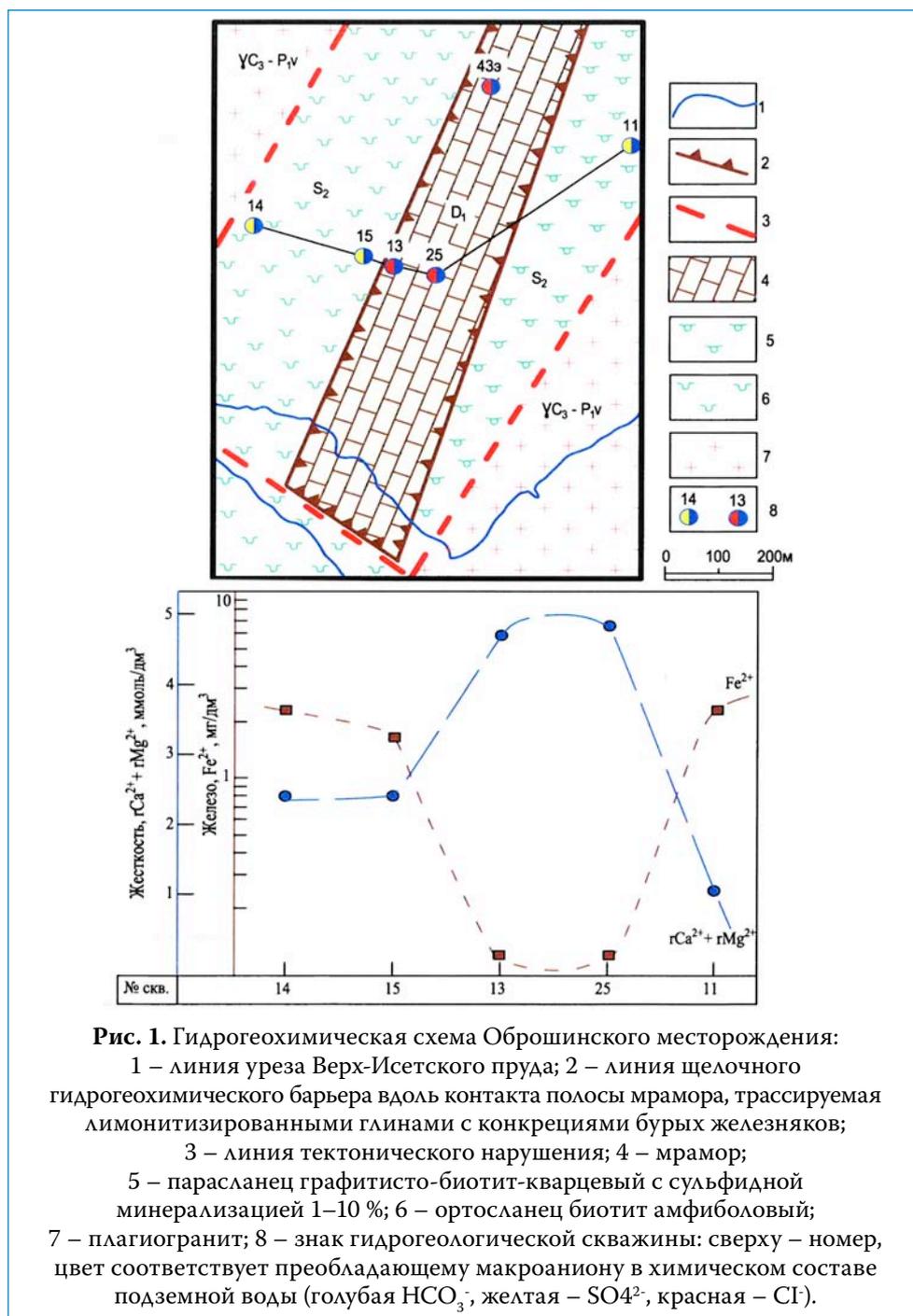
ра на юг). Характерным представителем западноуральского вида является Сергинское месторождение пресных подземных вод в трещинно-карстовых известняках, прорезаемых долиной р. Серги, на западном склоне Среднего Урала. ЭЗПВ данного месторождения утверждены Государственной комиссией по запасам в количестве 130 тыс. м³/сут для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Первоуральска, к которому откачивается вода подается по трубопроводу диаметром 900±600 мм и длиной около 65 км [10, 13]. К восточноуральскому виду относится Оброшинское МППВ в трещинно-карстовом пласте мраморов шириной около 200 м, площадь которого была частично затоплена в 1726 г. при создании Верх-Исетского пруда на р. Исеть. В балансовой структуре запасов Оброшинского МППВ представлены естественные ресурсы в количестве 420 м³/сут по категории В и искусственные прогнозные ресурсы около 30 тыс. м³/сут по категории Р₁.

Предметом исследований на Оброшинском МППВ являлись гидро-геохимические процессы на сорбционном гидроксидном геохимическом барьере, образующемся при миграции сульфатных железосодержащих подземных вод через карбонатный барьер водоносной зоны трещинно-карстовых вод в мраморах (по лицензии на геологическое изучение недр СВЕ № 00393 ВП от 14.09.1995 г.).

В геологическом отношении Оброшинский участок приурочен к обнаженной сверху полосе мраморизованных известняков девона, которая контактирует с графитистыми оруденелыми парасланцами черно-сланцевой формации силур-девона, контактово-метаморфизованной в термальном ореоле Верх-Исетского гранитоидного батолита (рис. 1, 2) [14]. По данным поинтервального изучения шлифов керна скважин 11, 14, 15, 43, рудные минералы в парасланце составляют 1–2 % (в основном пирит, в малых количествах – пирротин и халькопирит). Оруденелые разности «черных сланцев» содержат повышенные концентрации золота, серебра и элементов платиновой группы (по результатам пробирных анализов). Вдоль контакта мраморов и парасланцев сформировалось месторождение бурого железняка, добываемого в XIX в. «по оброку» крестьянами для Верх-Исетского металлургического завода.

В тектоническом отношении Оброшинский участок находится в зоне действия Верх-Исетского разлома – разрывного нарушения лево-сдвигового характера большой амплитуды протяженностью около 500 км, к которому приурочена долина р. Исети.

Весьма показательным сопоставлением геологического строения на разных сторонах Верх-Исетского сдвига. Так, в створе «Екатеринбург-СИТИ» на правом берегу городского пруда Исети находится габбровый массив, а на левом берегу вскрыта линза мраморов (при изысканиях под станцию



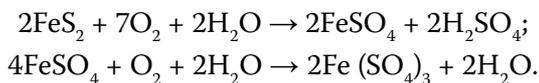
метро «Динамо») [15]. На Оброшинском участке полоса мраморов также не прослеживается на правом берегу, а русло Исети приурочено к тектоническому контакту мраморов и сланцев (рис. 2). Тектонические нарушения в метаморфических породах характеризуются, как правило, повышенной водопроницаемостью [16].

В гидрогеологическом отношении на Оброшинском участке водоносная зона трещинно-карстовых подземных вод в полосе мраморов дренирует слабоводоносную зону трещиноватости метаморфических пиритизированных пород, при этом наблюдается взаимообусловленное изменение параметров геофильтрационного и гидрогеохимического полей: водопроницаемость меняется почти на два порядка. При пересечении щелочного геохимического барьера метаморфизуется состав вод, характеризующийся сменой гидрогеохимических типов со II на IIIa (согласно классификации О.А. Алёкина, с дополнениями Е.В. Посохова [6]) и отложением лимонитизированных глин в карстовых полостях. В слабоводоносной зоне региональной трещиноватости метаморфических пиритизированных пород формируются воды II гидрогеохимического типа. В качестве примера приведем состав пробы воды, отобранный в конце пробной откачки из скважины 15э:

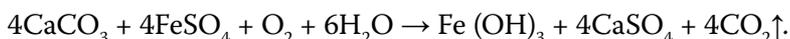
$$M_{0,18} \frac{SO_4 59 HCO_3 38 Cl_3}{Ca 52 Mg 29 (Na + K) 19'}$$

при этом $HCO_3^- < Ca^{2+} + Mg^{2+} < HCO_3^- + SO_4^{2-}$.

Образование «коагулянта-серноокислого железа» происходит особенно интенсивно в коре выветривания пиритизированных «черных сланцев». При окислении сульфидов в «черных сланцах» подземные воды обогащаются ионами SO_4^{2-} и Fe^{2+} :



В качестве элемента индикатора можно рассматривать растворенное в подземной воде железо, концентрация которого составляет около 2 мг/дм³. В Оброшинской «природной водоочистной системе» при смешении вод в зоне щелочного гидрогеохимического барьера происходит метаморфизация их химического состава по реакции, известной при искусственной водоподготовке воды:



При этом железо удаляется из подземных вод в виде хлопьев $Fe(OH)_3$, осаждающихся в карстовых полостях и образующих гнездовые залежи бурого железняка, в большей или меньшей мере кремнистого. В XIX в. на

Оброшинском железном руднике залежи бурого железняка были вскрыты дудками на глубину около 50 м. При коагуляции сернокислого железа в Оброшинской водоочистной системе одновременно устраняется коллоидная кремниевая кислота и марганец. В случае непредвиденного техногенного загрязнения могут осаждаться некоторые органические и радиоактивные вещества. Выделение углекислого газа в результате указанной реакции обуславливает следующие последствия: угнетение жизнедеятельности патогенных бактерий при загрязнении второго пояса зоны санитарной охраны; природную консервацию расфасованной воды; повышение устранимой жесткости воды:



Изменение химического состава подземных вод в Оброшинской «природной водоочистной системе» закономерно нарастает при удлинении пути миграционного потока сульфатных вод от границы щелочного гидрогеохимического барьера по карбонатным породам к водоприемной части скважины, что позволяет прогнозировать добычу питьевой подземной воды с качеством «под заказ» (под указанные в геологическом задании диапазоны значений элементов, нормируемых СанПиН 2.1.4.1074-01 («Питьевая вода»...)). Так, например, минеральную природную столовую воду «Гамаюн» можно добывать с дебитом 420 м³/сут в центральной части Оброшинской водоносной зоны скважиной 43-рэ с водоприемной частью в интервале глубин 38,0–74,5 м. По мере удаления от границ щелочного барьера к центральной части Оброшинской водоносной зоны вследствие метаморфизации химического состава жесткость воды увеличивается в четыре раза, достигая оптимальной концентрации для человека 4,1–4,7 ммоль/дм³, а содержание растворенного в воде железа (элемента-индикатора) уменьшается на два порядка, составляя менее 0,01 мг/дм³. «Формула Курлова» химического состава воды в скважине 43-рэ имеет следующий вид:

$$M_{0,4} \frac{\text{HCO}_3 73 \text{Cl} 17 \text{SO}_4 10}{\text{Ca} 77 \text{Mg} 20 (\text{Na} + \text{K}) 3} \text{pH}_{7,6},$$

при этом $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$; $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$, т. е. вода IIIa гидрогеохимического типа.

По результатам гидрогеоэкологического эксперимента на Оброшинском МППВ можно сделать вывод, что в зоне действия сорбционно-гидроксидного барьера могут формироваться естественные ресурсы подземных вод высшей категории качества, предъявляемого санитарно-эпидемиологическими нормами к питьевой воде, расфасованной в емкости.



Рис. 2. Виды обнажений полосы мрамора Оброшинского месторождения на мысе Гамаюн: – стрелкой обозначен коренной выход на акватории Верх-Исетского пруда, б – восточный бок; этикетка бутилированной питьевой воды «Гамаюн».

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В гидрогеологических складчатых областях геохимические барьеры следует рассматривать в качестве эффективного средства защиты от загрязнения зоны санитарной охраны водозаборов питьевых подземных вод, это должно быть учтено при подготовке актуализированной редакции СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны...».

Зона санитарной охраны Оброшинского месторождения пресных подземных вод находится в Оброшинском лесопарке и защищена от загрязнения сорбционным гидроксидным геохимическим барьером, а Верх-Исетский пруд в створе мыса Гамаюн (рис. 2) относится к водоемам рыбохозяйственного значения II категории и используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения северной части г. Екатеринбурга. Качество питьевых природных вод «Гамаюн» отвечает требованиям ГОСТ 2874-82 и СанПиН 2.1.4.1116-02, что подтверждено гигиеническим сертификатом Свердловского областного ЦСЭН от 18.11.1996 г. № 15-С-22, заключениями ЕМНЦ профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий, ТУ 0131-001-44644796-97, лицензиями и сертификатами соответствия на право пропуска продукции Уральского ЦСМ Госстандарта России. В соответствии с ТУ 10.04.06.132-88 и ТУ 0131-001-44644796-97 питьевая вода «Гамаюн» отнесена к минеральным природным столовым водам.

Балансовые эксплуатационные запасы минеральных природных столовых вод «Гамаюн» в трещиноватых и закарстованных мраморах нижнего девона Оброшинского склонового месторождения утверждены Государственной комиссией по запасам по состоянию на 01.05.1997 г. на неограниченный срок эксплуатации для промышленного розлива в количестве 420 м³/сут по категории В (Протокол ГКЗ № 454 от 10.12.1997 г.). Наименование питьевой воды «Гамаюн» было предложено НПО «Уралгеоэкология» для преемственности с названием «гамаюнской» культуры бронзового и железных веков (VII–VI вв. до н. э), которая была выделена в конце 1950-х годов Е.М. Берс и получила свое имя по названию мыса на Верх-Исетском пруду, где впервые была открыта стоянка с керамикой этого типа. В информационных этикетках воды «Гамаюн» использованы фрагмент картины В. Васнецова «Гамаюн – птица вещая» и поэтические строки А. Блока, вдохновленного этим образом (рис. 2).

Для обеспечения населения г. Екатеринбурга чистой питьевой водой и создания резервного водозабора, в соответствии с Постановлением № 878 от 29.12.1995 г. главы города А.М. Чернецкого, было создано предприятие смешанной формы собственности ООО «Муниципальное научно-производственное предприятие «Гамаюн» (65 % – долевое участие МО «Город Екатеринбург» и 35 % – «Уралгеоэкология» с уставным капиталом, эквивалентным десяти тысячам минимальных размеров оплаты труда (около 100 млн руб. в ценах 2018 г.). После разведки и сооружения водозабора минеральной природной столовой воды «Гамаюн» с соответствующей инфраструктурой, опытного розлива и успешной реализации бутилированной воды руководством «Уралгеоэкология» в 1999 г. было принято решение о безвозмездной передаче доли предприятия в пользу Муниципального образования «Город Екатеринбург».

За прошедшие два десятилетия с начала «заморозки» Оброшинского социального проекта в окрестностях Екатеринбурга не было разведано ни одного месторождения питьевых подземных вод (из 17 опосредованных участков) с утверждением ЭЗПВ по категориям А и В для сооружения резервных водозаборов питьевых подземных вод, имеющих без водоочистки сбалансированный для организма человека химический состав. Таким образом, в настоящее время в лесопарковой зоне Екатеринбурга нет альтернативы Оброшинскому резервному водозабору питьевых подземных вод. После завершения строительства кольцевой дороги, соединяющей Московскую и Серовскую автострады, доставка воды с мыса Гамаюн может стать более рентабельной, поэтому целесообразно организовать снабжение питьевой водой «Гамаюн» сети водоматов в жилых микрорайонах Екатеринбурга.

В ходе проведенного исследования выявлено, что в гидрогеологических складчатых областях возможно организовать реагентную водоподготовку в трещинно-карстовых пластах с помощью геохимических барьеров. В Восточно-Уральской гидрогеологической складчатой области выделен восточноуральский вид месторождений питьевых подземных вод, где происходит самоочищение на сорбционном гидроксидном барьере. К таким месторождениям относится Оброшинское, которое рассматривается как резервный питьевой источник для населения г. Екатеринбурга, обеспечивающий безопасность водоснабжения в случае катастрофического техногенного загрязнения водохранилищ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скалин А.В., Скалин А.А. Способ гидрогеодинамической очистки от нефтепродуктов водоносных пластов и гидрогеодинамическая ловушка для нефтепродуктов. Патент на изобретение РФ № 2666561. Бюл. № 26. 2018.
2. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Т.1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 611 с.
3. Перельман А.И. Геохимия: учебник. Изд. 3-е. М.: ЛЕНАНД, 2016. 544 с.
4. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
5. Бабушкин В.Д., Гаев А.Я., Гацков В.Г., Миронов С.В., Штерн В.О. Научно-методические основы защиты от загрязнения водозаборов хозяйственно-питьевого назначения. Пермь: Перм. ун-т, 2003. 264 с.
6. Яндыганов Я.Я., Власова Е.Я., Скалин В.А. Водохозяйственный кластер промышленного района (проблемы, эффективность). Екатеринбург: УГЭУ, 2016. 281 с.
7. Фрог Б.Н., Левченко А.П. Водоподготовка: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГУ, 2003. 680 с.
8. Грязнов О.Н. Инженерно-геологические условия Урала. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. горного ун-та, 2017. 240 с.
9. Семенищев В.С., Воронина А.В., Никифоров А.Ф. Определение радона-222 в природных источниках питьевой воды в окрестностях города Екатеринбурга // Водное хозяйство России. 2014. № 4. С. 95–101.
10. Водные ресурсы Свердловской области / под научн. ред. Н.Б. Прохоровой. ФГУП РосНИИВХ. Екатеринбург: АМБ, 2004. 432 с.
11. Носаль А.П., Шубарина А.С., Сокольских И.И. Повышение безопасности водоснабжения крупных населенных пунктов в период маловодья (на примере города Екатеринбурга) // Водное хозяйство России. 2011. № 6. С. 33–46.
12. Палкин С.В., Палкин С.С., Рыбникова Л.С. К вопросу о возможности полного водообеспечения города Екатеринбурга подземными водами // Водное хозяйство России. 2011. № 5. С. 75–88.
13. Боровский Б.В., Хордикайнен М.А., Язвин Л.С., Зайцев Г.И. Разведка и оценка месторождений эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. М.: Недра, 1976. 247 с.

14. Язева Р.Г., Бочкарёв В.В. Силурийская островная дуга Урала: структура, развитие, геодинамика // Геотектоника. 1995. № 3. С. 76–85.
15. Скалин А.А. Опыт гидрогеологических изысканий в скальном массиве для высотного строительства «Екатеринбург-СИТИ» // Жилищное строительство. 2017. № 11. С. 7–12.
16. Тагильцев С.Н., Кибанова Т.Н. Закономерности поля тектонических напряжений в геологической среде Краснотурьинского рудного района // Изв. Урал. гос. горного ун-та. 2017. Вып. 2 (46). С. 43–46.

Сведения об авторах:

Скалин Анатолий Владимирович, канд. геол.-минерал. наук, генеральный директор, ООО НПО «Уралгеоэкология», Россия, 620027, г. Екатеринбург, ул. Мельковская, 9; e-mail: inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru

Скалин Владислав Анатольевич, канд. экон. наук, коммерческий директор, ООО НПО «Уралгеоэкология», Россия, 620027, г. Екатеринбург, ул. Мельковская, 9; e-mail: inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru

Скалин Антон Анатольевич, технический директор. ООО НПО «Уралгеоэкология», Россия, 620027, г. Екатеринбург, ул. Мельковская, 9; e-mail: inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru