

## Перспективы использования коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса для развития системы закачки рудника «Удачный»

©2023 А. М. Янников<sup>✉</sup>

*Институт «Якутнипроалмаз» АК АЛРОСА (ПАО), ул. Ленина, 39,  
678174, Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация*

### Аннотация

*Введение:* Разработка уникального месторождения алмазов – трубки Удачная с 2015 г. продолжается подземным способом, при существенном, относительно периода открытой отработки, росте притоков природных рассолов, связанных с более совершенным вскрытием подземными горными выработками среднекембрийского водоносного комплекса. Это вызвало необходимость строительства защитных систем опережающего водопонижения. Ресурсный потенциал месторождения позволяет рассматривать дальнейшее развитие и строительство рудника до глубины 1630 м, что приведёт к ещё большему росту притоков природных рассолов, особенно после вскрытия на глубине 1250-1300 м от дневной поверхности коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса. Описываемая ситуация потребовала совершенствования существующей системы закачки высокоминерализованных дренажных вод. В настоящее время в дополнение к уже опробованной системе закачки рассолов в коллекторы подошвенной части многолетнемерзлых пород, разработана и реализована технология закачки в глубокозалегающие коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса на участках «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный». В данной статье рассматриваются перспективы использования глубокозалегающих коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса, по результатам анализа структурно-тектонической карты Далдынского кимберлитового поля выделяются наиболее перспективные для строительства новых участков закачки площади.

*Методика:* Для изучения гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса в рамках объекта изучения были использованы общепринятые методики, используемые при изучении динамики подземных вод. Определение гидрогеологических параметров проводилось в процессе проведения комплекса опытных полевых работ, выполненных в 2020-2022 гг. Анализ структурно-тектонических условий Далдынского кимберлитового поля производился по результатам геологического изучения территории при проведении комплекса поисковых работ на алмазы.

*Результаты и обсуждение:* Выполненные исследования и последующие расчёты позволяют рассматривать коллекторы регионального нижнекембрийского водоносного комплекса, как целевой объект для дальнейшего расширения системы закачки дренажных вод рудника «Удачный». Учитывая литолого-фациальные условия Далдынского кимберлитового поля, наиболее предпочтительным выглядит расположение участков закачки севернее Октябрьского разлома, как границы, влияющей не только на распределение фильтрационных параметров коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса, но и являющимся границей между криоартезианскими бассейнами.

*Заключение:* Выявленные закономерности формирования участков, рассматриваемых как перспективные, будут учитываться при будущем строительстве в рамках расширения существующей системы закачки рудника.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

<sup>✉</sup> Янников Алексей Михайлович, e-mail: [yannikov90@mail.ru](mailto:yannikov90@mail.ru)

**Ключевые слова:** Далдынское кимберлитовое поле, трубка «Удачная», природные рассолы, участки закачки.

*Для цитирования:* Янников А. М. Перспективы использования коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса для развития системы закачки рудника «Удачный» // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2023. № 2. С. 104–115. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/2/104–115>

### Введение

Трубка «Удачная» - крупнейшее по объемам сырья и размерам рудного тела месторождение алмазов в России. Открытая разработка трубки осуществлялась с 1971 г. до июня 2014 г., глубина карьера достигла 640 м, в настоящее время добыча алмазов продолжается подземным способом. Отработка месторождений связана с образованием дренажных вод, которые закачиваются обратно в недра на сопряженных участках закачки.

Геологоразведочные работы по поиску структур для закачки дренажных вод карьера «Удачный» выполнялись Амакинской и Мирнинской экспедициями с 80-х гг. XX века на участках «Октябрьский», «Кингский», «Левобережный» и других прилегающих площадях. Закачка дренажных вод рудника «Удачный» в толщу многолетнемерзлых пород (ММП) выполняется с 1985 г. (на участке «Октябрьский») по настоящее время (участки «Левобережный» и «Левобережный-2»). Суммарный объем закачанных в толщу ММП дренажных вод составляет порядка 45 млн. м<sup>3</sup>. Учитывая сложившуюся гидрогеологическую ситуацию на руднике «Удачный», т.е. прогнозируемый рост притоков к системе подземных горных выработок в процессе отработки месторождения, а также длительную перспективу работы рудника, закачка дренажных вод в зону ММП не решает в полной мере проблемы утилизации дренажных вод, понадобятся новые участки, основанные на принципах обратной закачки. Наиболее перспективным решением для Далдино-Алаkitского района является использование коллекторов среднекембрийского (СВК) и нижнекембрийского (НВК) водоносных комплексов. Необходимо отметить, что метод обратной закачки в коллекторы подмерзлотного водоносного комплекса успешно применяется для дренажных и шахтных вод месторождений трубок «Мир» и «Интернациональная» [1, 2].

### Методика исследований

В рамках проводимых исследований были выполнены следующие виды работ:

1. Выполнены рекогносцировочные посещения существующих участков закачки и рудника «Удачный».

2. Проанализированы проведенные в течение последних 10 лет геофизические работы и комплексные гидрогеологические исследования:

- режимные наблюдения за урвненным режимом по сети скважин;
- опытно-фильтрационные работы (наливы и откачки);
- комплекс ГИС по скважинам, вскрывающим нижнекембрийский водоносный комплекс.

3. Выполнена корреляция проведенных исследований, выявлены закономерности изменения гидродинамического режима в нижнекембрийском водоносном комплексе.

4. При помощи сопоставительного анализа по результатам изучения криогидрогеологических условий существующих участков и их сопоставления со структурно-тектоническим строением Далдынского кимберлитового поля выделены перспективные площади для расширения существующей системы закачки дренажных рассолов.

При анализе полученных результатов широко использовались методы гидродинамики и гидравлики водонасыщенных сред в условиях неуставившегося и квазистационарного режимов. В ходе решения поставленных задач использовались общепринятые методики проведения гидрогеологических, геофизических, газовых и других исследований [3, 4].

Лабораторные работы по химическому анализу подземных вод, растворенных и свободных пластовых газов, выполнялись в институте Якутнипроалмаз с использованием количественных и полуколичественных методов.

Теоретические исследования сводились к аналитическому решению задач по определению влияния выделенных природных и техногенных факторов на режим и интенсивность излива природных рассолов, методами сопоставления, корреляции, временного, планового и комбинированного прослеживания, статистического анализа. Оценка фильтрационных свойств выделенных коллекторов, определение гидродинамических параметров осуществлялась графоаналитическими и гидродинамическими методами.

### Характеристика объекта изучения, рассмотрение предпосылок использования коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса для закачки

*Нижнекембрийский водоносный комплекс (НВК)* вскрыт вблизи месторождения ниже глубин 1350–1450 м и приурочен преимущественно к трещинно-кавернозным коллекторам в доломитах нижней части удачининской свиты ( $C_{1-2}ud_1$ ), окремненными пористокавернозными доломитами кумахской свиты ( $C_1km$ ) и водородослевым известнякам эмьяксинской свиты ( $C_1em$ ). Кровлей водоносного горизонта являются органогенно-обломочные известняки удачининской свиты (отметки от –1100 абс. м), а подошвой – водородослевые известняки эмьяксинской свиты ( $C_1em$ ) (отметки от –1330 до –1420 абс. м) [5].

Гидравлическая связь с другими водоносными комплексами и обводненными зонами не изучена, однако, она, вероятно, существует, что подтверждается близ-

кими значениями уровней СВК и НВК на восточном борту карьера «Удачный» (скважина № 520).

Суммарная эффективная мощность пластов-коллекторов достигает 178.4 м (табл. 1). Пьезометрический уровень в скважинах устанавливается на глубинах 200–227 м. В нижней части разреза до глубины 1600 м пластовые давления достигают 17.5 МПа.

По результатам лабораторных исследований керна коэффициент пористости ( $K_n^{общ}$ ) пород, составляющих коллекторы НВК в пределах Далдынской флексуры, варьирует в пределах 2.4–8.8 % при средней величине 3.97 %. В районе трубки «Удачная» коэффициент пористости ( $K_n^{общ}$ ) пород коллекторов НВК варьирует в пределах 0.25–5.36 % при средней величине 1.56 %.

**Табл. 1.** Характеристика коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса (НВК)  
**[Table. 1.** Characteristics of reservoirs of the Lower Cambrian water-bearing complex (LCWBC)]

№№ пп	№ сква- жин	Интервал Водоносного комплекса, от-до, м в абс. отметках	Общая мощ- ность ком- плекса, м	Эффективная мощность ком- плекса, м	$K_{побщ.}$ (по ГИС), %  min-max среднее	Примечание
[No.]	[No. wells]	[Interval of the Aquifer Complex, from-to, m in abs. marks]	[Total capac- ity of the complex, m]	[Effective capac- ity of the com- plex, m]	[Porosity coefficient, % min-max average]	[Note]
<i>Сугуннахская структура [Sugunnakh structure]</i>						
1	90	<u>1433.0 - 1650.0</u> (-1051.3) - (-1268.3)	217	164	<u>23.0 - 35.0</u> 29.1	вскрыто не на полную мощ- ность
<i>Далдынская флексура [Daldynskaya flexura]</i>						
2	122	<u>1424.0 - 1548.4</u> (-1132.7) - (-1257.1)	124.4	73.2	<u>23.0 - 35.0</u> 29.1	вскрыто не на полную мощ- ность
3	2531	<u>1481.4 - 2226.8</u> (-1142.0) - (-1887.4)	741.0	178.4	<u>4.0 - 17.0</u> 12.0	
4	1СК	<u>1394.3 - 1628.5</u> (-1074.3) - (-1308.5)	234.2	21.3	-	вскрыто не на полную мощ- ность
5	2СК	-			-	
<i>район трубки «Удачная» [Udachnaya pipe area]</i>						
6	308	<u>1428.2 - 1441.8</u> (-1087.8) - (-1101.4)	13.6	12.4	<u>4.0 - 6.0</u> 5	вскрыто не на полную мощ- ность
7	310	<u>1457.8 - 1467.6</u> (-1086.4) - (-1096.2)	9.8	9.8	14	
8	316	<u>1353.8 - 1356.4</u> (-1060.4) - (-1063.0)	2.6	2.6	10	
9	КСС-2	<u>1379.6 - 1468.7</u> (-1030.6) - (-1119.7)	89.1	16.8	<u>11.0 - 13.0</u> 12.0	
10	703	<u>1390.0 - 2167.0</u> (-1063.3) - (-1840.3)	659	107.2	<u>6.0 - 10.0</u> 8	

Несмотря на невысокие величины коэффициента пористости, водоносный комплекс в районе месторождения характеризуется высокими фильтрационными свойствами за счёт трещиноватости пород, составляющих коллекторы НВК. Коэффициент водопроницаемости до 50–60 м<sup>2</sup>/сут.

Изучение горного массива места строительства шахтных стволов по скважинам КСС-1 и КСС-2 показало отсутствие выдержанных пластов-коллекторов, выделяемых по ГИС, даже на локальном участке. При расстоянии между скважинами в 100 м характеристики пластов-коллекторов (количество, мощность, глубины распространения, коллекторские свойства) в свитах существенно варьируют от скважины к скважине.

Дизъюнктивные деформации, пронизывающие толщи пород, соединяют водонасыщенные пласты в единую гидравлическую систему, однако, спрогнозировать ее весьма сложно - на характер проявления дизъюнктивов в рудных телах, и во вмещающих породах (на степень их раскрытости, проницаемость по вертикали и в плане) влияли очень многие факторы (кальцитизация, сульфитизация, гипсование и др.) [6].

В пределах межрифтовой зоны наиболее высокими показателями фильтрационно-емкостных свойств обладают породы лагунно-сабхховой пачки (C<sub>2lg</sub>), нижней доломитизированной части удачининской свиты (C<sub>1ud1</sub>) и эмяксинской свиты (C<sub>1em</sub>). Наиболее низкие, практически водоупорные показатели, характерны для

биогермных построек, манькайской и старореченской свит. Кроме этого, межрифовая зона вблизи трубки «Удачная» характеризуется наличием в разрезе лагунно-сабкховой пачки полосообразной гидрогеологической структуры с повышенными показателями коллекторских свойств [7]. Это вероятно связано с генезисом осадков и мощностью карбонатно-баровых отложений, величина которых изменяется с удалением от фронта рифового обрамления карбонатной платформы в тыловую и лагунную область.

Воды комплекса представлены крепкими рассолами хлоридного кальциевого состава с минерализацией до 404 г/дм<sup>3</sup>, содержат до 0.9 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> растворенных азотно-углеводородных и углеводородных газов. По комплексу гидрогеохимических признаков рассолы глубоких горизонтов трубки «Удачная» относятся к метаморфизованным и имеют аналоги на всей Сибирской платформе [8, 9].

Природные подмерзлотные коллекторы представлены гидрогеологическими структурами (главным образом, участками обводненных разломных зон) с весьма замедленным водообменом, фильтрационные параметры которых существенно выше, чем у региональных водоносных комплексов, а распространенные в них воды непригодны для хозяйственно-бытового использования [10]. Как правило, в такие криогидрогеологические структуры производится закачка дренажных вод (в основном, природных рассолов) однородного химического состава из открытых и подземных горных выработок [11-14]. К примерам использования естественных подмерзлотных коллекторов криолитозоны в Западной Якутии можно отнести обратную закачку дренажных вод карьера и рудника «Мир» в метегеро-ичерский водоносный комплекс на участке закачки (УСОЗ) и на участке обратной закачки (УОЗ) рудника «Интернациональный». Экологическая надежность применяемого способа закачки в коллекторы подмерзлотных водоносных комплексов испытана уже в течение более чем 30-летнего периода промышленной эксплуатации на Мирнинском ГОКе. При этом, сооружены и эффективно эксплуатируются четыре участка обратной закачки: УОЗ, УЗВ, «Тымтайдахский» и «Южный».

### Результаты и их обсуждение

Учитывая текущую гидрогеологическую ситуацию на руднике «Удачный» (приток природных рассолов ~ 9000 м<sup>3</sup>/сут), прогнозируемый рост притоков к системе подземных горных выработок (до ~ 40 000 м<sup>3</sup>/сут к 2062 г.), в процессе отработки месторождения, а также перспективу работы рудника до 2060 г., закачка дренажных вод в зону ММП не смогла бы решить в полной мере проблемы утилизации дренажных вод [15, 16]. Поэтому в пределах Далдынского кимберлитового поля потребовалось строительство новых участков, основанных на принципах обратной закачки. Для решения этой задачи был поставлен комплекс исследований нижнекембрийского водоносного комплекса (НВК). Схема расположения всех

перечисленных участков закачки (на ММП и НВК) приведена на рисунке 1.

Всего в пределах двух участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» было пробурено 10 опытных скважин глубиной 1700 м, с последующей постановкой опытно-фильтрационных работ. Закачка дренажных вод на участках в коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса, выявленные на глубине 1450-1700 м от дневной поверхности, осуществлялась в опытном режиме в период 2016-2021 гг., всего в рамках опытно-фильтрационных работ было закачено ~ 3.7 млн м<sup>3</sup>.

Учитывая целевое назначение работ, характеристика структурных подразделений геологического строения приводится подробно, и особое внимание уделяется породам и отложениям, которые обладают коллекторскими свойствами. На участке «Среднекембрийский» отложения нижнего кембрия, вскрытые скважинами, хорошо коррелируются с опорным геофизическим разрезом для Далдыно-Алакитского кимберлитового поля. Фактический материал о строении участка получен при документации керна скважин глубиной 1100-2300 м, пробуренных на разных этапах геологического изучения недр. В результате проведенных исследований было установлено, что в строении участка участвуют кристаллические породы архея, карбонатные и терригенно-карбонатные отложения венда и кембрия. На участке «Нижнекембрийский юго-восточный» породы архея и венда, а также манькайской свиты (Є<sub>1</sub> mn) нижнего кембрия в пределах участка не вскрыты, однако, учитывая описанные ранее структурно-геологические и криогидрогеологические особенности рассматриваемого участка, расположенный в 3.5 км участок «Среднекембрийский» можно рассматривать как объект-аналог.

Породы *архея* вскрыты скважиной № 2531 в интервале 2478.0-2480.0 м. Они представлены кристаллическими сланцами и гранито-гнейсами. Вскрытая мощность пород фундамента составила 2 м.

*Венд. Старореченская свита (Vst).* Разрез свиты вскрыт скважиной 2531 в интервале 2308-2478 м. Породы свиты с угловым и стратиграфическим несогласием залегают на размытой поверхности кристаллического фундамента. Разрез представлен серыми плотными окремненными разнозернистыми доломитами, строматолитовыми доломитами с редкими прослоями (мощностью 0.8–2.0 м) доломитовых мергелей и глинистых доломитов. В нижней части присутствуют полимиктовые песчаники и песчаные доломиты с глауконитом. Мощность свиты 170 м.

*Кембрийская система. Манькайская свита (Є<sub>1</sub> mn).* Отложения свиты на полную мощность вскрыты скважиной № 2531 в интервале 1929.0–2308.0 м (табл. 2).

Отложения представлены доломитами, строматолитовыми доломитами и известняками с прослоями глинистых доломитов, доломитовых мергелей, реже аргиллитов. Нижняя половина разреза отличается повышенной глинистостью и радиоактивностью пород.

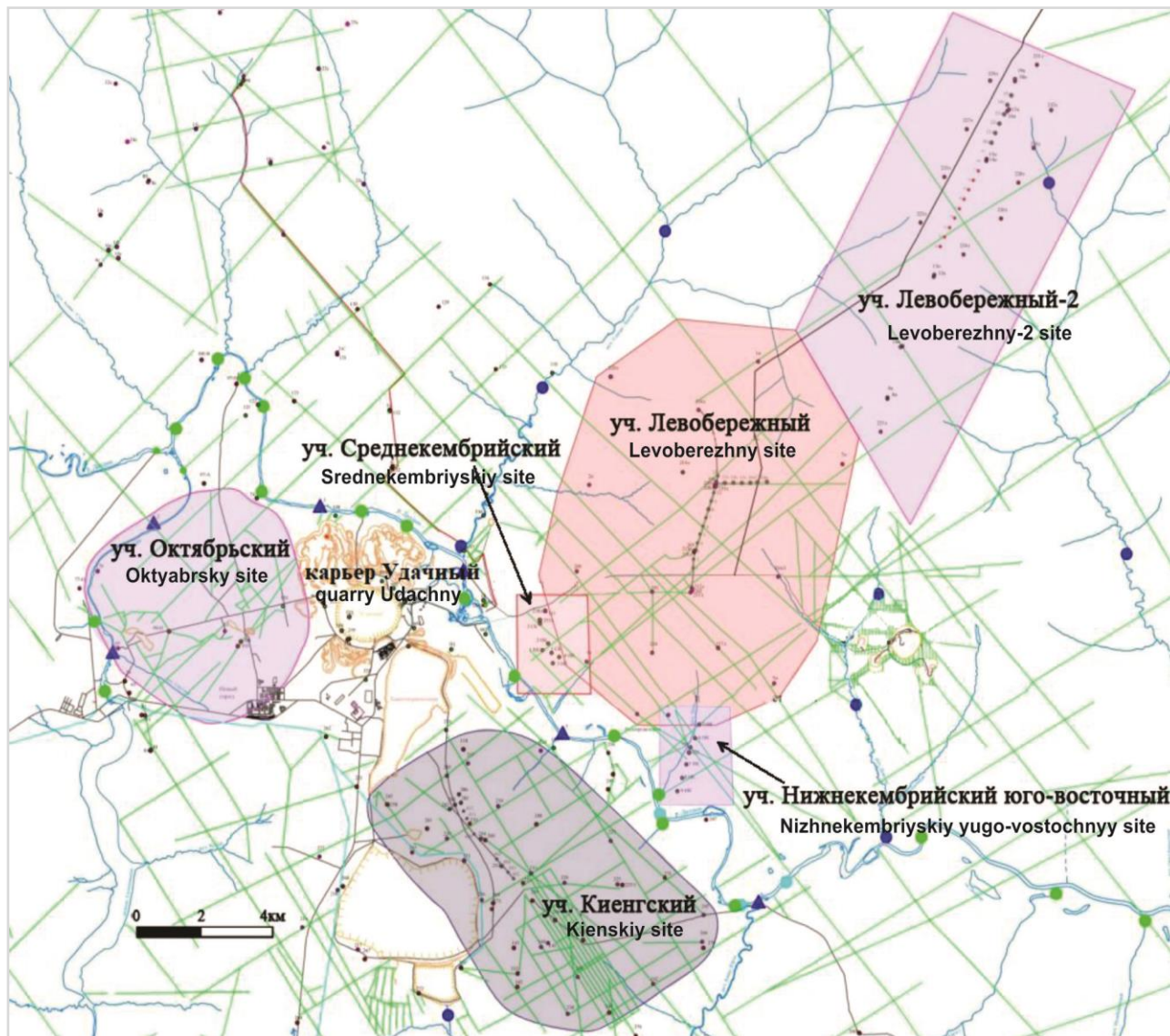


Рис. 1. Ситуационный план расположения участков закачки.  
 [Fig. 1. Layout plan of the location of injection sites.]

В то же время здесь присутствуют прослои гравелитов, песчаников и пропитанных жидкой нефтью битуминозных песчанистых доломитов. По всему разрезу отмечаются гнезда и прослойки светло-серого ангидрита.

Окраска пород в целом серая, в нижней четверти разреза - пестрая. Характерным для свиты является наличие пористых и кавернозных разностей с битумопроявлениями.

Свита имеет несогласный контакт с подстилающей старореченской свитой, согласный – с перекрывающей эмьяксинской свитой. Мощность свиты 379 м.

В процессе бурения скв. № 2531 при испытании интервала 1964.6–1996.1 м был получен приток газированной минерализованной воды, максимальной плотностью 1.28 г/см<sup>3</sup> с плёнкой нефти. Дебит пластовой воды при динамическом уровне 1024.6 м составил 6.26 м<sup>3</sup>/сут. Величина пластового давления, рассчитанная

экстраполяционным методом для глубины 1971.6 м, составила 18.5 МПа.

**Эмьяксинская свита (Є1 et).** Вскрыта скважинами № 1СК, 2СК, 2НК и на полную мощность скважиной № 2531 в интервале 1635.0–1929.0 м. Кровля свиты на участке отмечается на глубинах в абс. отм. от -1266.8 м до -1233.4 м с перепадом по вертикали на 33.4 м, что вероятно связано с тектоникой. Мощность свиты на участке 294 м. Сложена свита известняками с прослоями доломитов, мергелей и аргиллитов. По характеру отложений разрез свиты условно подразделяется на две пачки.

Нижняя пачка представлена чередованием пестроцветных известняков и глинистых известняков с прослоями красноцветных мергелей, и аргиллитов. Мощность пачки 116 м.

Верхняя пачка сложена однообразными массивными плотными известняками с прослоями водорослевых,



**Табл. 2.** Стратиграфическая классификация отложений на участке «Среднекембрийский»  
**[Table. 2.** Stratigraphic classification of deposits in the "Middle Cambrian" area]

№ п/п [No.]	№ скв. [No. wells]	Абс.отм. устья скв. Глубина скваж.,м [Abs. well mouth Well depth, m]	Стратиграфическая классификация (по стволу скважины/в абс. отметках по подошве свиты, м) [Stratigraphic classification (along the wellbore / in absolute marks along the bottom of the suite, m)]						
			Моркоинская Є <sub>3</sub> mk	Мархинская Є <sub>3</sub> mr	Известково-до- ломитовая Є <sub>2</sub> id	Удачинская Є <sub>1</sub> -2ud	Кумахская Є <sub>1</sub> k	Эмякинская Є <sub>1</sub> em	Манькайская Є <sub>1</sub> mn
1	111	<u>395.6</u> 1100.0	<u>152.0</u> 243.6	<u>620.0</u> -224.4	<u>1020.0</u> -624.4	Забой <u>1100.0</u> -704.4			
2	2531	<u>382.7</u> 1700.0	<u>158.0</u> 224.7	<u>612.0</u> -229.3	<u>1032.5</u> -649.8	<u>1480.0</u> -1097.3	<u>1635.0</u> -1252.3	<u>1929.0</u> -1546.3	<u>2308.0</u> -1925.3
3	1СК	<u>342.2</u> 1700.0	<u>98.8</u> 243.4	<u>552.0</u> -209.8	<u>940.5</u> -598.3	<u>1458.0</u> -1115.8	<u>1609.0</u> -1266.8	Забой <u>1700</u> -1357.8	
4	2СК	<u>378.1</u> 1700.0		<u>588.8</u> -210.7	<u>1011.4</u> -633.3	<u>1508.8</u> -1130.7	<u>1635.9</u> -1257.8	Забой <u>1705</u> -1326.9	
5	2НК	<u>378.1</u> 1700.0		<u>556.7</u> -178.6	<u>941.0</u> -562.9	<u>1489.5</u> -1111.4	<u>1611.5</u> -1233.4	Забой <u>1700</u> -1321.9	



**Рис. 2.** Известняки водорослевые: интервал 1618.3–1622.3 м и 1626.3–1630.3 м.  
**[Fig. 2.** Algal limestones: interval 1618.3–1622.3 m and 1626.3–1630.3 m.]

органогенно-обломочных и археоциатовых известняков. Известняки серые, серовато-кремоватые, скрытокристаллические в отдельных участках доломитизированные, тонко-мелкозернистые, не редко со сгустково-комковатой текстурой (органогенные) водорослевые. Порода плотная, массивная, вертикально-трещинова-

тая с многочисленными бугристыми стилолитовыми швами, по стенкам которых отмечается глинисто-органическое вещество. Участками известняки коричнево-серые с примазками чёрного органического вещества с неоднородной текстурой, крепкие с запахом битума (рис. 2).

Микроописание: в шлифах порода представлена микро-тонкозернистыми диаэпигенетически перекристаллизованными и доломитизированными (от 10 до 75 %) известняками. В шлифах отмечаются сгустки и комки округлой формы с нечёткими контурами, сложенные кальцитом. Отмечено окремнение по комкам. Пиритизация слабая рассеянная и агрегатная. Наблюдаются редкие трещины с кальцитовым заполнителем. Мощность пачки 255 м.

К породам верхней пачки приурочены коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса (НВК).

По результатам интерпретации ГИС в верхней пачке эмяксинской свиты выделяется до 11 пластов коллекторов мощностью от 0.9 м до 12.0 м. Тип коллектора – пористый. Коэффициент пористости, полученный с помощью НГК (нейтронный гамма-каротаж), в пределах 13.8–15.7 % (среднее значение – 14.7 %).

По результатам геофизических исследований скважин, проведенных различными методами, коэффициент пористости находится в пределах 6.1–7.7 % (среднее значение – 6.7) и в пределах 2.7–12.9 % (среднее значение – 10.6 %). Эффективная мощность – 43.9 м.

Литолого-физические свойства пород-коллекторов в скважине № 2531 изучены в интервале 1662–1684 м в лаборатории физики пласта Среднеленской экспедиции (1988 г.). Породы представлены известняками серыми, серовато-кремовыми, плотными, массивными, с бугристыми стилолитовыми швами и доломитами темно-серовато-кремовыми, массивными, пористыми. Порода характеризуется низкими ёмкостно-фильтрационными свойствами. Значения пористости изменяются до 2.65 %, но в основном по разрезу в связи с микрозернистой структурой, породы имеют низкие значения пористости. Коллекторы выделяются отдельными пропластками со средним значением проницаемости до 0.02 мД. Трещиноватых коллекторов нет. Отмечаются отдельные образцы с трещинами. В целом по разрезу выделяется поровый тип коллектора.

**Кумакская свита (Є1 k).** Породы толщи без видимого несогласия залегают на подстилающих отложениях эмяксинской свиты. Кровля свиты на участке варьирует в пределах 1458–1508 м. Мощность свиты изменяется от 122 м до 155 м.

Представлены породы пористо-кавернозными доломитами светло-серого цвета комковатыми окремненными микрозернистыми доломитами серыми, буровато-серыми, коричневыми, прослоями глинистыми, иногда известковистыми битуминозными (рис. 3). Породы горизонтально-слоистые, участками массивные, **пористо-кавернозные**, неравномерно сульфатизированные. Доломиты светло-серого цвета. Известняки доломитизированные от серого до серо-бежевого цвета. Известняки окремненные темно-серого до черного цвета, очень плотные, местами комковатые.

В породе по всему интервалу присутствуют каверны округлой и вытянутой формы размером от

1.6×3.4 мм до 7×65 мм, частично заполненные мелкими кристаллами кальцита. Каверны развиты как вдоль поверхности трещин, так и внутри блоков породы, по напластованию.

Редкие трещины открытого типа субвертикальной ориентировки с углами наклона до 20° к длинной оси керна. В породе встречаются стилолитовые швы зубчато-бугристой формы, выполненные глинистым материалом, амплитудой до 3 см.

В породе встречаются редкие стилолитовые швы бугристой формы, ~0–4 на 1 п.м, выполненные глинистым материалом, амплитудой до 4.4 см.

К пористо-кавернозным породам приурочены коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса (НВК).

По результатам интерпретации ГИС в породах кумакской свиты выделяется до 16 пластов коллекторов мощностью от 0.8 м до 12.2 м. Тип коллектора – пористо-кавернозный. Коэффициент пористости по НГК (нейтронный гамма-каротаж) в пределах 11.7–14.7 % (среднее значение – 14.3 %). Коэффициент пористости, полученный в результате акустического каротажа (АК), находится в пределах 5.0–10.5 % (среднее значение – 6.6 %). Коэффициент пористости, определенный при помощи бокового каротажа (БК), изменяется в пределах 9.1–29.6 % (среднее значение – 17.6 %). Эффективная мощность – 55.3 м.

Литолого-физические свойства пород-коллекторов в скважине № 2531 изучены в интервале 1600.2–1614.0 м в лаборатории физики пласта Среднеленской экспедиции (1988 г.). Породы представлены доломитами серыми, серовато-кремовыми, плотными, массивными, с бугристыми стилолитовыми швами и доломитами темно-серовато-кремовыми, массивными, пористыми. Порода характеризуется высокими ёмкостно-фильтрационными свойствами за счёт кавернозности пород.

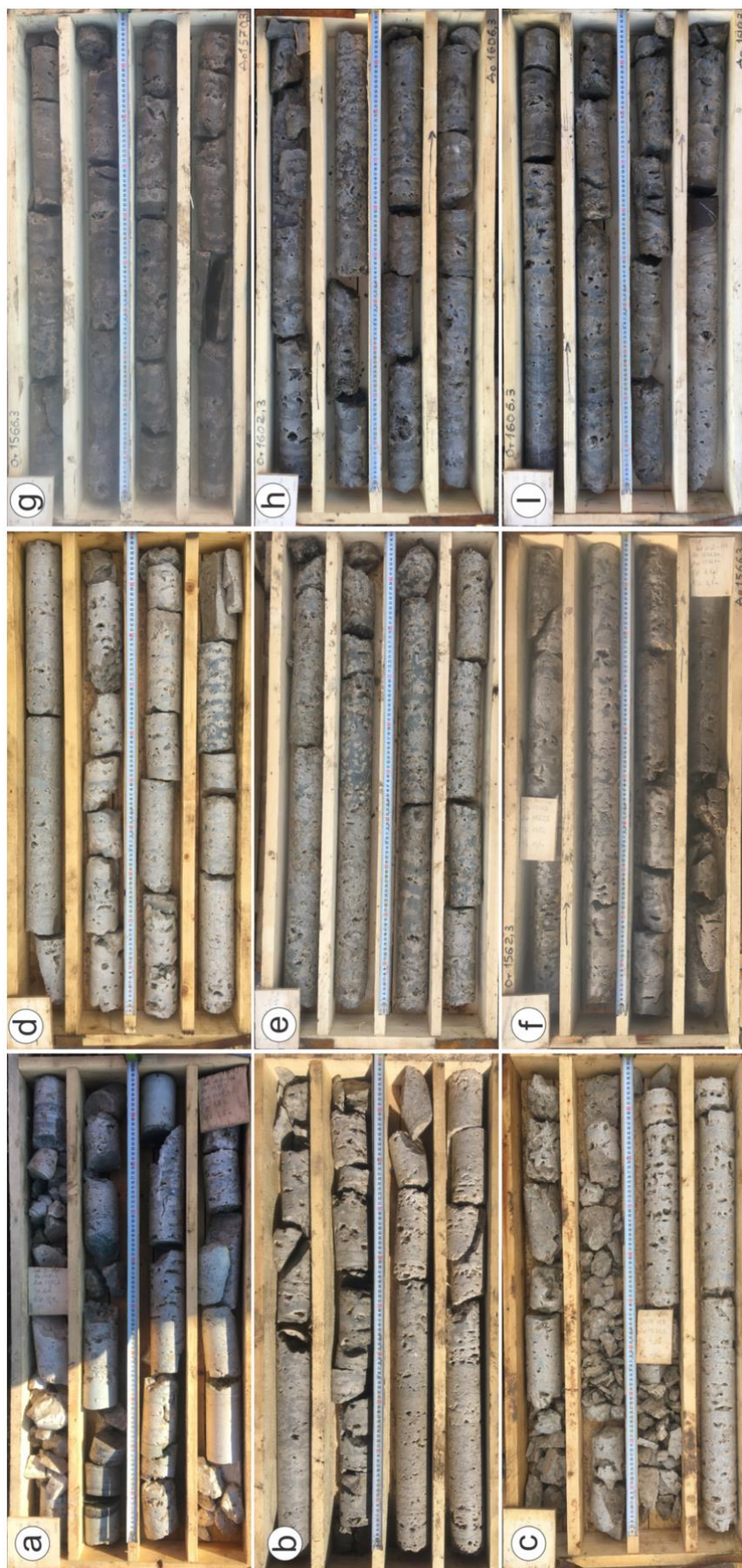
Эффективная проницаемость до 48.4 мД. Трещиноватых коллекторов нет. Отмечаются отдельные образцы с трещинами. В целом по разрезу выделяется порово-кавернозный тип коллектора. Объёмный вес (среднее 2.78 г/см<sup>3</sup>) пород кумакской свиты больше объёмного веса эмяксинской свиты (2.68 г/см<sup>3</sup>) за счёт окремнения пород.

К отложениям эмяксинской и кумакской свит приурочен нижнекембрийский водоносный комплекс (НВК). Кровля комплекса на участке варьирует в пределах 1479.6–1533.8 м. Общая мощность комплекса до 450 м, эффективная мощность – до 110 м. По результатам постановок пластоиспытателя дебиты притоков в НВК варьируют в пределах 0.3–60.3 м<sup>3</sup>/час при средней величине 33.8 м<sup>3</sup>/час.

Водоносный комплекс на участке характеризуется высокими фильтрационными свойствами за счёт кавернозности пород, слагающих коллекторы НВК. Коэффициент водопроводимости до 48 м<sup>2</sup>/сут.

Целевой для закачки нижнекембрийский водоносный комплекс в верхней и нижней частях разреза





**Рис. 3.** а) Интервал 1489.8–1493.8 м. Мелкозернистый пористо-кавернозный доломит; б) Интервал 1506.3–1510.3 м. Известняк доломитизированный с кавернами округлой и вытянутой формы размером до 25×24 мм, частично заполненные мелкими кристаллами кальцита; с) Интервал 1534.3–1538.3 м. Известняк серого, светло-серого цвета кавернозный; д) Интервал 1542.3–1546.3 м. Известняк кавернозный; е) Интервал 1554.3–1558.3 м. Известняк серо-бежевого цвета с крупными гнездами голубовато-серого известняка; ф) Интервал 1562.3–1566.3 м. Известняк серый, кавернозный; г) Интервал 1566.3–1570.3 м. Известняк окремнённый с неравномерно распределёнными кавернами размером до 32×15 мм, польями и частично заполненными кристаллами кальцита; б) Известняк окремнённый кавернозный (интервал 1602.3–1606.3 м); и) Известняк окремнённый кавернозный (интервал 1606.3–1610.3 м)

**[Fig. 3.** (a) – Interval 1489.8–1493.8 m Fine-grained porous-cavernous dolomite; (b) – Interval 1506.3–1510.3 m. Dolomitised limestone with round and elongated caverns up to 25 × 24 mm in size, partially filled with small calcite crystals; (c) – Interval 1534.3–1538.3 m. Grey, light grey cavernous limestone; (d) – Interval 1542.3–1546.3 m Cavernous limestone; (e) – Interval 1554.3–1558.3 m. Grey-beige limestone with large pockets of bluish-grey limestone; (f) – Interval 1562.3–1566.3 m. Grey limestone, cavernous; (g) – Interval 1566.3–1570.3 m. Silicified limestone with unevenly distributed caverns up to 32 × 15 mm in size, hollow and partially filled with calcite crystals; (h) – Silicified cavernous limestone (interval 1602.3–1606.3 m); (i) – Silicified cavernous limestone (interval 1606.3–1610.3 m).]



надежно ограничен водоупорными отложениями.

**Верхняя граница** интервала закачки дренажных вод в коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса (НБК) определяется его кровлей (пачкой водоупорных терригенно-карбонатных отложений удачининской свиты), которая является водоупором в абс. отм. -850/-1050 м (на глубине 1200–1250/1400–1450 м от дневной поверхности).

Положение **нижней границы** определяется кровлей нижней пачки эмаксинской свиты, представленной терригенно-карбонатными отложениями и аргиллитами, и залегающей в абс. отм. -1350/-1400 м (на глубине 1700–1750/1750–1800 м от дневной поверхности).

Наличие мощных пачек (более 100 м) водоупорных пород – не трещиноватых терригенно-карбонатных пород и аргиллитов, а также существенная глубина залегания коллекторов (свыше 1400 м от дневной поверхности) обеспечивают необходимую изоляцию эксплуатируемых коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса.

Определение параметров проводилось по результатам опытной эксплуатации участка 2016-2022 гг. на

стадии снижения и повышения уровня в эксплуатационных скважинах. Началу расчётов предшествовала качественная интерпретация графиков, построенных в координатах:  $S - lgt$ . На кривых графиков отмечается влияние неоднородности среды так называемый эффект «двойной пористости». Расчёты были выполнены программным продуктом ANSDIMAT. С помощью графоаналитического метода, по участкам графиков, отвечающих квазистационарному режиму фильтрации. Также данный программный продукт обеспечивает подсчёт необходимых гидрогеологических параметров с учётом конструкции скважин. Стоит отметить, что особенностью программного продукта ANSDIMAT, является высокая степень автоматизированности. Программа при правильном формировании нового проекта, в качестве результата выдаёт значения коэффициентов водопроницаемости и уровнепроводности.

Необходимо отметить, что в процессе расчёта коэффициента водопроницаемости было выявлено его неоднородное распределение даже в пределах участков закачки (табл. 3).

**Табл. 3.** Основные гидродинамические коэффициенты участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный»  
**[Table. 3.** The main hydrodynamic coefficients of the "Middle Cambrian" and "Lower Cambrian Southeast" sections]

№ п/п [No.]	№ скважины [No. wells]	Коэффициент водопроницаемости $K_m, м^2/сут$ [Water conductivity coefficient $K_m, m^2/day$ ]	Коэффициент пьезопроводности, $м^2/сут$ [Piezoconductivity coefficient, $m^2/day$ ]
Среднекембрийский [Srednekembriyskiy]			
1	1 НК	20	$10^5-10^6$
2	2 НК	40	
3	3 НК	35	
4	4 НК	45	
5	2531	50	
Нижнекембрийский юго-восточный [Nizhekembriyskiy yugo-vostochnyy]			
6	5 НК	15	$10^5-10^6$
7	6 НК	55	
8	7 НК	10	
9	8 НК	60	
10	9 НК	40	

Полученные в результате проведения опытной эксплуатации основные расчётные фильтрационные параметры подтвердили, что существующий ряд закачных скважин полностью обеспечивает закачку в каждый из участков с расходом до 7200 м<sup>3</sup>/сут (суммарно 14 400 м<sup>3</sup>/сут) в режиме свободного налива, и с расходом до 9600 м<sup>3</sup>/сут (суммарно 19 200 м<sup>3</sup>/сут) с избыточными давлениями на устье, величиной до 3 МПа.

Учитывая прогнозируемый к руднику Удачный приток, приоритетным направлением дальнейших исследований является определение перспективных участков закачки, ориентированных на коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса, с последующей интенсификацией их приёмности, не только

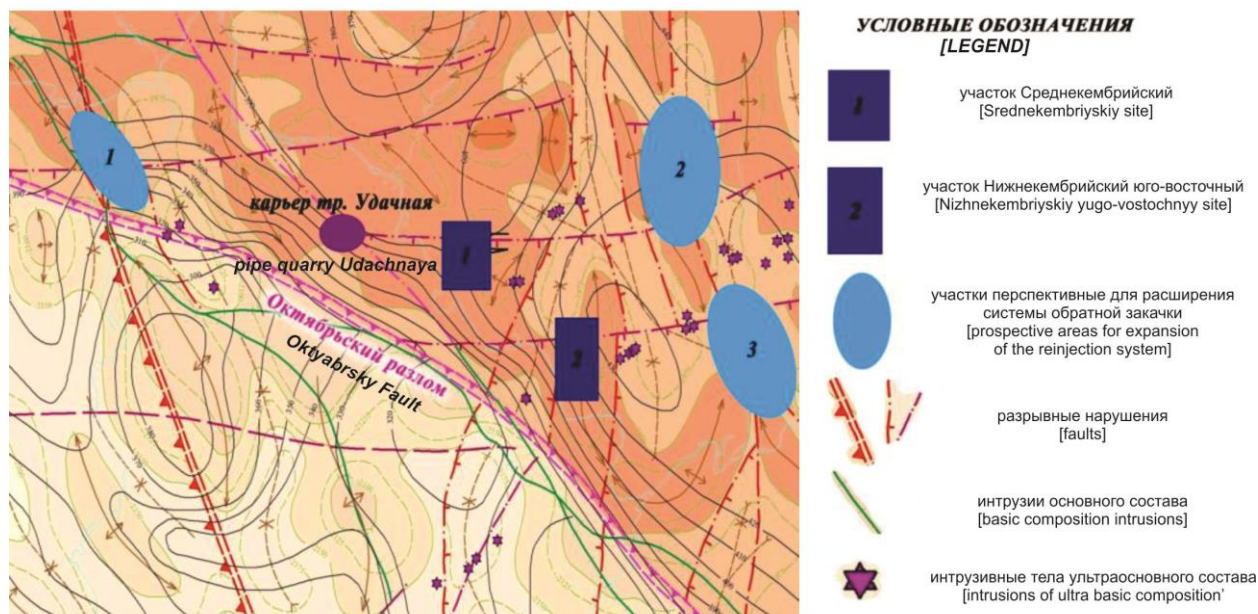
методами гидроразрыва и соляно-кислотных ванн, но и с учётом структурно-тектонического фактора, как определяющего в формировании емкостных параметров данного типа участков. Учитывая особенности литолого-фациальных условий Далдынского кимберлитового поля, наиболее предпочтительным выглядит их расположение севернее Октябрьского разлома, как границы, влияющей на формирование различной пустотности коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса, но и являющимся границей между криоартезианскими бассейнами.

В результате изучения кернового материала были выделены перспективные участки наибольшей трещиноватости, приуроченные к узлам пересечения региональных и кимберлитконтролирующих разломов.

Данные участки характеризуются наибольшей проницаемостью, повышенной трещиноватостью, наибольшим количеством открытых каверн, что позволяет наиболее эффективно проводить закачку в недра. Участки, рекомендуемые для дальнейшего развития

системы обратной закачки, приведены на рис. 4.

Определение заложения скважин должно уточняться при проведении геофизических работ, для выделения зоны динамического воздействия разрывных нарушений.



**Рис. 4.** Карта-схема перспективных участков для расширения системы обратной закачки рудника «Удачный».  
**[Fig. 4.** Schematic map of the promising areas for expanding the reverse injection system of the Udachny mine.]

### Выводы

Выполненные исследования и последующие расчёты позволяют рассматривать коллекторы регионального нижнекембрийского водоносного комплекса, как целевой объект для дальнейшего расширения системы закачки дренажных вод рудника Удачный. Перспективность предлагаемого расширения подтверждается проведенными опытно-фильтрационными работами.

Исходя из выше сказанного, в качестве основной рекомендации, предлагаемой к реализации, является проведение дальнейших исследований в рамках Далдынского кимберлитового поля, для подтверждения перспектив определённых в рамках проведенных исследований территорий. Дополнительным направлением является интенсификация процесса закачки методами гидроразрыва, соляно-кислотных ванн и др. на уже существующих участках Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный.

Выявленные закономерности формирования перспективных участков будут учитываться при будущем строительстве в рамках расширения существующей системы закачки дренажных вод рудника «Удачный», необходимого для предотвращения негативного техногенного воздействия на геологическую и окружающую среды.

*Конфликт интересов:* Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Янников А. М., Бочаров В. Л. К проблеме экологически безопасного захоронения дренажных вод рудника «Интернациональный» // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2019. № 4. С. 99–103.
2. Янников А. М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля. Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2021. 240 с.
3. Климентов П. П., Кононов В. М. Методика гидрогеологических исследований. М.: Высшая школа, 1978. 408 с.
4. Гавич И. К. Основы гидрогеологической стратификации и обработки информации. М.: МГРИ, 1982. 79 с.
5. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
6. Дроздов А. В., Иост Н. А., Лобанов В. В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
7. Колганов В. Ф., Акишев А. Н., Дроздов А. В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный: Мирнинская типография, 2013. 568 с.
8. Агринский А. В. Результаты изучения гидрогеологических условий при разведке одной из кимберлитовых трубок в Западной Якутии // *Тр. ВСЕГИНГЕО*. 1980. № 135. С. 48–57.
9. Алексеев С. В., Алексеева Л. П., Гладков А. С., Трифионов Н. С., Серебряков Е. В., Павлов С. С., Ильин А. В. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 4. С. 1235–1253. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0393.
10. Климовский И. В., Готовцев С. П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 167 с.
11. Алексеев С. В., Алексеева Л. П. Итоги и перспективы захоронения дренажных вод кимберлитовой трубки Удачная в

мерзлых породах // Итоги геокриологических исследований в Якутии в XX веке и перспективы их дальнейшего развития. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2003. С. 67-78.

12. Алексеев С. В., Дроздов А. В., Дроздова Т. И., Алексеева Л. П. Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетнемерзлые породы // *Криосфера Земли*. 2002. Т. VI. № 2. С. 61-65.

13. Дроздов А.В. Подземное захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлые породы (на примере Удачинского ГОКа в Западной Якутии) // *Геоэкология*. 2005. № 3. С. 234-243.

14. Климовский И. В., Готовцев С. П., Шепелев В. В. Гидрогеокриологические условия полигона подземного захороне-

ния дренажных вод трубки «Удачная» // *Криосфера Земли*. 2002. Т. VI. № 3. С. 45-50.

15. Янников А. М. Гидродинамическая характеристика удачинской свиты в околотрубочном массиве трубки «Удачная» (РС (Якутия)). *Строение литосферы и геодинамика: материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции*. Иркутск. 2021. С. 302–304.

16. Янников А. М., Зырянов И. В., Корепанов А. Ю., Стручкова А. С. Динамика и прогноз изменения гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса в пределах Далдынской флексуры // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2022. № 9. С. 60–73. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_60.

UDC: 556.334+556.3.02

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/2/104-115>

Received: 04.04.2023

Accepted: 24.05.2023

Published online: 30.06.2023

## Prospects for the use of reservoirs of the Lower Cambrian water-bearing complex for the development of the injection system of the Udachny mine

©2023 A. M. Yannikov✉

*Institute Yakutniproalmaz ALROSA PJSC, 39 Lenina ul.,  
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), 678174, Russian Federation*

### Abstract

*Introduction:* Since 2015, the development of a unique diamond deposit, the Udachnaya pipe, has been continued by underground mining, with a significant increase in the inflow of natural brine in comparison with the period of open mining, associated with better opening of the Middle Cambrian water-bearing complex by underground mine works. This made it necessary to construct protective systems for advanced water drawdown. The resource potential of the deposit allows considering further development and construction of the mine to a depth of 1630 m, which will lead to an even greater increase in the inflow of natural brines, especially after opening at a depth of 1250 1300 m from the day surface of the reservoirs of the Lower Cambrian water-bearing complex. The described situation required the improvement of the existing system for pumping highly mineralized drainage water. At present, in addition to the already tested system of injection of brines into reservoirs of the bottom part of permafrost, a technology for injection into deep reservoirs of the Lower Cambrian water-bearing complex in the Middle Cambrian and Lower Cambrian south-east areas has been developed and implemented. This article discusses the prospects for the use of deep-lying reservoirs of the Lower Cambrian water-bearing complex, according to the results of the analysis of the structural-tectonic map of the Daldynsky kimberlite field, the most promising areas for the construction of new injection sites were identified.

*Materials and Methods:* For the investigation of the hydrodynamic regime of the Lower Cambrian water-bearing complex within the object of study, the generally accepted methods for the study of groundwater dynamics were used. The determination of hydrogeological parameters was carried out in the process of conducting a complex of experimental field work in 2020 2022 The analysis of the structural and tectonic conditions of the Daldynsky kimberlite field was carried out based on the results of a geological study of the territory during a complex of prospecting for diamonds.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Aleksey M. Yannikov, e-mail: emelyanova@poi.dvo.ru

**Results and Discussion:** The performed studies and subsequent calculations allowed to consider the reservoirs of the regional Lower Cambrian water-bearing complex as a target for further expansion of the drainage water injection system of the Udachny mine. Taking into account the lithofacies conditions of the Daldynsky kimberlite field, the location of the injection sites to the north of the Oktyabrsky fault seems to be the most preferable. This fault is a boundary that affects not only the distribution of filtration parameters of the reservoirs of the Lower Cambrian water-bearing complex and also it serves as the boundary between the cryoartesian basins.

**Conclusions:** The identified regularities in the formation of areas considered promising will be taken into account during future construction as part of the expansion of the existing mine injection system.

**Ключевые слова:** Daldynskoye kimberlite field, Udachnaya pipe, natural brines, injection sites.

**For citation:** Yannikov A. M. Prospects for the use of reservoirs of the Lower Cambrian water-bearing complex for the development of the injection system of the Udachny mine // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 2, pp. 104–115. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/2/104-115>

**Conflict of interests:** The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

## REFERENCES

1. Yannikov A. M., Bocharov V. L. K probleme ekologicheskii bezopasno zakhroneniya drenaznykh vod rudnika «Internatsional'nyi» [The problem of environmentally safe disposal of drainage waters of the «International» mine]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 4, pp. 99–103 (In Russ)
2. Yannikov A. M. *Gidrogeologiya Mirninskogo kimberlitovogo polya (respublika Sakha (Yakutiya))* [Hydrogeology of the Mirny kimberlite field (Republic of Sakha (Yakutia))]. Ed. A. V. Tolstov. Mirny, ALROSA publ., 2021. 238 p. (In Russ)
3. Klimentov P. P., Kononov V. M. *Metodika gidrogeologicheskikh issledovaniy* [Methods of hydrogeological research]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1978, 408 p. (In Russ)
4. Gavich I. K. *Osnovy gidrogeologicheskoi stratifikatsii i obrabotki informatsii* [Fundamentals of hydrogeological stratification and information processing]. Moscow, MGRI publ., 1982, 79 p. (In Russ)
5. *Gidrogeologiya SSSR* [Hydrogeology of the USSR]. V.XX. Yakut ASSR. Moscow, Nedra publ., 1970, 384 p. (In Russ)
6. Drozdov A. V., Iost N. A., Lobanov V. V. *Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdeniy Zapadnoy Yakutii* [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, IGTU publ., 2008, 507 p. (In Russ)
7. Kolganov V. F., Akishev A. V., Drozdov A. N. *Gorno-geologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdeniy almazov Yakutii* [Mining and geological features of indigenous diamond deposits in Yakutia]. Mirny, Mirny printing house, 2013, 568 p. (In Russ)
8. Agrinskii A. V. *Rezultaty izucheniya gidrogeologicheskikh uslovii pri razvedke odnoi iz kimberlitovykh trubok v Zapadnoi Yakutii* [Results of the study of hydrogeological conditions during the exploration of one of the kimberlite pipes in Western Yakutia]. Tr. VSEGINGEO, 1980, no. 135, pp. 48–57 (In Russ)
9. Alekseev S. V., Alekseeva L. P., Gladkov A. S., Trifonov N. S., Serebryakov E. V., Pavlov S. S., Il'in A. V. Brines in deep horizons of the Udachnaya kimberlite pipe. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, no. 9(4), pp. 1235-1253 (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393>
10. Klimovsky I. V., Gotovtsev S. P. *Kriolitozona Yakutskoy almazonosnoy provintsiy* [Cryolithozone of the Yakut diamond-bearing province]. Novosibirsk, Nauka publ., 1994, 167 p. (In Russ)
11. Alekseev S. V., Alekseeva L. P. Itogi i perspektivy zakhroneniya drenaznykh vod kimberlitovoi trubki Udachnaya v merzlykh porodakh [Results and prospects for the burial of drainage waters of the Udachnaya kimberlite pipe in frozen rocks]. *Itogi geokriologicheskikh issledovaniy v Yakutii v XX veke i perspektivy ikh dal'neishego razvitiya* [Results of geocryological studies in Yakutia in the 20th century and prospects for their further development]. Yakutsk, IMZ SO RAN publ., 2003, pp. 67-78 (In Russ)
12. Alekseev, S. V., Drozdov A. V., Drozdova T. I., Alekseeva L. P. Pervyi opyt zakhroneniya solenyykh drenaznykh vod kar'era trubki Udachnaya v mnogoletnemerzlye porody [The first experience of burial of saline drainage waters of the Udachnaya pipe quarry in permafrost]. *Kriosfera Zemli-Cryosphere of the Earth*, 2002, vol. VI, no. 2, pp. 61-65 (In Russ)
13. Drozdov A. V. Podzemnoe zakhronenie drenaznykh rassolov v mnogoletnemerzlye porody (na primere Udachninskogo GOKa v Zapadnoi Yakutii) [Underground burial of drainage brines in permafrost (on the example of the Udachninsky GOK in Western Yakutia)]. *Geoekologiya-Geoecology*, 2005, no. 3, pp. 234-243 (In Russ)
14. Klimovskii I. V., Gotovtsev S. P., Shepelev V. V. Gidrogeokriologicheskie usloviya poligona podzemnogo zakhroneniya drenaznykh vod trubki "Udachnaya" [Hydrogeocryological conditions of the landfill for underground burial of drainage waters from the "Udachnaya" pipe]. *Kriosfera Zemli-Cryosphere of the Earth*, 2002, vol. VI, no 3, pp. 45-50 (In Russ)
15. Yannikov A. M. Gidrodinamicheskaya kharakteristika udachninskoi svity v okolotrubochnom massive trubki «Udachnaya» (RS (Yakutiya)). [Hydrodynamic characteristics of the Udachnaya suite in the near-pipe massif of the Udachnaya pipe (RS (Yakutia))]. *Stroenie litosfery i geodinamika: Materialy XXIX Vserossiiskoi molodezhnoi konferentsii* [Structure of the lithosphere and geodynamics: Proceedings of the XXIX All-Russian Youth Conference.]. Irkutsk, 2021, pp. 302-304 (In Russ)
16. Yannikov A. M., Zyryanov I. V., Korepanov A. Yu., Struchkova A. S. Water drive dynamics and time history prediction in the Low Cambrian aquifer within Daldyn kimberlite field. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, vol. 9, pp. 60-73 (In Russ) DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_60.

Янников Алексей Михайлович, к. г.-м. н., Зам. директора по научной работе, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, Республика Саха-Якутия; РФ; e-mail: yannikov90@mail.ru; ORCID 0000-0002-2169-123X

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Aleksey M. Yannikov, PhD in Geol-Min., Deputy Director for Research Institute "Yakutnioproalmaz", "ALROSA" PJSC, Mirny, Republic of Sakha-Yakutia; Russian Federation; e-mail: yannikov90@mail.ru; ORCID 0000-0002-2169-123X

Author have read and approved the final manuscript.