

КРИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

А.М. Янников¹, И.В. Зырянов², А.Ю. Корепанов¹

¹ Институт «Якутнипроалмаз», ПАО АК «АЛРОСА», Мирный, Россия, e-mail: yannikov90@mail.ru

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

Аннотация: Добычные работы на ключевых кимберлитовых трубках Западной Якутии ведутся открытым и подземным способами с использованием систем опережающего водопонижения и защиты от затопления. Все без исключения месторождения характеризуются присутствием в разрезе вмещающих пород коллекторов, имеющих рассольное насыщение и обеспечивающих формирование высокоминерализованных дренажных вод с минерализацией от 120 до 410 г/л. Объем и минерализация природных рассолов определяются криогидрогеологическими условиями конкретного месторождения. В настоящее время их суммарный приток по всем месторождениям составляет 9000 м³/сут. При углублении отработки месторождений происходит постоянное увеличение притока, которое достигнет пиковых ~121 000 м³/сут к 2050 г. В настоящее время все дренажные воды без изменения их химического состава закачиваются в коллекторы толщи многолетнемерзлых пород (ММП) или региональных водоносных комплексов. Дополнительным фактором при формировании дренажных вод выступают атмосферные осадки, выпадающие непосредственно на площадь карьера, а также метеорные воды. Приведена краткая криогидрогеологическая характеристика обрабатываемых месторождений разных кимберлитовых полей. При помощи программ гидрогеологического моделирования выполнен прогноз изменения притока природных рассолов к месторождениям. Исходя из фактического количества поступающих пресных атмосферных вод, важным фактором для выбора раздельного или централизованного водосбора является прогнозный приток природных рассолов, а также динамика его изменения с глубиной. Централизованный водосбор проектируется при условии получения прогнозных притоков, позволяющих компенсировать атмосферные осадки и тем самым получить незначительные суммарные изменения минерализации образующихся дренажных вод. Если прогнозные притоки не позволяют формировать кондиционные для закачки дренажные воды, проектируется более технологически сложная раздельная система водоотведения.

Ключевые слова: Якутская алмазоносная провинция, кимберлитовое поле, высокоминерализованные природные рассолы, дренажные воды, карбонатные коллекторы, многолетнемерзлые породы, водоотведение, водоотлив.

Для цитирования: Янников А. М., Зырянов И. В., Корепанов А. Ю. Криогидрогеологические условия как ключевой фактор при проектировании систем водоотведения на примере кимберлитовых трубок Западной Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 112–129. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_112.

Cryohydrogeology as a key factor in water disposal system design: A case-study of kimberlite pipes in Western Yakutia

A.M. Yannikov¹, I.V. Zyryanov², A.Yu. Korepanov¹

¹ Yakutniproalmaz Institute, AK «ALROSA», Mirny, Russia, e-mail: yannikov90@mail.ru

² Mirny Polytechnic Institute, Branch of Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russia

Abstract: Mining of large kimberlite pipes in Western Yakutia is carried out using the opencast and underground methods with advanced water drawdown and flooding protection. Absolutely all pipes feature the presence of reservoir rocks in the cross-section, which hold much brine and produce drain water of higher salinity from 120 to 410 g/l. The volume and salinification of natural brines depend on the cryo-hydro-geological conditions of a certain deposit. Today, the rate of the total brine inflow per all deposits is 9000 m³/day. As the depth of mining grows, the inflow rate increases and is forecasted to reach the peak value of ~121 000 m³/day by 2050. At the present time, all drain water without any chemical treatment is pumped into reservoirs in permafrost or in regional aquifers. An additional factor of the drain water generation is atmospheric fallout in the area of an open pit mine, and meteoric water. The article offers a brief characteristic of cryohydrogeology in kimberlite mine fields in operation. The hydrogeological modeling provides a forecast of change in natural brine inflow per deposits. On the assumption of the actual volume of fresh atmospheric precipitation, the important factor of selecting between the separate and centralized water collection is the forecasted inflow of natural brines and its change with depth. The centralized water collection is selected when the forecasted inflow can balance the atmospheric fallout, which ensures a slight total change in salinity of drain water. In case that the forecasted inflow is deficient to generate drain water of standard quality, a technology-intensive separate water disposal system is to be designed.

Key words: Yakutia diamond province, kimberlite field, high-salinity natural brines, drain water, carbonate reservoir, permafrost rocks, water disposal, water drainage.

For citation: Yannikov A. M., Zyryanov I. V., Korepanov A. Yu. Cryohydrogeology as a key factor in water disposal system design: A case-study of kimberlite pipes in Western Yakutia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5):112-129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_112.

Введение

Особенности криогидрогеологического строения коренных месторождений алмазов Западной Якутии, а именно наличие рассольного насыщения в интервалах отработки, приводят к образованию высокоминерализованных дренажных вод с минерализацией от 120 до 410 г/л, являющихся, по сути, неизменными природными рассолами верхне-, средне- и нижнекембрийских водоносных комплексов.

Отрабатываемые в Западной Якутии кимберлитовые трубки приурочены к пяти кимберлитовым полям: Алаakit-Мархинскому, Верхне-Мунскому, Далдынскому, Мирнинскому и Накынскому [1]. Суммарный приток к месторождениям в настоящее время составляет ~9000 м³/сут, т.е. объемы превышают 3,0 млн м³/год.

В компании «АЛРОСА» в настоящее время реализована программа обращения с дренажными водами, предусматрива-

ющая их закачку в толщу многолетнемерзлых пород (ММП) или в коллекторы региональных водоносных комплексов.

Присутствие в разрезе вмещающих пород коллекторов, насыщенных природными рассолами, требует их непосредственного учета при выборе системы защиты карьера или рудника от затопления. Первоначальными проектами отработки предусматривался централизованный сбор всех типов вод, поступающих к месторождению, с последующей перекачкой и размещением в хвостохранилищах или закачкой в недра. Однако такой подход приводит к вовлечению в процесс закачки дополнительного объема пресных метеорных вод и атмосферных осадков. Это, в свою очередь, требует реализации технологий раздельного водосбора применительно к конкретному месторождению, а также определения ключевых факторов и условий, определяющих схему водоотведения.

Краткая характеристика криогидрогеологических условий

Вся Якутская алмазоносная провинция расположена в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых, как правило, составляет от 200 до 500 м. Наличие такой мощной водоупорной перекрывающей пачки повлияло на химический состав подземных вод. Пресные воды, сопряженные с зоной активного водообмена, в пределах территории исследований отсутствуют, что определяет дополнительную изолированность сформированных водоносных комплексов. Данный факт позволяет рассматривать рассолонасыщенные породы одним из главных объектов, требующих характеристики, так как водообильность межмерзлотных и подмерзлотных коллекторов является определяющим фактором при формировании дренажных вод.

Приведем краткую характеристику выделяемых в пределах Алакит-Мархинского, Верхне-Мунского, Далдынского, Мирнинского и Накынского кимберлитовых полей водоносных комплексов и горизонтов с указанием макрокомпонентного химического состава природных рассолов.

- В пределах осадочного чехла Алакит-Мархинского кимберлитового поля в отметках отработки и прямого техногенного влияния процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы [2 – 4].

1. Первый от поверхности – межмерзлотный нижеордовикский водоносный комплекс. От дневной поверхности отделен 350 – 400-метровой толщиной ММП (породы перми, карбона, силура). Рассолы вскрываются в отметках +180/+118 м абс., а подошвой являются ММП нижнего ордовика и верхнего кембрия (+87,2/+95,6 м абс.). Коллекторы выделяются непосредственно в олдондинской свите (O_1ol) и сложены преимущественно карбонатными разностями доломитов и известняков с маломощными подчиненными прослоями терригенно-карбонатных мергелей и песчаников. Водообильность комплекса низкая. Фактический приток по скважинам $\sim 0,86 - 1,27$ м³/сут. Комплекс слабонапорный, так как величина пластового давления не превышает 23,2 кгс/см², коэффициент водопроницаемости не превышает 0,1 м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{28-150} \frac{Cl_{99}}{Ca_{50}Mg_{30}(Na+K)_{20}} ph6,5. \quad (1)$$

2. Вторым от дневной поверхности является региональный подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс. Кровля комплекса залегает на абс. отм. –20/–40 м. Подошва комплекса зафиксирована на абс. отм. –500/–550 м и приурочена к слабопроницаемым терригенно-карбонатным разностям мархинской свиты. Общая мощность верхне-

кембрийского водоносного комплекса достигает 300 м. Суммарная мощность всех коллекторов, как правило, составляет 50 м. Коллекторы приурочены к кавернозным и трещиноватым разностям (доломитам) моркокинской и верхней части мархинской свит. Водоносный комплекс относится к высоконапорным. Уровень над кровлей в естественных условиях (статический уровень) составляет 200–250 м. Коэффициент водопроницаемости (T) невысокий — от 0,01 до 0,3 (редко до 3,0) м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{200-350} \frac{Cl_{99}}{Ca_{55}Mg_{30}(Na+K)_{15}} ph4,4-5,5 \quad (2)$$

3. Третьим от дневной поверхности залегает региональный среднекембрийский водоносный комплекс. Абсолютная отметка его кровли зафиксирована на отметках –650/–680 м и приурочена к нижней пачке водоупорных терригенно-карбонатных отложений мархинской свиты. Подошва комплекса выделяется в нижней части удачининской свиты на абс. отм. –1500/–1550 м. Суммарная мощность среднекембрийского водоносного комплекса в пределах кимберлитового поля достигает 600–650 м. Мощность коллекторов намного меньше и не превышает 200–250 м. Коллекторы выделяются в интервалах трещиноватых и кавернозных известняков и доломитов нерасчлененной известняково-доломитовой толщи и верхней части удачининской свиты. Водоносный комплекс высоконапорный. Уровень над кровлей в естественных условиях составляет 350–450 м. Коэффициент проницаемости (T) невысокий и составляет от 0,1 до 1,0 м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{350-400} \frac{Cl_{99}}{Ca_{55}(Na+K)_{30}Mg_{15}} ph4,4-5,5 \quad (3)$$

• В пределах осадочного чехла Верхне-Мунского кимберлитового поля в от-

метках отработки и прямого техногенного влияния процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы [3–5].

1. Первый от поверхности — подмерзлотный среднекембрийский водоносный комплекс. От дневной поверхности отделен толщей ММП мощностью 240–280 м, абсолютная отметка кровли составляет +50/0 м. Подошва комплекса фиксируется на абс. отм. –600/–650 м. Общая мощность отложений от 500 до 600 м. Мощность коллекторов намного меньше и не превышает 150 м. Коллекторы выделяются в интервалах трещиноватых и кавернозных известняков и доломитов. Водоносный комплекс напорный. Напор подземных вод над кровлей в естественных условиях ~50–150 м. Коэффициент проницаемости (T) составляет от 4 до 15 (редко до 20,0) м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{80-200} \frac{Cl_{99}}{Mg_{36}(Na+K)_{35}Ca_{29}} ph5,5-6,1 \quad (4)$$

2. Вторым от дневной поверхности является региональный подмерзлотный нижнекембрийский водоносный комплекс. Кровля комплекса выделяется на абс. отм. –700/–750 м. Подошва комплекса приурочена к нижней части эмяксинской свиты и отмечается на абс. отм. –950/–1000 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 200–250 м. Суммарная мощность всех коллекторов составляет 100–150 м. Коллекторы выделяются в интервалах трещиноватых и кавернозных известняков и доломитов эмяксинской и манькайской свит. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~350–450 м. Коэффициент проницаемости (T) составляет от 10 до 20 м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{350-400} \frac{Cl_{99}}{Ca_{55}(Na+K)_{30}Mg_{15}} ph4,4-5,5 \quad (5)$$

- В пределах осадочного чехла Далдынского кимберлитового поля в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы [6–8]

1. Первым от дневной поверхности является региональный подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс. Данный комплекс характеризуется наименьшими параметрами обводненности в пределах изучаемой территории. От дневной поверхности он отделен толщей ММП мощностью от 150 до 250 м, представленной породами олдониной, онхойюряхской и моркокинской свит. Кровля водоносного комплекса выделяется на абс. отм. +99/+180 м. Подошвой комплекса служат терригенно-карбонатные разности нижней части мархинской свиты в абс. отм. –180/–200 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 300 м, при этом суммарная мощность всех коллекторов редко превышает 50 м. Коллекторы выделяются в интервалах трещиноватых и кавернозных известняков и доломитов моркокинской и мархинской свит. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~20–50 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 0,001 до 0,3 (редко до 1,0) м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{100-200} \frac{Cl_{99}}{Ca_{39}Mg_{38}(Na+K)_{23}} ph5,5-6,5 \quad (6)$$

2. Вторым от дневной поверхности является региональный среднекембрийский водоносный комплекс. Кровля фиксируется на абс. отм. –200/–240 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза удачининской свиты, представленная водоупорными терригенно-карбонатными разностями и фиксирующаяся на абс. отм. –1000/–1050 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 600–650 м, однако суммарная мощность

всех коллекторов составляет 200–250 м. Коллекторы выделяются в интервалах трещиноватых и кавернозных известняков и доломитов нерасчлененной известняково-доломитовой толщи и удачининской свиты. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~350–450 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 2,5 до 40 (редко до 60,0) м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{350-380} \frac{Cl_{99}}{Ca_{54}(Na+K)_{30}Mg_{16}} ph4,4-5,5 \quad (7)$$

3. Третий от поверхности – нижнекембрийский водоносный комплекс. Кровля комплекса залегает на абс. отм. –1050/–1100 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза эмяксинской свиты в абс. отм. –1400/–1450 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 300–350 м. Суммарная мощность всех коллекторов составляет 100–150 м. Коллекторы выделяются в интервалах трещиноватых и кавернозных известняков и доломитов кумахской и эмяксинской свит. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~1000–1200 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 15 до 100 (редко до 150–200) м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{390-420} \frac{Cl_{99}}{Ca_{55}(Na+K)_{30}Mg_{15}} ph3,8-5,0 \quad (8)$$

- В пределах осадочного чехла Накынского кимберлитового поля в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы [5–8].

1. Первый от поверхности – межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс. От дневной поверхности отделен 120–150 м толщей ММП (породы юры, триаса, ордовика), рассолы вскрываются в отметках +160/+90 м абс.,

а подошва приурочена также к толще ММП и отмечается в абс. отм. –100/–120 м абс. Коллекторы выделяются в интервалах трещиноватых и кавернозных известняков и доломитов верхней части моркокинской свиты. Степень водообильности комплекса очень слабая, приток природных рассолов составляет 0,5–2,7 м³/сут. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~15–20 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 0,001 до 0,2 (редко до 0,5–0,8) м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{80-180} \frac{Cl_{99}}{Ca_{54}Mg_{28}(Na+K)_{18}} ph6,0-6,5 \quad (9)$$

2. Вторым от дневной поверхности является региональный подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс. Кровля комплекса залегает на абс. отм. –120/–150 м. Подошвой комплекса служат слабопроницаемые терригенно-карбонатные породы мархинской свиты в абс. отм. –700/–750 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 600 м, эффективная мощность коллекторов редко превышает 150 м. Коллекторы выделяются в интервалах трещиноватых и кавернозных известняков и доломитов моркокинской и мархинской свит. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~200–250 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 0,1 до 1,0 (редко до 3,0) м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{200-350} \frac{Cl_{99}}{Ca_{55}(Na+K)_{30}Mg_{15}} ph4,4-5,5. \quad (10)$$

- В пределах осадочного чехла Мирнинского кимберлитового поля в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы [4–8]

1. Первым от дневной поверхности является подмерзлотный надсолевой метегеро-ичерский водоносный комплекс (МИВК). От дневной поверхности отделен мощной толщей до 300–400 м ММП, представленных терригенно-карбонатными и карбонатными разностями холомолохской и мирнинской свит. Абсолютная отметка кровли составляет –5/+20 м. Подошва комплекса приурочена к нижней части ичерской свиты (пласты № 25, 26 по сводному корреляционному разрезу) и фиксируется в абс. отм. –130/–150 м. Общая мощность водоносного комплекса колеблется от 125 до 220 м [9]. Коллекторы выделяются в интервалах трещиноватых и кавернозных известняков и доломитов с прослоями менее проницаемых гипс-ангидритов. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~200–250 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 5 до 300–400 м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{70-120} \frac{Cl_{92}SO_8^4}{(Na+K)_{90}Ca_5Mg_5} ph6,5-8,5 \quad (11)$$

2. Второй от поверхности – межсолевой олекминский водоносный горизонт. Глубина залегания составляет 1000–1050 м. Мощность от 10 до 30 м. Приурочен к карбонатным породам олекминской свиты. Перекрывается галогенными отложениями чарской свиты, подстилается галогенными отложениями верхней пачки толбачанской свиты. В составе горизонта выделяется от 4 до 6 коллекторов со сложной флюидной насыщенностью. Помимо природных рассолов выделяемые коллекторы насыщены каустобиолитами и пластовыми углеводородными газами. Водоносный горизонт напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях составляют ~650–750 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 0,01 до 0,1–0,5 м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{400-490} \frac{Cl_{99}}{Ca_{62}(Na+K)_{22}Mg_{16}} ph3,7-5,8. \quad (12)$$

3. Третий от поверхности — толбачанский водоносный комплекс. Глубина залегания составляет 1150—1200 м. Суммарная мощность комплекса от 150 до 200 м. Приурочен к карбонатным породам толбачанской свиты. Перекрывается галогенными отложениями верхней пачки толбачанской свиты, подстилается терригенно-карбонатными и сульфатными отложениями толбачанской и эльганской свит. В его составе выделяется 15—17 коллекторов со сложной флюидной насыщенностью (помимо природных рассолов выделяемые коллекторы также насыщены каустобиолитами и пластовыми углеводородными газами). Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях достигают ~550—800 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 0,001 до 0,1—0,5 м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{440-520} \frac{Cl_{99}}{Ca_{62}(Na+K)_{22}Mg_{16}} ph5,2-5,8. \quad (13)$$

4. Эльганский водоносный горизонт. Глубина залегания от поверхности составляет 1420—1470 м. Мощность от 10 до 20 м. Приурочен к карбонатным породам эльганской свиты. Перекрывается терригенно-карбонатными и сульфатными отложениями толбачанской и эльганской свит, подстилается галогенными отложениями нелбинской свиты. В составе горизонта выделяется от 2 до 4 коллекторов со сложной флюидной насыщенностью (помимо природных рассолов выделяемые коллекторы насыщены каустобиолитами и пластовыми углеводородными газами). Водоносный горизонт напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях достигают ~1000—1100 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 0,001 до 0,1 м²/сут.

Формула солевого состава:

$$M_{480-530} \frac{Cl_{99}}{Ca_{62}(Na+K)_{22}Mg_{16}} ph4,5-5,2. \quad (14)$$

Проблемы рассольного насыщения вмещающих пород коренных месторождений алмазов рассматривались многими учеными как во второй половине XX в. (Н.Н. Романовский, Е.В. Пиннекер, П.И. Трофимук, И.С. Ломоносов, М.Г. Вальяшко, В.А. Твердохлебов, А.С. Анциферов, А.А. Дзюба, В.И. Вожов, А.Э. Конторович, Н.П. Коцупало, Е.В. Зелинская, С.Л. Шварцев, М.Б. Букаты, А.Г. Вахромеев и др.), так и в XXI в. — С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева, А.В. Дроздов и др. [8—10, 12 и др.]. Всеми исследователями отмечалась уникальность природных рассолов Западной Якутии и подтверждалась ключевая роль литолого-фациальных, гидрогеологических и геокриологических условий, повлиявших на процессы их формирования.

Образование различных химических типов рассолов, безусловно, тесно связано с историей развития Западной Якутии в предыдущие геологические периоды [10]. Все перечисленные водоносные горизонты и комплексы насыщены хлоридными рассолами. Однако только рассолы МИВК имеют отличающий их натриевый состав. Данный факт объясняется влиянием ряда факторов. Наиболее значимыми и существенно повлиявшими на процесс формирования комплекса, по мнению авторов, являются региональное структурное строение территории и геокриологические условия Непско-Ботуобинской антеклизы, позволившие сформироваться текущему гидродинамическому режиму МИВК. Отличительными особенностями МИВК от более глубоко залегающих водоносных комплексов и горизонтов являются не только относительно молодой возраст его образования (четвертичный), но и присутствие всех классических атрибутов водо-

носных комплексов артезианского типа (зон питания, массопереноса и разгрузки) [10, 11]. Между выделяемыми зонами отмечается тесная взаимосвязь, при этом у более глубоко залегающих горизонтов она отсутствует по причине их приуроченности к зоне затрудненного водообмена и генетического отнесения циркулирующих рассолов к седиментационным «захваченным» водам. Область питания водоносного комплекса находится на юге в 230 – 300 км за пределами изучаемой территории, в пределах междуречья рек Нюя и Лена, а также в складчатом обрамлении юга Сибирской платформы, где трещиноватые и раздробленные среднекембрийские отложения выходят на дневную поверхность. Отдельно необходимо отметить, что в пределах Таас-Юряхской площади (в 100 – 150 км) на юг от Мирнинского кимберлитового поля в интервале метегерской и ичерской свит вскрываются соленые воды с минерализацией 10 – 30 г/л, имеющие сульфатно-хлоридный состав [11, 12]. Другими словами, по мере внедрения в областях питания метеорных вод минерализация соленых вод постепенно повышается вследствие выщелачивания хлоридов и сульфатов кальция, из верхних горизонтов привносятся гидрокарбонаты кальция и магния. На формирование солевого состава хлоридных натриевых рассолов, по всей видимости, решающее влияние оказывает присутствие в геологическом разрезе чарской свиты мощных пластов каменной соли.

Залегающие ниже по разрезу олекминский, толбачанский и эльгянский водоносные комплексы и горизонты из-за глубины залегания, а также экранированности мощными пачками галогенных отложений не имеют какой-либо взаимосвязи с метеорными водами и преимущественно формировались за счет седиментационного захвата и притока ювенильных вод по зонам разломов в периоды

тектонических активизаций в девоне и триасе.

Как видно из приведенной характеристики, наиболее водообильные водоносные комплексы вскрываются в пределах Далдынского и Мирнинского кимберлитовых полей, что обусловлено присутствием в разрезе мощных пачек высокопроницаемых карбонатных коллекторов.

Определение ключевых факторов, влияющих на выбор системы водосбора

Формирование дренажных вод при отработке месторождений связано с поступлением подземных природных рассолов и пресных атмосферных вод. Из-за высоких концентраций ряда нормируемых элементов наличие даже небольшой примеси природных рассолов приводит к формированию дренажных вод, требующих специальных методов утилизации.

Так как обрабатываемые месторождения представляют собой открытые горные выработки различной площади, то количество атмосферных осадков, выпадающих на площадь карьера внутри системы нагорных канав, достигает значительных величин – от 120 до 500 тыс. м³/год, и напрямую зависит от площади карьера на дневной поверхности. В табл. 1 приведены объемы атмосферных вод, фактически зафиксированные на обрабатываемых и отработанных карьерах.

Как видно из представленной таблицы, отработка ключевых месторождений сопряжена с вовлечением в процесс откачки-закачки дополнительного объема атмосферных вод, суммарно составляющего не менее 1,26 млн м³/год.

Учитывая приведенную ранее информацию по количеству (объему) природных рассолов, поступающих к карьерным и шахтным полям месторождений в зависимости от их приуроченности к конкретному кимберлитовому полю (Алакит-

Таблица 1

Объемы атмосферных вод, зафиксированные на обрабатываемых и отработанных карьерах Западной Якутии**Atmospheric water volumes recorded in developed and depleted quarries in Western Yakutia**

№ п/п	Карьер	Объем, тыс. м ³ /год		
		минимальный	средний	максимальный
1	Айхал	120	170	200
2	Ботуобинский	160	190	250
3	Интернациональный	100	120	180
4	Мир	250	320	450
5	Нюрбинский	180	200	270
6	Удачный	250	350	700
7	Юбилейный	200	300	600
	Итого	1260	1650	2250

Мархинское, Верхне-Мунское, Далдынское, Мирнинское, Накынское), целью исследований являлось определение критериев ранжирования месторождений для обоснования последующего проектирования раздельного или централизованного водоотлива.

После анализа условий отработки месторождений были выделены следующие факторы:

- объем и минерализация природных рассолов, поступающих к месторождению;
- тип используемых участков закачки (толща ММП или коллекторы регионального водоносного комплекса);
- способ отработки подкарьерных запасов и, как следствие, возможность размещения дополнительных зумпфов перехвата поверхностных и атмосферных вод на бермах отработанных карьеров;
- структурно-тектонические условия карьерного поля.

Из перечисленных факторов — первые два относятся к криогидрогеологическим, так как связаны с непосредственными объектами изучения: многолетне-мерзлыми породами и подмерзлотными рассолами. Рассмотрим их влияние на

процесс проектирования систем водоотведения.

Объем и минерализация природных рассолов определяются криогидрогеологическими условиями карьерного или шахтного поля конкретного месторождения, а именно мощностью и водообильностью коллекторов, входящих в состав как региональных водоносных комплексов, так и приуроченных к обводненным зонам кимберлитов. Исходя из фактического количества поступающих пресных атмосферных вод, важным фактором для выбора раздельного или централизованного водосбора является прогнозный приток природных рассолов, а также динамика его изменения с глубиной.

Централизованный водосбор проектируется при условии получения прогнозных притоков, позволяющих компенсировать атмосферные осадки и тем самым получить незначительные суммарные изменения минерализации образующихся дренажных вод; для этого прогнозный приток природных рассолов должен формировать не менее 70% их объема.

Если прогнозные притоки природных рассолов не позволяют формировать кондиционные для закачки дренажные

воды, проектируется более технологически сложная раздельная система водоотведения.

Отдельно необходимо отметить, что наличие в разрезе вмещающих пород подмерзлотных высокопроницаемых карбонатных коллекторов позволяет реализовать действующую в настоящее время в пределах Мирнинского кимберлитового поля систему обратной закачки. Так как объемы пресных атмосферных вод составляют менее 5% от прогнозного суммарного объема дренажных вод на трубке «Мир», то их влияние на трансформацию химического состава незначительно, что, в свою очередь, определяет совместимость этих вод и позволяет производить закачку в метегеро-ичерский водоносный комплекс без негативных факторов: например, кольматации закачных скважин.

Тип используемых участков закачки напрямую определяется криогидрогеологическими условиями кимберлитового поля. Например, в случае отсутствия в разрезе высокопроницаемых подмерзлотных коллекторов, что характерно для месторождений Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей, закачка дренажных вод может осуществляться в толщу многолетнемерзлых пород, в интервалах внутримерзлотных коллекторов, соответствующих промороженным зонам активного водообмена, сформировавшимся в дочетвертичное время.

Необходимо отметить, что при закачке дренажных вод в толщу ММП используются коллекторы, залегающие на глубинах не ниже 150 м. По результатам проведенных комплексных исследований многолетнемерзлые породы в пределах участков закачки делятся на три яруса.

- Первый выделяется до глубин 30, реже 50 м, породы в пределах данного яруса подвержены нарушенности, в приповерхностных интервалах в этом слу-

чае отмечаются расширенные трещинные, трещинно-жильные и базальные криогенные текстуры. Породы разбиты вертикальными и наклонными трещинами шириной от 0,5 до 20,0 см. Лед в трещинах чистый, прозрачный. Зачастую в льдистом заполнителе встречаются обломки пород. Трещины напластования зафиксированы только в терригенно-карбонатных разностях. В ряде случаев скважинами на глубинах 30–50 м вскрывались линзы захороненных льдов, мощностью до 3 м.

- Второй выделяется в интервале глубин 30(50)–150 м. Породы в данном ярусе также отличаются значительной нарушенностью и льдистостью, значения которой составляют 5–15%. Лед в трещинах прозрачный с пузырьками воздуха. Ширина трещин от 2 до 8 см. Однако в данном интервале уже выделяются толщи и прослои пород мощностью до 5–10 м, которые могут быть охарактеризованы как водоупоры, так как по ним не наблюдается активного развития трещин и каверн.

- Третий ярус выделяется в интервале глубин 150–280 м, как правило, именно коллекторы на данных глубинах являются целевыми для закачки дренажных вод, так как залегают ниже местных базисов эрозии. Рассолопоглощающими породами выступают нижнесилурийские (в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля), нижнеордовикские (в пределах Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей), верхнекембрийские (в пределах Далдынского и Накынского кимберлитовых полей) и среднекембрийские (в пределах Верхне-Мунского кимберлитового поля) карбонатные породы, разбитые разнонаправленными системами трещин, мощностью от первых миллиметров до десятков сантиметров (рис. 1). Льдистость пород достигает 30%. Суммарная мощность коллекторов от 15 до 40 м.



Рис. 1. Целевые коллекторы толщи ММП
 Fig. 1. Target reservoirs of permafrost

Процесс формирования полезной емкости такого типа коллекторов рассмотрен в работах С.В. Алексева, Ф.Г. Атрощенко, А.В. Дроздова, В.В. Лобанова, А.М. Янникова и др. [4, 5 и др.].

Использование толщи ММП для закачки также было реализовано в процес-



Рис. 2. Целевые коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса
 Fig. 2. Target reservoirs of Lower Cambrian aquifer

се отработки главного месторождения Далдынского кимберлитового поля — трубки «Удачная», за 38 лет эксплуатации в четыре участка было закачено свыше 45 млн м³ дренажных вод. Однако дальнейшее развитие добычных работ на месторождении сопряжено с существенным увеличением прогнозного притока природных рассолов, связанным с вскрытием системой подземных горных выработок на глубине 1350–1800 м от дневной поверхности высокопроницаемых коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса. Данный криогидрогеологический фактор послужил определяющим в направлении развития системы закачки дренажных вод, так как начиная с 2018 г. на удалении 6 км от месторождения была реализована закачка в глубоководные коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса (рис. 2) при помощи ряда закачных скважин глубиной 1700 м.

Методика исследований

Так как определение способа водосбора, прежде всего, основано на прогнозе изменения притока природных рассолов к шахтным и карьерным полям ключевых месторождений, главным методом исследований выступало гидрогеологическое моделирование условий месторождений на всем их жизненном цикле до 2054 г.

Схематизация гидрогеологических условий объектов изучения (кимберлитовые трубки, вмещающие породы, участки закачки) определялась по ранее полученным в ходе проведения опытно-фильтрационных работ и режимных наблюдений данным. По той причине, что кимберлитовые поля удалены друг от друга на значительные расстояния, для каждого из них потребовалось построение прогностических моделей.

Моделирование гидрогеологических условий шахтных и карьерных полей ким-

берлитовых трубок и сопряженных участков закачки проведено с использованием лицензионной программы FEFLOW, реализующей пространственную фильтрацию подземных вод методом конечных элементов в многослойной толще для областей произвольной конфигурации с изменяющимися по известному закону ГУ I, II и III рода при наличии фильтрационных неоднородностей в плане и разрезе, вертикального переноса [13–15].

Программа позволяет определять уровни и понижения уровней подземных вод в каждой области фильтрации для каждого слоя, расходы подземных вод в граничных точках изучаемой области, составляющие баланса подземных вод (фильтрация, разгрузка и питание потока подземных вод, перетоки между слоями), автоматически управлять работой граничных условий.

Площади районов моделирования составляли от 100 до 400 км² и определялись радиусами влияния от систем защиты рудников и карьеров от затопления, а также радиусами куполов растекания, формирующихся в результате закачки на сопряженных участках. Фильтрационный поток исследуемой области моделировался неструктурированной (нерегулярной) треугольной сеткой. Количество элементов в каждом слое и размер ребер определялись исходя из необходимости учета радиусов закачных и дренажных скважин. Сетка удовлетворяет критерию Делоне [16, 17].

Для решения прогнозной задачи объекты моделирования задавались согласно представленной ранее гидрогеологической характеристике кимберлитовых полей. Кроме перечисленных водоносных комплексов на модели заданы вертикальные фильтрационные структуры: разломы, кимберлитовые тела и др. Граничными условиями при моделировании выступали карьеры, подземные горные

выработки рудников, дренажные и закачные скважины [18].

В результате выполненной калибровки построенных для каждого кимберлитового поля моделей фильтрации подземных вод при решении обратных задач было достигнуто 5%-ное отклонение фактических и модельных параметров на декабрь 2021 г. Это вполне удовлетворительно для дальнейшего прогнозирования изменений гидродинамического режима изучаемых объектов.

Результаты и их обсуждение

Как было отмечено ранее, объем и минерализация поступающих к месторождению природных рассолов определяется не только природными криогидрогеологическими условиями, а именно его принадлежностью к определенному кимберлитовому полю, но и технологическими особенностями — скоростью проходки и глубиной отработки месторождения. Причем влияние техногенного фактора весьма ощутимо, так как интенсификация процесса проходки горных выработок требует сопутствующей интенсификации по осушению горных пород, что приводит к формированию увеличенного притока вод, особенно на первоначальных этапах отработки.

Прогнозные объемы образования природных рассолов по ключевым месторождениям приведены в табл. 2.

Исходя из представленной информации, значительным ресурсом для разбавления, без существенного изменения химического состава и, как следствие, кондиционных свойств для закачки обладают месторождения Верхне-Мунского, Далдынского и Мирнинского кимберлитовых полей. Трубки Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей характеризуются невысокими притоками, даже при глубине вскрытия свыше 500 м, что препятствует строительству водоотлива по централизованной схеме,

Таблица 2

Прогнозные объемы формирования природных рассолов по ключевым месторождениям Западной Якутии
Predicted volumes of formation of natural brines in key fields of Western Yakutia

Поле	Приток, м ³ /сут									
	Алаakit-Мархинское		Мирнинское		Накынское			Верхне-Мунское		Далдынское
Трубка	Айхал	Юбилейная	Интернациональная	Мир	Ботубинская	Нюрбинская	Майская	Заполярная + Деймос	Комсомольская-Магнитная + Новинка	Удачная
Год										
2025	310	17	520	—	—	102	—	—	—	7200
2030	410	420	24 040	200	51	99	18,2	577	—	8400
2035	410	580	24 040	48 150	49	103	36,4	3702	3684	10 800
2040	430	560	24 040	48 150	59	107	81,1	4888	4975	13 200
2045	430	560	24 040	48 150	64	108	—	—	—	13 920
2050	—	980	—	48 150	—	—	—	—	—	14 400
2055	—	980	—	48 150	—	—	—	—	—	18 000
2060	—	—	—	48 150	—	—	—	—	—	28 800
2065	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40 800
2070	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40 800

так как атмосферные осадки в периоды интенсивного поступления (паводки и др.) будут существенно разубоживать природные рассолы, прежде всего уменьшая их минерализацию, которая, в свою очередь, является ключевой составляющей для выбора технологии по обращению с водами.

В зависимости от типов используемых коллекторов кондиционное значение минимальной минерализации отличается, при этом всегда остается вопрос совместимости закачиваемых вод, при условии их существенного разубоживания.

Природные межмерзлотные коллекторы формируются в породах и пачках пород, которые приурочены к подразделам, с определенной, в основном тектонической нарушенностью и пластово-поровой и каверновой пустотностью ММП, обладающие естественной и наведенной емкостью. При воздействии

на льдистую составляющую пород этих структур высокоминерализованными дренажными водами происходит формирование дополнительной гравитационной и поровой емкости в техногенном талике внутри мерзлого массива. В такие естественные коллекторы производится закачка дренажных вод (насыщенных и ненасыщенных рассолов). Минимальная минерализация для коллекторов толщи ММП составляет 55—60 г/л. Указанная минерализация позволяет выполнять закачку дренажных вод в ММП, так как является равновесной относительно их средней температуры. Однако воды такой минерализации не способны увеличивать приемистость участков, так как не разубоживаются дополнительно за счет плавления жильного льда. Поэтому минимальная минерализация, позволяющая использовать коллекторы толщи ММП даже в отдаленной перспективе (1–2 го-

да) без потери приемистости закачных скважин, составляет не менее 80 г/л.

Определение температуры замерзания рассолов выполнялось специалистами ИЗК СО РАН (С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева и др.) в ходе комплексных специализированных исследований. В настоящее время для закачки дренажных вод эксплуатируются следующие участки, использующие коллекторы толщ ММП:

- в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля – «Заречный» и «Ноябрьский»;
- в пределах Далдынского кимберлитового поля – «Левобережный» и «Левобережный-2»;
- в пределах Накынского кимберлитового поля – «Ботуобинский».

Природные подмерзлотные коллекторы приурочены к карбонатным породам нижнего, среднего и верхнего кембрия, входящим в состав участков 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. Как правило, в такие криогидрогеологические структуры производится закачка дренажных вод (в основном, природных рассолов) однородного химического состава из открытых и подземных горных выработок. К примерам использования естественных подмерзлотных коллекторов криолитозоны в Западной Якутии можно отнести обратную закачку дренажных вод месторождений трубок «Мир» и «Интернациональная» в метегеро-ичерский водоносный комплекс на участках обратной закачки, а также закачку рассолов трубки «Удачная» в нижнекембрийский водоносный комплекс.

При выборе данного способа утилизации минерализация имеет меньшее

значение из-за значительных емкостных запасов самих водоносных комплексов. Минимально необходимое значение, определенное экспериментальным путем в процессе эксплуатации участков, составляет 35 г/л. Однако транспортировка таких вод возможна только по утепленным трубопроводам или в период года с устойчивыми положительными температурами.

Способ отработки подкарьерных запасов также является важным фактором. В настоящее время реализовано несколько вариантов подземной отработки:

- комбайновая нисходящими лентами с последующим замещением отработанного кимберлита закладочным массивом, формируемым на цементной основе с использованием местных материалов для изготовления малоклинкерного вяжущего (данный метод используется на руднике «Интернациональный», а также использовался на руднике «Мир» до 2017 г.);

- камерно-целиковая отбойка кимберлита с последующим заполнением отработанных камер твердеющей закладкой на цементной основе с использованием малоклинкерного вяжущего из местных материалов (данный метод в нисходящем порядке реализован на руднике «Айхал», а также планируется к реализации в восходящем порядке после восстановления рудника «Мир»);

- методами самообрушения с торцевым выпуском под защитой предохранительной подушки без использования закладочных смесей для поддержания выработанного пространства (данный метод реализован на руднике «Удачный» и планируется на руднике «Юбилейный»).

Определение конкретного метода основывается, прежде всего, на экономических показателях месторождения (содержание алмазов, цена товарной продукции и т.д.). Однако немаловажную роль в выборе способа отработки играют

гидрогеологические условия, а именно возможность реализации отдельного сбора подземных рассолов и атмосферных вод.

Реализация отдельного сбора разных типов вод требует строительства и обустройства дополнительных водоприемных зумпфов [19, 20]. При выборе места их заложения ключевым фактором является структурно-тектоническое строение локального участка карьерного поля. При выборе места предпочтение отдается зонам, не осложненным разрывными нарушениями. В случае выявления в пределах места заложения узлов пересекающихся или оперяющих разломов после проведения комплекса работ (опытное бурение, опытные нагнетания воздуха для определения локальной проницаемости массива и др.) принимается решение о переносе места заложения или проведении купирующих мероприятий по гидроизоляции.

Заключение

Присутствие в интервале вмещающих пород рассолонасыщенных коллекторов требует непосредственного изучения их распространения в плане и в разрезе, так как является определяющим фактором при проектировании систем осушения и защиты карьеров и рудников от затопления. Кроме того, наличие в разрезе таких коллекторов накладывает жесткие ограничения на обращение с формируемыми дренажными водами, прежде всего из-за сопутствующих экологических рисков.

Ключевым фактором, позволяющим реализовывать централизованный, а не отдельный сбор дренажных вод, является процентное соотношение атмосфер-

ных вод и природных рассолов. Минимально необходимое (допустимое) соотношение, позволяющее производить закачку дренажных и смешанных вод, составляет 1:1. Рекомендуемое количество не должно превышать 20% от суммарной годичной производительности закачки на сопряженном обрабатываемом месторождении узле закачки.

В настоящее время после подготовки соответствующего обоснования по целому ряду ключевых месторождений трубок «Айхал», «Ботубинская», «Зарница», «Нюрбинская» и «Юбилейная» был реализован отдельный сбор различных типов вод. Зумпфы перехвата атмосферных вод оборудуются либо во временном исполнении на полосе разноса, либо в постоянных версиях (при условии постановки борта в проектное положение) в отметках распространения ММП, т.е. в незасоленных породах (ненасыщенных межмерзлотными или подмерзлотными рассолами). Оборудование карьеров дополнительными зумпфами позволило на 70% уменьшить объем атмосферных вод, попадающих в призабойный зумпф, и, как следствие, уменьшить объем дренажных вод, требующих закачки.

Карьеры «Заря», «Заполяный», «Магнитный» и «Майский» в настоящее время не вскрыли коллекторы, насыщенные рассолами. Поэтому на данных месторождениях реализован централизованный сбор всех типов вод, представленных метеорными водами сезонно-талого слоя и атмосферными осадками. Из трех эксплуатируемых в настоящее время рудников отдельный сбор дренажных вод реализован на двух — «Айхал» и «Интернациональный». Частично отдельный сбор — на руднике «Удачный».


СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колганов В. Ф., Акишев А. Н., Дроздов А. В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. — 576 с.

2. Дроздов А. В. Горно-геологические особенности глубоких горизонтов трубки Удачная // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 3. — С. 153–165.
3. 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. — 2022. — № 9. — С. 60–73. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_60.
4. Янников А. М. Гидрогеология Алаakit-Мархинского кимберлитового поля. — Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2022. — 132 с.
5. Дроздов А. В., Иост Н. А., Лобанов В. В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. — Иркутск: ИрГТУ, 2008. — 507 с.
6. Дроздов А. В. Подземное захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлые породы (на примере Удачинского ГОКа в Западной Якутии) // Геоэкология. — 2005. — № 3. — С. 234–243.
7. Янников А. М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля. — Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2021. — 240 с.
8. Алексеев С. В., Алексеева Л. П., Гладков А. С., Трифонов Н. С., Серебряков Е. В., Павлов С. С., Ильин А. В. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная // Геодинамика и тектонофизика. — 2018. — № 9(4). — С. 1235–1253. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0393.
9. Alexeev S. V., Alexeeva L. P., Vakhromeev A. G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects // Geochemistry. 2020, vol. 117, article 104588. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104588.
10. Alexeev S. V., Alexeeva L. P. Hydrogeochemistry of the permafrost zone in the central part of the Yakutian diamond-bearing province, Russia // Hydrogeology Journal. 2003, vol. 11, no. 5, pp. 574–581. DOI: 10.1007/s10040-003-0270-8.
11. Янников А. М., Янникова С. А., Овчинникова М. Ю., Корепанов А. Ю. Использование ММП для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» // Вестник Пермского университета. Геология. — 2021. — № 3. — С. 284–299. DOI: 10.17072/psu.geol.20.3.284.
12. 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. — С. 71–81.
13. Pham H. T., Rühaak W., Schuster V., Sass I. Fully hydro-mechanical coupled Plug-in (SUB+) in FEFLOW for analysis of land subsidence due to groundwater extraction // SoftwareX. 2019, vol. 9, pp. 15–19.
14. Jafari T., Kiem A. S., Javadi S., Nakamura T., Nishida K. Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2021, vol. 35, article 100822. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100822.
15. Nagare R. M., Mohammed A. A., Park Y. J., Schincariol R. A. Modeling shallow ground temperatures around hot buried pipelines in cold regions // Cold Regions Science and Technology. 2021, vol. 187, article 103295.
16. Bidwell V. J. Realistic forecasting of groundwater level, based on the eigenstructure of aquifer dynamics // Mathematics and Computers in Simulation. 2005, vol. 69, pp. 12–20. DOI: 10.1016/j.matcom.2005.02.023.
17. Han L., Menzel L. Hydrological variability in southern Siberia and the role of permafrost degradation // Journal of Hydrology. 2022, vol. 604, article 127203. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127203.
18. Kurylyk B. L., MacQuarrie K. T. B., McKenzie J. M. Climate change impacts on groundwater and soil temperatures in cold and temperate regions: Implications, mathematical theory,

and emerging simulation tools // *Earth-Science Reviews*. 2014, vol. 138, pp. 313–334. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.06.006.

19. Yurkevich N., Fadeeva I., Bortnikova S., Shevko E., Yannikov A. Modeling the process of thawing of tailings dam base soils by technological waters // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021, vol. 11, no. 23, article 11089. DOI: 10.3390/app112311089.

20. Шепелев В. В. Надмерзлотные воды криолитозоны. — Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2011. — 169 с. 

REFERENCES

1. Kolganov V. F., Akishev A. N., Drozdov A. V. *Gorno-geologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdeniy almazov Yakutii* [Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia], LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 576 p.

2. Drozdov A. V. Mining and geological peculiarities of deep layers at Udachaya pipe. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 3, pp. 153–165. [In Russ].

3. 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, no. 9, pp. 60–73. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_60.

4. Yannikov A. M. *Gidrogeologiya Alakit-Markhinskogo kimberlitovogo polya* [Hydrogeology of the Alakit-Markhin kimberlite field], Mirnyy, Izd-vo ZYaNTS/YaNA, 2022, 132 p.

5. Drozdov A. V., Iost N. A., Lobanov V. V. *Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdeniy Zapadnoy Yakutii* [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia], Irkutsk, IrGTU, 2008, 507 p.

6. Drozdov A. V. Underground burial of drainage brines in permafrost rocks (on the example of Udachninsky GOK in Western Yakutia). *Geoekologiya*. 2005, no. 3, pp. 234–243. [In Russ].

7. Yannikov A. M. *Gidrogeologiya Mirninskogo kimberlitovogo polya* [Hydrogeology of the Mirny kimberlite field], Mirnyy, Izd-vo ZYaNTS/YaNA, 2021, 240 p.

8. 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]. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0393.

9. Alexeev S. V., Alexeeva L. P., Vakhromeev A. G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects. *Geochemistry*. 2020, vol. 117, article 104588. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104588.

10. Alexeev S. V., Alexeeva L. P. Hydrogeochemistry of the permafrost zone in the central part of the Yakutian diamond-bearing province, Russia. *Hydrogeology Journal*. 2003, vol. 11, no. 5, pp. 574–581. DOI: 10.1007/s10040-003-0270-8.

11. Yannikov A. M., Yannikova S. A., Ovchinnikova M. Yu., Korepanov A. Yu. The use of permafrost for injection of drainage waters of primary diamond deposits on the example of the Noyabrsky site. *Bulletin of Perm University. Geology*. 2021, no. 3, pp. 284–299. [In Russ]. DOI: 10.17072/psu.geol.20.3.284.

12. Drozdov A. V., Melnikov A. I. Rupture dislocation role in diamond mine water encroachment in Yakutia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy*. 2014, no. 2, pp. 71–81. [In Russ].

13. Pham H. T., Rühaak W., Schuster V., Sass I. Fully hydro-mechanical coupled Plug- in (SUB+) in FEFLOW for analysis of land subsidence due to groundwater extraction. *SoftwareX*. 2019, vol. 9, pp. 15–19.

14. Jafari T., Kiem A. S., Javadi S., Nakamura T., Nishida K. Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021, vol. 35, article 100822. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100822.

15. Nagare R. M., Mohammed A. A., Park Y. J., Schincariol R. A. Modeling shallow ground temperatures around hot buried pipelines in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2021, vol. 187, article 103295.

16. Bidwell V. J. Realistic forecasting of groundwater level, based on the eigenstructure of aquifer dynamics. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2005, vol. 69, pp. 12 – 20. DOI: 10.1016/j.matcom.2005.02.023.

17. Han L., Menzel L. Hydrological variability in southern Siberia and the role of permafrost degradation. *Journal of Hydrology*. 2022, vol. 604, article 127203. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127203.

18. Kurylyk B. L., MacQuarrie K. T. B., McKenzie J. M. Climate change impacts on ground-water and soil temperatures in cold and temperate regions: Implications, mathematical theory, and emerging simulation tools. *Earth-Science Reviews*. 2014, vol. 138, pp. 313 – 334. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.06.006.

19. Yurkevich N., Fadeeva I., Bortnikova S., Shevko E., Yannikov A. Modeling the process of thawing of tailings dam base soils by technological waters. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021, vol. 11, no. 23, article 11089. DOI: 10.3390/app112311089.

20. Shepelev V. V. *Nadmerzlotnye vody kriolitozony* [Permafrost waters of the cryolithozone], Novosibirsk, Akademicheskoe izdatel'stvo «Geo», 2011, 169 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Янников Алексей Михайлович¹ — д-р геол.-минерал. наук, зав. лабораторией, e-mail: YannikovAM@alrosa.ru, ORCID ID: 0000-0002-2169-123X,

Зырянов Игорь Владимирович — д-р техн. наук, зав. кафедрой, Политехнический институт — филиал в г. Мирный Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, e-mail: ZyryanovIV@alrosa.ru,

Корепанов Алексей Юрьевич¹ — зав. сектором гидрогеологических исследований, e-mail: KorepanovAYu@alrosa.ru,

¹ Институт «Якутнипроалмаз», ПАО АК «АЛРОСА».

Для контактов: Янников А.М., e-mail: yannikov90@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.M. Yannikov¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Head of Laboratory, e-mail: YannikovAM@alrosa.ru, ORCID ID: 0000-0002-2169-123X,

I.V. Zyrianov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Chair, Mirny Polytechnic Institute, Branch of Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russia, e-mail: ZyryanovIV@alrosa.ru,

A.Yu. Korepanov¹, Head of Hydrogeological Research Sector, e-mail: KorepanovAYu@alrosa.ru,

¹ Yakutniproalmaz Institute, AK «ALROSA», Mirny, Russia.

Corresponding author: A.M. Yannikov, e-mail: yannikov90@mail.ru.

Получена редакцией 15.12.2022; получена после рецензии 22.03.2023; принята к печати 10.04.2023.

Received by the editors 15.12.2022; received after the review 22.03.2023; accepted for printing 10.04.2023.