

Перспективы использования глубокозалегающих водоносных горизонтов для закачки слабоминерализованных вод

А.М. Янников¹, С.А. Янникова¹, И.В. Зырянов²✉, А.Ю. Корепанов¹

¹ Институт «Якутнiproalmaz», ПАО АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация

² Политехнический институт – филиал в Мирном Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Мирный, Российская Федерация

✉ZyryanovIV@alrosa.ru

Резюме: В процессе ведения добычных работ на коренных месторождениях алмазов, а также при дальнейшем обогащении кимберлитовых пород формируются дренажные и оборотные воды, требующие последующей очистки или иного способа экологически безопасной утилизации. В данной статье рассмотрены возможность и перспективы использования глубокозалегающих водоносных комплексов для закачки указанных типов вод, образующихся на обогатительных и добычных объектах Айхальского ГОКа. Выполнен анализ структурно-тектонического строения территории с целью выделения перспективных участков, охарактеризованы основные гидродинамические параметры целевых коллекторов. Дана экспертная оценка целесообразности проведения дальнейших исследований, определены основные направления, описаны объёмы и их методологическая составляющая.

Ключевые слова: Якутская алмазоносная провинция, Алаkit-Мархинское кимберлитовое поле, дебалансные воды, нижнекембрийский водоносный комплекс, карбонатные коллекторы, насыщенные рассолы, ненасыщенные рассолы

Для цитирования: Янников А.М., Янникова С.А., Зырянов И.В., Корепанов А.Ю. Перспективы использования глубокозалегающих водоносных горизонтов для закачки слабоминерализованных вод. *Горная промышленность*. 2022;(1):76–81. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-76-81>

Prospects of using deep-lying aquifers for injection of low-mineralized waters

A.M. Yannikov¹, S.A. Yannikova¹, I.V. Zyrianov²✉, A.Y. Korepanov¹

¹ Yakutniproalmaz Institute, AK "ALROSA", Mirny, Russian Federation

² Mirny Polytechnic Institute, Branch of the Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russian Federation

✉ZyryanovIV@alrosa.ru

Abstract: In the course of mining indigenous diamond deposits, as well as during further processing of kimberlite rocks, drainage and recycling waters are formed that require subsequent purification or other method of environmentally safe disposal. This article discusses the possibility and prospects of using deep-lying aquifers for injection of these types of waters produced by the processing and mining facilities of the Aikhal GOK. The structural and tectonic patterns of the territory are analyzed in order to identify promising areas, and the main hydrodynamic parameters of the target reservoirs are characterized. An expert assessment of the feasibility of further research is given, the main directions are identified, the volumes and their methodological component are described.

Keywords: Yakut diamond-bearing province, Alakit-Markhinsky kimberlite field, residual waters, Lower Cambrian aquifer complex, carbonate reservoirs, saturated brines, unsaturated brines

For citation: Yannikov A.M., Yannikova S.A., Zyrianov I.V., Korepanov A.Y. Prospects of using deep-lying aquifers for injection of low-mineralized waters. *Russian Mining Industry*. 2022;(1):76–81. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-76-81>

Введение

Особенности горно-геологического строения коренных месторождений Западной Якутии, а также технологический цикл обогащения, применяемый в настоящее время при добыче алмазов, приводят к формированию минерализованных вод, требующих очистки, в объёме более 1 млн м³ в год.

Для решения данного вопроса реализован отдельный сбор природных рассолов и слабоминерализованных вод. Данные технические решения позволяют собрать высокоминерализованные дренажные воды, с минерализацией

больше 60 г/л, закачивать на участках, где в качестве рас-солпоглощающей толщи выступают коллекторы в толще многолетнемерзлых пород, а слабоминерализованные воды (менее 60 г/л) – складировать в бессточные накопители (хвостохранилища). Особенностью выбранных технических решений является вопрос дальнейшей очистки накопленных в хвостохранилищах вод при их рекультивации, т.к. по сути применяемые в настоящее время технические решения только отсрочивают решение проблемы [1–4].

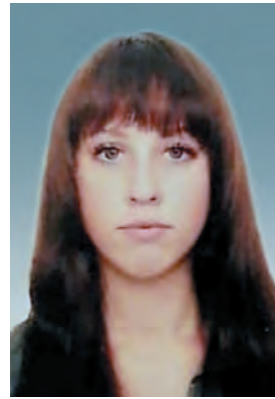
На наш взгляд, одним из вариантов окончательного



**Янников
Алексей Михайлович** – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией горно-геологических проблем разработки месторождений Института «Якутнипроалмаз», ПАО АК «АЛРОСА»



**Зырянов
Игорь Владимирович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой горного дела, Политехнического института – филиала в Мирном Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова



**Янникова
Светлана Александровна** – ведущий инженер лаборатории горно-геологических проблем разработки месторождений Института «Якутнипроалмаз», ПАО АК «АЛРОСА»



**Корепанов
Алексей Юрьевич** – заведующий сектором гидрогеологических исследований лаборатории горно-геологических проблем разработки месторождений Института «Якутнипроалмаз», ПАО АК «АЛРОСА»

решения вопроса утилизации слабоминерализованных вод явилась бы их закачка в глубоководные, свыше 1200 м от дневной поверхности и находящиеся в области горных пород с положительной температурой, подмерзлотные водоносные комплексы. Для первичного обоснования предложенного решения рассмотрим геолого-гидрогеологические условия территории исследований, а также выполним гидрогеологическую стратификацию Алаakit-Мархинского кимберлитового поля с краткой характеристикой выделенных единиц.

Геолого-гидрогеологические условия территории исследований

Геологические условия изучаемой площади, а именно наличие двух этажей строения (кристаллического фундамента и осадочного чехла), определяются ее нахождением в пределах древнего кратона – Сибирской платформы, а именно приуроченностью к сочленению северо-восточной части Тунгусской синеклизы и юго-западной Анабарской антеклизы [5].

Осадочный чехол изучаемой площади сложен палеозойскими карбонатно-терригенными и карбонатными породами, относящимися к двум циклам осадконакопления, вулканогенно-осадочным породам пермского и триасового периодов, а также четвертичных субаэральными отложениями различных генетических типов. Общая мощность осадочной толщи изменяется от 2200 до 3600 м. Выделяемые структурные этажи, маркируются перерывами в осадконакоплении, а также угловыми и стратиграфическими несогласиями [6].

Нижнепалеозойские отложения перекрыты магматическими породами траптовой формации пермо-триасового возраста. Магматические образования, известные в районе работ, относятся к двум эпохам платформенного магматизма: среднепалеозойской (D3-C1) и позднепалеозойской-раннемезозойской (P2-T1).

Первая эпоха выделяется по проявлениям ультраосновного магматизма, а именно по формации кимберлитов, слагающих трубки взрыва. Вторая эпоха связана с внедрением

магм основного состава траптовой формации: долеритов и габбро-диабазов, представленных практически всеми типами и формами гипабиссальных интрузий [1] (рис. 1).

Кристаллический фундамент сложен анабарским гранулитовым комплексом, ассоциирующимся с далдынской, верхнеанабарской и хапчанской сериями архея. Описание пород кристаллического фундамента выполнялось при бурении параметрической скважины №706 и по ксенолитам многочисленных кимберлитовых трубок Алаakit-Мархинского и Далдынского полей. В качестве объекта аналога выступали породы Анабарского кристаллического массива.

Далдынская серия в пределах участка исследований сложена преимущественно глубоко метаморфизованными бескварцевыми сланцами. Верхнеанабарская серия представлена кварцсодержащими метаморфизованными кварцитами, с линзами гнейсов и высокоглиноземистых сланцев. Хапчанская серия сложена преимущественно



Рис. 1
Геологическая карта территории исследований

Fig. 1
Geological map of the surveyed area

гнейсами биотит-гранатового состава и кальцифирами. В зонах динамического воздействия глубинных разломов, определяемых по широкому распространению зон смятия и дробления, распространены метаморфические породы верхнелапидарского комплекса, сформировавшиеся в результате диафтореза в условиях амфиболитовой фации в позднелавинское – раннепротерозойское время [6–8].

Гидрогеологические условия Алакит-Мархинского кимберлитового поля определяются его принадлежностью к Тунгусскому криоартезианскому бассейну [9]. В пределах осадочного чехла выделяются следующие водоносные горизонты и комплексы:

1. *Надмерзлотные воды* на территории исследований формируются в пределах сезонно-талого слоя (СТС) и в несквозных подрусловых и подозёрных таликах.

2. *Межмерзлотные воды* относятся к Нижнеордовикскому межмерзлотному водоносному комплексу (далее НоВК). Характерной особенностью которого является спорадичность планового распространения, и наличие многолетне-мерзлых пород выше и ниже рассолонасыщенной части разреза. Линзы НоВК характеризуются незначительным напором подземных вод, крайне низкими фильтрационными параметрами и невысокой водообильностью отложений.

Водоносные комплексы подмерзлотных вод.

3. Верхнекембрийский подмерзлотный водоносный комплекс характеризуется повсеместным распространением, приурочен к карбонатным разностям отложений моркокинской (C_3 mgk) и мархинской (C_3 mgh) свит верхнего кембрия, характеризующихся частым тонким переслаиванием глинистых и карбонатных пород лагунной фации. Верхнекембрийские отложения вскрыты в интервале глубин 550–1220 м, общая мощность их составляет 670 м. Породы верхнекембрийского водоносного комплекса характеризуются низкими коллекторскими свойствами. Значения коэффициентов водопроницаемости колеблются в пределах 0,02–0,60 м²/сут с преобладанием величин более 0,1 м²/сут, коэффициентов пьезопроводности – 103–104 м²/сут. Повышенными на порядок значениями параметров (до 10 раз) отличаются лишь зоны динамического воздействия основных региональных разломов; значение коэффициента водопроницаемости здесь составляет 5,2 м²/сут, коэффициента пьезопроводности – 1,5*10⁵ м²/сут. Верхнекембрийский водоносный комплекс напорный, величина пластового давления коллекторов составляет 40–55 кгс/см², что соответствует уровню от 208 до 312 м от кровли. По химическому составу воды относятся к хлоридным натриево-магнево-кальциевым рассолам различного насыщения, с минерализацией, от 144 до 348 г/л. Причём с увеличением глубины залегания коллекторов увеличивается и параметр минерализации рассолов [10; 11].

Среднекембрийский водоносный комплекс в пределах изучаемой территории вскрывается на глубинах порядка 1300 м от дневной поверхности (а.о. –650/–700 м). Общая мощность комплекса достигает 600 м. Водопроницаемость изменяется в пределах от 0,01 до 0,35 м²/сут. Подземные воды обладают напором над кровлей до 350 м. Они представлены хлоридными рассолами с минерализацией до 403 г/л. От подошвы верхнекембрийского водоносного комплекса среднекембрийский водоносный комплекс изолирован практически водоупорными породами нижней пачки Мархинской свиты мощностью 90–110 м.

Нижнекембрийский водоносный комплекс был вскрыт в интервале 2540–2650 м от дневной поверхности. Водосодержащие коллекторы приурочены к карбонатно-терриген-

ным породам эмьяксинской свиты. Комплекс напорный, напор над кровлей составляет до 1350 м (пластовое давление составляет порядка 170 атм). Водопроницаемость изменяется по разрезу в пределах от 0,01 до 0,2 м²/сут.

Протерозойский водоносный комплекс и переходная зона между осадочным чехлом и кристаллическим фундаментом вскрыты в интервале 2868–3102 м от дневной поверхности. При проведении опытно-фильтрационных работ с данного интервала не было получено значимых притоков флюидов, что позволяет охарактеризовывать данные коллекторы как «сухие».

Обоснование возможности использования глубокозалегающих водоносных комплексов

Суммарный прогнозный объём, формируемый на объектах Айхальского ГОКа слабоминерализованных вод (с минерализацией 4–15 г/л), требующих выбора схемы экологически безопасной утилизации, в течение ближайших 10 лет составит ≈ 13 млн м³. Как было сказано ранее, закачка вод с такой некондиционной минерализацией в толщу многолетнемерзлых пород невозможна, т.к. требуется ее увеличение до 60–80 г/л, что при таких объёмах вод технически сложно выполнимо и экономически нецелесообразно. Поэтому авторами предлагается вариант закачки слабоминерализованных вод в глубокозалегающие региональные среднекембрийский, нижнекембрийский и протерозойский водоносные комплексы (далее СВК, НВК и ПрВК), имеющие повсеместное распространение. По причине их залегания гораздо ниже нулевой изотермы, а также наличия в разрезе водоносных комплексов вод с высокой минерализацией фактор минерализации подаваемых в недра вод не является определяющим. В Алакит-Мархинском районе указанные водоносные комплексы были вскрыты нефтепоисковой параметрической скважиной №706. Результаты, полученные при бурении, были использованы для представленной ранее гидрогеологической стратификации разреза.

Использование для опытной закачки пробуренной ранее скважины №706 не совсем целесообразно, т.к. данная скважина в настоящее время затампонирована. Негативным фактором также является ее расположение в центральной части локальной положительной структуры кристаллического фундамента (рис. 2), что было продиктовано ее назначением – поиском скоплений углеводородов и каустобиолитов, приуроченных, как правило, к положительным структурам – «ловушкам». Но такие зоны, как правило, характеризуются пониженной и затухающей трещиноватостью, т.к. находятся в рамках палеорельефа, на «водоразделах». Поэтому бурение поисково-оценочных скважин необходимо производить в склоновых зонах локальных понижений кристаллического фундамента, коррелируемых с зонами линейного растяжения в палеорифтовых системах и зонами динамического воздействия главных региональных разломов. Авторами предлагается бурение четырёх поисково-оценочных скважин глубиной порядка ≈ 2800 м, расположенных в рамках восточной части Айхальской депрессии, в районе внедрения убогоалмазонасных трубок «Ноябрьская» и «Надежда», а также на северном склоне Центральной депрессии, в зоне динамического воздействия Северо-восточного глубинного разлома (рис. 2). Потенциальная приемистость коллекторов на данных участках должна быть обеспечена следующими факторами:

1. Протерозойский комплекс приурочен к венд-рифейским отложениям, несогласно залегающим на кристаллическом фундаменте (подтверждено скважиной №706).

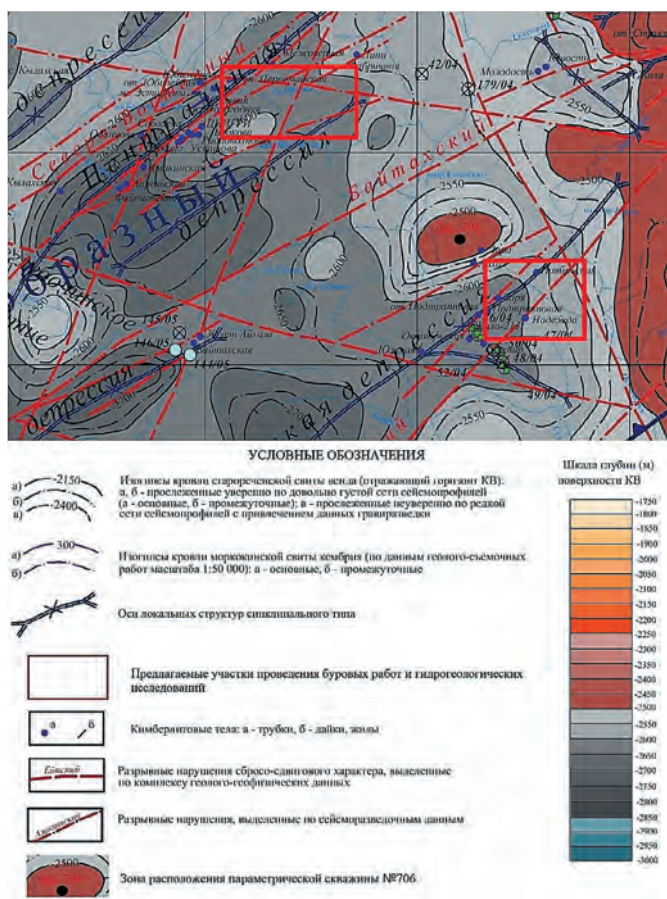


Рис. 2
Структурно-тектоническая
схема территории
исследований

Fig. 2
Structural and tectonic
diagram of the surveyed area

Именно потенциальное наличие зон открытой трещиноватости на контакте осадочного чехла и кристаллического фундамента в зонах линейных растяжений и в палеорифтовых системах может обеспечить существенную дополнительную приемистость опытных скважин.

2. Области питания данных комплексов территориально приурочены к анабарскому кристаллическому массиву, и в настоящее время они заморожены; т.е. вкуче с потенциальной глубиной разгрузки, произошедшей в течение как четвертичных оледенений, так и на этапах кайнозойской и неотектонической активизации и сдвижений, это должно было поспособствовать формированию дополнительной потенциальной «свободной емкости» коллекторов среднекембрийского, нижнекембрийского и протерозойского водоносных комплексов.

3. Глубокое залегание указанных водоносных комплексов даже в режиме свободного налива обеспечивает высокое (более 200 кгс/см²) призабойное и пристволовое давление.

4. Горно-геологические условия территории позволяют в случае получения недостаточных или неудовлетворительных результатов по проницаемости коллекторов среднекембрийского, нижнекембрийского и протерозойского водоносных комплексов выполнить в опытных скважинах гидроразрыв пластов, который не повлияет на гидрогеологические условия обрабатываемых месторождений и не создаст дополнительной экологической нагрузки на территорию.

Для дополнительного обоснования принципиальной возможности закачки в указанные водоносные комплексы выполним прогнозные расчёты, используя следующие решения динамики подземных вод и допущения: для изо-

лированного в разрезе и неограниченного в плане пласта закачиваемые воды могут занять часть его порового пространства только за счёт увеличения степени упругого сжатия всего объёма пластовых вод и вмещающих пород, что обеспечивается вследствие необратимого повышения пластового давления [12–14].

Повышение пластового давления прогнозируется на основе формулы Тейса, которая для условия $\frac{r^2}{4at} \leq 0,1$ с достаточной для прогноза точностью заменяется приближённой формулой:

$$\frac{100\Delta P}{\gamma} = \frac{Q}{4\pi K_m} \ln \frac{2,25at}{R_k^2} \quad (1)$$

где ΔP – изменение давления, МПа;

γ – объёмная масса закачиваемых вод, т/м³;

Q – производительность закачки, м³/сут;

K_m – водопроводимость, м²/сут;

a – пьезопроводность, м²/сут;

R_k – приведенный радиус нагнетательного узла, м;

t – время эксплуатации, сут

Из формулы 1 получим изменение давления:

$$\Delta P = \frac{\gamma \times Q}{400 \times \pi \times K_m} \ln \frac{2,25 \times a \times t}{R_k^2} \quad (2)$$

где $R_k = 0,56 \times \sqrt{F}$

Выполним расчет:

Данные:

водопроводимость $K_m = 3$ м²/сут;

пьезопроводность $a = 10\,000$ м²/сут;

дебит закачки $Q = 120$ м³/ч (2880 м³/сут);

объёмная масса закачиваемых вод $\gamma = 1,0$ т/м³;

куст из четырех скважин на площади (100 x 100 м)

$F = 10\,000$ м²;

время работы участка закачки $t = 10$ лет (3650 сут).

Расчёт:

$$\Delta P = \frac{1 \times 2880}{400 \times 3,14 \times 3} \ln \frac{2,25 \times 10000 \times 3650}{(0,56 \sqrt{10000})^2} = \frac{2880}{3768} \ln \frac{82125000}{3136}$$

$= 0,76 \times 10,2 = 7,8$ МПа, т.е.

повышение уровня составит 780 м.

Исходя из выполненных выше расчетов и статического уровня водоносных комплексов справедливо сделать вывод, что максимальная производительность 4 закачных скважин, пробуренных по указанной схеме, в режиме свободного налива составит = 140 м³/ч (3360 м³/сут). Используемая в расчётах прогнозная величина коэффициента водопроводимости (3 м²/сут) является ожидаемым параметром при бурении скважин на рекомендуемых участках.

Выполненный прогноз основан на результатах корреляции влияния глубинных разломов на гидродинамические условия месторождений Мирнинского кимберлитового поля, являющегося по сути для решения данной задачи объектом-аналогом.

Для главных месторождений трубок «Интернациональная» и «Мир» влияние глубинных разломов независимо от глубины залегания водоносного комплекса происходило схожим образом [1, с. 96–121; 15; 16]. Наблюдалось пропорциональное увеличение гидродинамических характеристических коэффициентов. Это обусловлено не только структурно-тектоническими особенностями формирования территории, но и литолого-фациальными условиями образования пород-коллекторов.

Применительно к территории исследований влияние зон динамического воздействия глубинных разломов было изучено для верхнекембрийского водоносного комплекса (далее – ВВК) по нескольким десяткам скважин, пробуренным в разное время в пределах карьерных полей трубок «Айхал» и «Юбилейная». По результатам интерпретации опытно-фильтрационных работ проницаемость коллекторов ВВК в зонах влияния разрывных нарушений увеличивалась на порядок (в 10–12 раз) относительно средних параметров [17–19].

Указанные факты, на наш взгляд, делают правомочным увеличение полученных по скважине №706 характеристических гидродинамических коэффициентов, характеризующих СВК, НВК и ПрВК, на подобную величину.

Заключение

На основании результатов проведенных исследований правомочно сделать следующие выводы:

Проблема безопасной утилизации слабоминерализованных вод является весьма актуальной и требует своевременного проработанного технического решения, одним из которых может являться их закачка в глубокозалегающие водоносные комплексы. Проведенный анализ геолого-гидрогеологического и структурно-тектонического строения территории позволяет с большой уверенностью говорить о целесообразности применения данного метода.

Для реализации закачки слабоминерализованных вод авторами рекомендуется бурение четырех поисково-оценочных скважин глубиной порядка ≈ 2800 м на следующих участках:

– первый участок предлагается в рамках восточной части Айхальской депрессии, в районе внедрения убогоалмазных трубок «Ноябрьская» и «Надежда»;

– второй опытный участок – на северном склоне Центральной депрессии, в зоне динамического воздействия Северо-восточного глубинного разлома.

3. Для дополнительного подтверждения возможности использования коллекторов среднекембрийского, нижнекембрийского и протерозойского водоносных комплексов были выполнены расчёты с применением стандартных решений динамики подземных вод. Результаты расчётов также указывают на возможность организации участков закачки в рамках данных территорий.

4. Реализация предложенного варианта утилизации слабоминерализованных вод позволит решить вопрос с последующей рекультивацией существующего хвостохранилища, так как несомненным плюсом будет являться плановая постоянная закачка образующихся дебалансных вод, а не постоянное их накопление в бессточных накопителях с переносом решения вопроса на последующие временные периоды.

Список литературы

1. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. *Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии*. Мирный: Мирнинская типография; 2013. 568 с.
2. Лоншаков В.Г., Дружинин И.А., Тимушева Л.В. Обзор проблем в области гидрогеологии и пути их решения. В сб.: *Сборник научных трудов 2-й научно-практической конференции по вопросам гидрогеологии и водообеспечения, г. Ижевск, 30 июня 2020 г.* Ижевск: Ижевский нефтяной научный центр; 2020. С. 45–52.
3. Flexer V., Vaspineiro C.F., Galli C.I. Lithium recovery from brines: a vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*. 2018;639:1188–1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
4. Choubey P.K., Kim M.-S., Srivastava R.R., Lee J.-C., Lee J.-Y. Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: lithium. Part I: from mineral and brine resources. *Minerals Engineering*. 2016;89:119–137. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.01.010>
5. Данилов Ю.Г. Месторождения алмазов в Якутии. В кн.: *Алмазы. Алмазодобывающая промышленность: сб. науч.-техн. информации*. 2012. Вып. 2. С. 5–7.
6. Кирюхин В.А. *Региональная гидрогеология*. СПб.: СПГИ; 2005. 344 с.
7. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. *Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии*. Иркутск: ИрГТУ; 2008. 507 с.
8. Дроздов А.В. Горно-геологические особенности глубоких горизонтов трубки Удачная. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(3):153–165.
9. Дроздов А.В., Мельников А.И. Роль разрывных дислокаций в обводнении алмазодобывающих рудников Якутии. *Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2014;(2):71–81. Режим доступа: <https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/11548/p95.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
10. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Трифонов Н.С., Павлов С.С., Ильин А.В. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная. В кн.: Новиков Д.А., Алексеев С.В., Сухорукова А.Ф. (ред.) *Подземные воды востока России: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием)*, г. Новосибирск, 18–22 июня 2018 г. Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет; 2018. С. 47–52.
11. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Шоуакар-Сташ О., Фрейш Ш., Шабо Ф., Кононов А.М. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2007;48(3):291–304.
12. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vakhromeev A.G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects. *Geochemistry*. 2020;117:104588. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104588>
13. Bozau E., Sattler C.-D., van Berk W. Hydrogeochemical classification of deep formation waters. *Geochemistry*. 2015;52:23–30. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.10.018>
14. Dubinski J. Sustainable development of mining mineral resources. *Journal of Sustainable Mining*. 2013;12(1):1–6. <https://doi.org/10.7424/jsm130102>
15. Musakaev N.G., Borodin S.L., Rodionov S.P. Mathematical model of the downward two-phase flow of a heat-transfer agent in an injection well. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2019;12(3):52–62. <https://doi.org/10.14529/mmp190305>
16. Гладков А.С., Дроздов А.В., Кошкарев Д.А., Потехина И.А., Афонькин А.М. Оценка структурно-тектонического строения глубоких горизонтов трубки Айхал для постановки гидрогеомеханического мониторинга. *Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2015;(2):46–56.
17. Янников А.М. Газодинамическая характеристика коллекторов во внешнем контуре месторождения трубка «Интернациональная». *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018;(4):98–101. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1672>
18. Янников А.М. Интенсивность и продолжительность движения пластовых вод из малодебитных коллекторов толбачанской свиты. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018;(1):139–141. <https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1461>
19. Янников А.М. Изменения коэффициента проводимости в околотрубочном пространстве кимберлитовой трубки «Интернаци-

ональная». Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2019;(2):146–149. <https://doi.org/10.17308/geology.2019.2/1804>

References

1. Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. *Mining and geological features of indigenous diamond deposits in Yakutia*. Mirnyi: Mirninskaya tipografiya; 2013. 568 p. (In Russ.)
2. Lonshakov V.G., Druzhinin I.A., Timusheva L.V. Overview of hydrogeological challenges and ways of their solution. In: *Collection of scientific papers of the 2nd Scientific and Practical Conference on Hydrogeology and Water Supply, Izhevsk, June 30, 2020*. Izhevsk: Izhevsk Petroleum Research and Development Centre; 2020, pp. 45–52. (In Russ.)
3. Flexer V., Baspineiro C.F., Galli C.I. Lithium recovery from brines: a vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*. 2018;639:1188–1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
4. Choubey P.K., Kim M.-S., Srivastava R.R., Lee J.-C., Lee J.-Y. Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: lithium. Part I: from mineral and brine resources. *Minerals Engineering*. 2016;89:119–137. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.01.010>
5. Danilov Yu.G. Diamond deposits in Yakutia. In: *Diamonds. Diamond mining industry: collection of scientific and technical information*. 2012, iss. 2, pp. 5-7. (In Russ.)
6. Kiryukhin V.A. *Regional hydrogeology*. St. Petersburg: SPGGI; 2005. 344 p. (In Russ.)
7. Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. *Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2008. 507 p. (In Russ.)
8. Drozdov A.V. Mining and geological features of deep horizons of the Udachnaya pipe. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(3):153–165. (In Russ.)
9. Drozdov A.V., Melnikov A.I. Rupture dislocation role in diamond mine water encroachment in Yakutia. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*. 2014;(2):71–81. (In Russ.) Available at: <https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/11548/p95.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
10. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Trifonov N.S., Pavlov S.S., Iliin A.V. Deep-seated brines of the kimberlite pipe Udachnaya. In: Novikov D.A., Alekseev S.V., Sukhorukova A.F. (eds). *Groundwaters of Eastern Russia: Proceedings of the All-Russian Meeting on Groundwaters of Eastern Russia (XXII Meeting on Groundwaters of Siberia and the Far East with international participation), Novosibirsk, June 18–22, 2018*. Novosibirsk: Novosibirsk National Research State University; 2018, pp. 47–52.
11. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Borisov V.N., Kononov A.M., Shouakar-Stash O., Frapce S.K., Chabaux F. Isotopic composition (H, O, Cl, SR) of ground brines of the Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2007;48(3):225–236. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.02.007>
12. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vakhromeev A.G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects. *Geochemistry*. 2020;117:104588. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104588>
13. Bozau E., Sattler C.-D., van Berk W. Hydrogeochemical classification of deep formation waters. *Geochemistry*. 2015;52:23–30. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.10.018>
14. Dubinski J. Sustainable development of mining mineral resources. *Journal of Sustainable Mining*. 2013;12(1):1–6. <https://doi.org/10.7424/jsm130102>
15. Musakaev N.G., Borodin S.L., Rodionov S.P. Mathematical model of the downward two-phase flow of a heat-transfer agent in an injection well. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & -omputer Software*. 2019;12(3):52–62. <https://doi.org/10.14529/mmp190305>
16. Gladkov A.S., Drozdov A.V., Koshkarev D.A., Potekhina I.A., Afonkin A.M. Evaluation of structural and tectonic framework of Aikhal kimberlite pipe deep horizons for hydrogeomechanical monitoring setting. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*. 2015;(2):46–56. (In Russ.)
17. Yannikov A.M. The gasdynamic characteristic of the collectors in external circuit of field the “tube International”. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2018;(4):98–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/geology.2018.4/1672>
18. Yannikov A.M. The intensity and duration the movement of formation waters from marginal collectors tolbachinskii suite. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2018;(1):139–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/geology.2018.1/1461>
19. Yannikov A.M. The analysis of a square distribution of conductivity factor in collectors of tolbachansky suite in a cross-cutting mass of field the tube “International”. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2019;(2):146–149. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/geology.2019.2/1804>

Информация об авторах

Янников Алексей Михайлович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией горно-геологических проблем разработки месторождений Института «Якутнiproalmaz», ПАО АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2169-123X>; e-mail: YannikovAM@alrosa.ru

Зырянов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой горного дела, Политехнический институт – филиал в Мирном Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Мирный, Российская Федерация; e-mail: ZyryanovIV@alrosa.ru

Янникова Светлана Александровна – ведущий инженер лаборатории горно-геологических проблем разработки месторождений Института «Якутнiproalmaz», ПАО АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация

Корепанов Алексей Юрьевич – заведующий сектором гидрогеологических исследований лаборатории горно-геологических проблем разработки месторождений Института «Якутнiproalmaz», ПАО АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация; e-mail: KorepanovAYu@alrosa.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.12.2021

Поступила после рецензирования: 19.01.2022

Принята к публикации: 22.01.2022

Information about the authors

Alexey M. Yannikov – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of Mining and Geological Problems of Field Development of the Yakutniproalmaz Institute, AK «ALROSA», Mirny, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2169-123X>; e-mail: YannikovAM@alrosa.ru

Igor V. Zyryanov – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department Mining, Mirny Polytechnic Institute, Branch of the Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russian Federation; e-mail: ZyryanovIV@alrosa.ru

Svetlana A. Yannikova – Lead Engineer of the Laboratory of Mining and Geological Problems of Field Development of the Yakutniproalmaz Institute, AK «ALROSA», Mirny, Russian Federation

Alexey Y. Korepanov – Head of the Hydrogeological Research Sector of the Laboratory of Mining and Geological Problems of Field Development of the Yakutniproalmaz Institute, AK «ALROSA», Mirny, Russian Federation; e-mail: KorepanovAYu@alrosa.ru

Article info

Received: 20.12.2021

Revised: 19.01.2022

Accepted: 22.01.2022