

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ ОТРАБОТКЕ КИМБЕРЛИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

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

¹ Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия, e-mail: yannikov90@mail.ru

² Политехнический институт – филиал в Мирном Северо-Восточного
федерального университета имени М.К. Аммосова, Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

Аннотация: Гидрогеологическое сопровождение горнодобывающих предприятий позволяет получать полноценные сведения о распространении, условиях залегания, питания, фильтрационных свойствах, режиме водоносных горизонтов, поведении пород и подземных вод при эксплуатации месторождений. В настоящее время в АК АЛРОСА ПАО действует гидрогеологическая служба, решающая текущие задачи по гидрогеологическому сопровождению добычных работ на кимберлитовых трубках Западной Якутии. Отделы главных гидрогеологов, созданные в рамках штатной структуры горно-обогажительных комбинатов, позволяют осуществлять гидрогеологический мониторинг непосредственно на месторождениях в пределах шахтных и карьерных полей. Гидрогеологическое сопровождение добычных работ, прежде всего, осуществляется на основе полевых, лабораторных и теоретических исследований. Описаны главные задачи, решаемые в процессе проведения комплексных работ и научных исследований. Спрогнозированы изменения криогидрогеологических условий обрабатываемых месторождений и их влияние на применяемые методы контроля и мониторинга. Выделены основные проблемы, которые возникнут на месторождениях при увеличении глубины ведения добычных работ. Предложены перспективные направления исследований, необходимые для продолжения безопасного ведения добычи алмазов в условиях криолитозоны, в том числе в части научно-методической базы, что необходимо для дальнейшей генерации и внедрения в производство новых технических решений.

Ключевые слова: Якутская алмазоносная провинция, коренные месторождения алмазов, гидрогеологическое моделирование, гидрогеологическая служба, гидрогеологическая съемка, насыщенные и ненасыщенные рассолы, водопритоки, АК АЛРОСА.

Для цитирования: Янников А. М., Зырянов И. В., Корепанов А. Ю. Гидрогеологическое сопровождение горных работ при отработке кимберлитовых месторождений криолитозоны Западной Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7. – С. 169–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_169.

Hydrogeological supervision of kimberlite mining in permafrost zone in Western Yakutia

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

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

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

Abstract: Hydrogeological supervision of mining makes it possible to obtain full information on the spread, conditions, feed, permeability and behavior of aquifers, rocks and groundwater during mineral mining. At the present time, ALROSA has a hydrogeological service that solves current problems connected with the hydrogeological supervision of mining operations at kimberlite pipes in Western Yakutia. Departments of chief hydrogeologists in the structure of mining and processing plants perform hydrogeological monitoring immediately in surface and underground mines. The hydrogeological supervision of mineral mining uses, first of all, the data of full-scale and lab-scale investigations and theoretical analyses. The main problems solved in the course of the integrated research are described. The changes in the cryo-hydrogeological conditions at mineral deposits being mined are predicted together with their impact on the monitoring and control methods. The main adversaries to arise in mineral mining at greater depths are identified. The promising trends of research required to continue safe diamond-bearing kimberlite mining in the permafrost zone are proposed, including the scientific methodology framework, which is essential for the further generation of new engineering solutions and their introduction in the industry.

Key words: Yakutia diamond province, primary diamond deposit, hydrogeological modeling, hydrogeological service, hydrogeological survey, saturated and nonsaturated brines, water inflows, ALROSA.

For citation: Yannikov A. M., Zyryanov I. V., Korepanov A. Yu. Hydrogeological supervision of kimberlite mining in permafrost zone in Western Yakutia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7):169-179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_169.

Введение

Минерально-сырьевая база природных алмазов Западной Якутии сконцентрирована в пределах четырех кимберлитовых полей: Алакит-Мархинского, Далдынского, Мирнинского и Накынского. Статус промышленных месторождений на исследуемой территории имеют 19 кимберлитовых тел [1]. Это трубки «Айхал», «Ботуобинская», «Дачная», «Деймос», «Заполярная», «Заря», «Зарница», «Интернациональная», «Комсомольская», «Комсомольская-Магнитная», «Майская», «Мир», «Новинка», «Нюрбинская», «Спутник», «Сытыканская», «Удачная», «Юбилейная» и «XXIII съезда КПСС».

Пять из них («Дачная», «Комсомольская», «Спутник», «Сытыканская» и «XXIII съезда КПСС») уже отработаны. Остальные 14 вовлечены в отработку подземным и открытым способами.

Главными месторождениями Якутской алмазоносной провинции являются кимберлитовые трубки «Айхал», «Ботуобинская», «Интернациональная», «Мир», «Нюрбинская», «Удачная» и «Юбилейная». Данные месторождения будут определять будущее алмазодобывающей отрасли РФ, так как их уникальные параметры позволяют вести рентабельную отработку открытым, комбинированным и подземным способами, как минимум, до 60–70-х годов XXI в.

Отработка коренных месторождений алмазов осложняется вскрытием водоносных горизонтов, содержащих высокоминерализованные рассолы, делающие борьбу с ними одной из сложных проблем ведения горных работ и охраны окружающей среды. Для защиты горных выработок и окружающей среды разработан и применяется достаточно широкий спектр гидрогеологических ме-

роприятий [2]. На сегодняшний день в АК «АЛРОСА» действует гидрогеологическая служба (рисунок) [3], решающая текущие задачи по гидрогеологическому обеспечению добычных работ в пределах Западной Якутии.

Рассмотрим задачи, решаемые в рамках сформированной структуры.

Отделы главных гидрогеологов, созданные в рамках штатной структуры горно-обогатительных комбинатов, позволяют осуществлять гидрогеологический мониторинг непосредственно на месторождениях в пределах шахтных и карьерных полей, включающий в себя:

- ежемесячную гидрогеологическую съемку (обследование) подземных выработок рудников и карьеров, проводимую в рамках мониторинговых гидрогеологических наблюдений. На планы горизонтов и аксонометрическую схему выработок выносятся все зафиксированные притоки вод (капежи, струйные, контактные и т.д.) различного генезиса (дренажные воды, техногенные, природные рассолы);
- наблюдения за зафиксированными в горных выработках притоками дренажных карьерных вод и природных рассолов, включающие в себя замеры дебитов, минерализации, генезиса вод;
- еженедельный контроль над системами перепуска дренажных карьерных вод и системами опережающего водопонижения;

- ежесуточный контроль и учет параметров обратной закачки (расход, минерализация закачиваемых вод);

- ежемесячный контроль над площадным распространением и динамикой изменения пьезометрической поверхности в пределах эксплуатируемых участков закачки;

- контроль (гидрогеологическое сопровождение) буровых работ при бурении всех типов скважин.

Гидрогеологическая служба в рамках геологоразведочного комплекса (Вилуйской геологоразведочной экспедиции) выполняет региональный гидрогеологический мониторинг, заключающийся в регулярных замерах и поддержании режимной сети скважин, пробуренных для определения интенсивности техногенного воздействия на геологическую среду.

Отдельным блоком исследований являются работы, проводимые по участкам закачки, с применением комплекса ГИС, так как в рамках ГОКов не создано отдельных геофизических служб. Дополнительной задачей являются специализированные исследования территории, направленные на поиск, подтверждение и выявление перспективных площадей, пригодных для последующего строительства участков закачки дренажных вод.

В составе института «Якутнипроалмаз» научно-методическим сопровождением добычных работ занимается



Существующая структура гидрогеологической службы АК «АЛРОСА»

The existing structure of the hydrogeological service of PJSC ALROSA

комплексный отдел горно-геологических проблем разработки месторождений. Оно заключается в составлении ежеквартальных заключений по результатам проводимого мониторинга, отнесении подземных горных выработок к классам и группам газо- и нефтеопасности, а также выполняет проектные и научно-исследовательские работы по гидрогеологическому, гидрологическому, газодинамическому, гидродинамическому и регламентному обеспечению производственных активов, что необходимо для составления Специальных мероприятий, Технических проектов, Регламентов, Заключений и др.

Методика работ

Гидрогеологическое сопровождение добычных работ, прежде всего, осуществляется на основе полевых, лабораторных и теоретических исследований. Основными полевыми методами являются эксперименты, состоящие из [3]:

- натуральных поинтервальных экспериментов по скважинам для оценки водообильности, газообильности и проницаемости толщ осадочных пород на основе поинтервальных постановок пластоиспытателей, выпусков пластовых вод и газов, компрессионных испытаний, газового каротажа;

- изучения литологических разностей осадочных пород;

- оценки фильтрационных параметров осадочных пород с использованием опытных откачек, режимных наблюдений по сети скважин, в том числе пробуренных из подземных горных выработок;

- отбора проб воды, газа, керн на разные виды анализов при бурении разведочных, дегазационных, геомеханических и опытных скважин;

- изучения разрывных нарушений, проявлений малоамплитудной тектоники, их картирования, вынесения на планы;

- режимных наблюдений за расходами пластовых вод и газов по сети скважин, пробуренных из подземных горных выработок, необходимых для определения изменения гидродинамического режима.

Анализ полученных данных производится специалистами института «Якутнипроалмаз» с широким применением методов изучения гидродинамики и гидравлики водонасыщенных сред в условиях неустановившегося и квазистационарного режимов. В ходе решения поставленных задач, как правило, используются общепринятые методики проведения гидрогеологических, геофизических, газовых и других исследований [4, 5 и др.].

Лабораторные работы по химическому анализу подземных вод, растворенных и свободных пластовых газов выполняются в институте «Якутнипроалмаз» с использованием количественных и полуколичественных методов. Лабораторные определения физико-механических свойств горных пород осуществляются в лаборатории геомеханики института «Якутнипроалмаз».

Определение коллекторских свойств осадочных пород выполняет ОАО НПП ВНИИГИС. Работы по изучению совместности закачиваемых вод с толщиной многолетнемерзлых пород (ММП) и природными рассолами выполнялись силами ИЗК СО РАН [6, 7 и др.].

Теоретические исследования заключаются в аналитическом решении 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 осуществляется графоана-

литическими и гидродинамическими методами. Отдельно необходимо отметить, что в процессе камеральной обработки проведенных опытно-фильтрационных работ приходится сталкиваться с «нетипичными» гидрогеологическими условиями. Как правило, обработку результатов выпуска в наблюдательных и опытных скважинах можно производить способами временного, площадного и комбинированного прослеживания. На основе следующих графиков:

- $\frac{S}{Q} - \lg t$ — график временного прослеживания);
- $\frac{S}{Q} - \lg r$ — график площадного прослеживания);
- $\frac{S}{Q} - \lg \frac{t}{r^2}$ — график комбинированного прослеживания).

Коэффициенты проводимости (водопродимости) и пьезопроводности определяются по угловым коэффициентам и начальным ординатам этих графиков.

В качестве примера дискуссионности применения указанных способов определения фильтрационных параметров, как частный случай, можно привести коллекторы толбачанской свиты. Их изучение, прежде всего, проводилось по сети опытных скважин, пробуренных из подземных горных выработок гор. –790 м. Все опытные скважины изливались с различными дебитами (максимальные расходы составляли от 5,2 до 46,2 м³/сут при понижении порядка 900 м). Главной особенностью являлась резко изменяемая интенсивность притока рассолов по наблюдаемым скважинам. Максимальные водопритоки, как правило, фиксировались на момент вскрытия водонасыщенных коллекторов.

Дополнительными факторами, затрудняющими применение стандартных

методик динамики подземных вод для определения проводимости (водопродимости), выступают:

- одновременное снятие пластового давления, возникающее из-за выпуска природных рассолов, которое приводит к деформационным процессам, так как отсутствует декомпенсация падения давления ~12,2 МПа, что ведет к процессам уменьшения открытой пористости и трещиноватости карбонатных пород, из-за горного давления вышележащей толщи (порядка 1200 м);

- расположение опытной скважины в подземной горной выработке, что формирует в радиусе 2,5 – 3,0 м зоны дополнительной релаксации, так как происходит частичная разгрузка напряжений непосредственно в самой подземной горной выработке. Данный процесс оказывает непосредственное влияние на процесс фильтрации и массопереноса;

- изучаемые природные системы коллекторов, которые в зависимости от глубины залегания и приуроченности к кимберлитовому полю имеют сложную флюидную насыщенность, так как помимо природных рассолов содержат пластовые газы как в свободной, так и водорастворенной формах. Дополнительно в коллекторах олекминской, толбачанской и эльгянской свит в пределах Мирнинского кимберлитового поля присутствует каустобиолитная насыщенность мальтами, нефтями и жидкими битумами, что также не позволяет использовать классические методы определения без внесения большого ряда допущений и упрощений.

Определение влияния зафиксированных разрывных нарушений на гидрогеологические условия месторождения, а именно фильтрационные свойства коллекторов, производится путем аналитического решения, методами сопоставления, а также методами статистического анализа. Определение основных гидро-

динамических коэффициентов осуществляется методами временного и комбинированного прослеживания. Для оценки техногенного воздействия, процесса осушения и закачки активно применяются методы гидрогеологического и гидродинамического моделирования в ПО Modflow и Feflow.

При схематизации гидрогеологических месторождений применяются различные методы и граничные условия, в зависимости от конкретных условий и моделируемого водоносного комплекса или горизонта [8–11].

При ведении полевых работ используется весь перечень гидрогеологического оборудования:

- для замера уровней подземных вод — гидрогеологические хлопушки, электроуровнемеры, автоматизированные системы измерения уровней как зарубежного, так и российского производства, автоматические термоманометры;
- определение пластовых давлений производится при помощи пластовых испытателей, систем пакеров, манометров;
- замеры расходов производятся тарированными емкостями (объемный метод), поверенными счетчиками, ультразвуковыми расходомерами;
- определение местоположений водопроявлений и их привязка осуществляется с применением маркшейдерского оборудования и производится в местных системах координат;
- геофизические исследования скважин, направленные на определение гидрогеологических параметров, выполняются комплексами сертифицированного оборудования, смонтированного на каротажных станциях, как правило, на базе автомобилей УРАЛ и КАМАЗ.

Результаты и обсуждение

Дальнейшее ведение добычных работ неразрывно связано с увеличением глубины отработки: для трубки «Айхал»

до глубины 1100 м; месторождений Накынского кимберлитового поля (трубки «Нюрбинская» и «Ботуобинская») до глубины 800 м; для трубок «Интернациональная» и «Мир» до глубины 1700 м; для трубки «Удачная» до глубины 1830 м; для трубки «Юбилейная» до глубины 1500 м (при выборе подземного способа) и 900 м (при комбинированной отработке). При переходе на указанные глубины одним из краеугольных камней обеспечения безопасного ведения работ, а именно недопущения затопления и загазирования систем подземных горных выработок, вскрывающих уклонов и т.д., является проведение гидрогеологического мониторинга и сопряженных комплексных специализированных исследований [12]. Рассмотрим основные факторы, которые повлияют на горногеологические условия отрабатываемых месторождений, сгруппировав их по кимберлитовым полям.

Дальнейшая отработка трубок Алакит-Мархинского кимберлитового поля (трубки «Айхал» и «Юбилейная») приведет к существенному увеличению притоков природных рассолов [13]. По руднику «Айхал» прогнозируется трехкратное увеличение притока (с текущих 120–150 до 430 м³/сут), которое произойдет после вскрытия коллекторов верхнекембрийского водоносного комплекса [14]. Аналогичная проблема существует и для трубки «Юбилейная», приток природных рассолов в процессе отработки месторождения вырастет с текущих 10–20 м³/сут до 1000 м³/сут.

Продолжение добычных работ на главном месторождении Далдынского кимберлитового поля — трубке «Удачная» также сопряжено с существенным ростом притоков природных рассолов. К середине 50-х годов XXI в. прогнозируется рост с текущих 300–350 м³/ч до 2000 м³/ч. Необходимо отметить, что поступающие рассолы имеют высокую

газовую насыщенность (не менее $1 \text{ м}^3/\text{м}^3$), что, в свою очередь, требует проведения дополнительной опережающей дегазации.

Дальнейшая отработка трубки «Интернациональная» неразрывно связана с вскрытием коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса и с увеличением притока природных рассолов к 2027 г. с текущих 1015 до $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Возобновление добычных работ на месторождении трубки «Мир» потребует проведения опережающего водопонижения и дегазации в интервалах метегеро-ичерского и толбачанского водоносных комплексов [15]. Прогнозный приток природных ненасыщенных хлоридно-натриевых рассолов из метегеро-ичерского водоносного комплекса составит не менее $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$. К указанному притоку прибавятся насыщенные (до 520 г/л) хлоридно-кальциевые рассолы из коллекторов олекминской, толбачанской и эльгянской свит нижнего кембрия, с суммарным прогнозируемым притоком до $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Дополнительным осложняющим фактором выступит наличие в толбачанской свите неструктурных микрозалежей и скоплений углеводородных газов.

Отработка Накынского поля также будет связана с увеличением притока. Суммарный приток к середине 2030-х гг. увеличится в 2,5 раза, с текущих 100–110 до $250 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Заключение

Исходя из представленной информации, можно сделать вывод не только о существенном усложнении горно-геологических условий с глубиной, но и о необходимости дальнейшего развития применяемых в настоящее время методов исследований и мониторинга [16]. Ключевыми проблемами, требующими своевременного внимания и изучения, являются:

- изучение гидрогеологических и гидродинамических условий кимберлитовых полей, а также ключевых месторождений, в интервалах, не изученных ранее, так как развитие горных работ определяет необходимость увеличения глубины гидрогеологической стратификации разрезов, выделения интервалов коллекторов, изучения их флюидной насыщенности и др. [17];

- строительство таких сложных инженерных сооружений, как алмазные рудники и сопряженные инфраструктурные объекты, на глубинах более 1000 м от дневной поверхности, в уникальных горно-геологических условиях требует существенной детализации гидрогеологических условий в интервалах изучения. Составление соответствующих прогнозных карт притоков необходимо не только для обеспечения безопасной отработки всего месторождения, но и для рационального размещения насосных станций, слепых скиповых стволов и др. Недостаточно детальное изучение гидрогеологических условий и особенностей динамики изменений гидродинамического режима, применительно к конкретным кимберлитовым трубкам и шахтным полям, чревато возникновением аварийных ситуаций и инцидентов, сопровождающихся не только существенными экономическими издержками, но и угрозами для безопасности сотрудников;

- отработка месторождений требует проведения опережающего водопонижения, что в свою очередь приводит к формированию дополнительной техногенной нагрузки на геологическую среду в пределах изучаемой территории, а сопутствующая закачка дренажных рассолов в недра, реализованная на горных предприятиях, формирует предпосылки для создания сложных природно-техногенных систем, требующих не только текущего изучения, но и последующего

прогнозирования, так как по своей сути они являются новыми объектами, не имеющими полных аналогов, по ряду ключевых показателей: наличие криогенной толщи, литолого-фациальные и структурно-тектонические условия, а также химического состава вод, находящихся в обращении;

- повсеместное присутствие природных рассолов не только влияет на проектируемые системы водозащиты рудников Западной Якутии, но также ставит вопросы о перспективах их использования в качестве гидроминерального сырья по ряду ценных компонентов.

Для решения обозначенного комплекса проблем в 2023 г. в институте «Якутнипроалмаз» был создан комплексный отдел горно-геологических проблем разработки месторождений. Создание такого камерально-аналитического центра позволит разработать концепции, технические решения и методики сопровождения добычи на следующих периодах:

- на уникальных по качеству алмазов и крайне сложных, с точки зрения горно-геологических и гидрогеологических условий, месторождениях Мало-Ботубинского алмазоносного района: трубок «Интернациональная» и «Мир»;
- на месторождениях высокой и средней сложности Далдыно-Алаakitского алмазоносного района: трубок «Айхал», «Заря», «Удачная», «Юбилейная»;
- на месторождениях низкой и средней сложности Верхне-Мунского и Средне-Мархинского кимберлитовых полей.

На указанных месторождениях требуется разработка и последующая реализация технических решений, включающих качественное и своевременное осушение добычных блоков от природных рассолов и последующую экологически безопасную утилизацию, а также дегазацию вмещающих пород и проти-

водействие ГДЯ. Дополнительными инструментами для увеличения прогнозного потенциала выполняемых работ являются методы гидродинамического и газодинамического моделирования при помощи как уже разработанных программных продуктов, так и их аналогов.

Отдельного упоминания требуют два ключевых направления, нуждающиеся в дальнейшем развитии — это структурная гидрогеология и «четвертичная гидрогеология». Важность данных направлений обусловлена реализованной системой закачки дренажных вод, когда в качестве рассолопоглощающих структур используются коллекторы толщи многолетнемерзлых пород и региональных подмерзлотных коллекторов.

В первом случае неотектонические движения в послеледниковое время значительно повлияли и изменили гидродинамическую и гидрохимическую обстановку и криогидрогеологические условия в пределах кимберлитовых полей. Изучение предыдущих межледниковых периодов позволят лучше понимать природу и механизмы взаимодействия с толщей многолетнемерзлых пород (ММП), и как следствие, особенности формирования в процессе закачки внутримерзлотных техногенных водоносных горизонтов; а также даст более подробную информацию о надмерзлотных водоносных горизонтах, образующихся в результате процессов гидрогенного растепления и сопряженного локального изменения геокриологических обстановок, происходящих под влиянием построенных как на малых, так и на крупных реках водохранилищ.

Во втором случае использование зон динамического воздействия региональных разломов требует дополнительного изучения криогидрогеологических условий и динамики их изменения под влиянием процесса закачки. Требуется картирование и подробное изучение раз-

рывных нарушений, очевидно оказывающих влияние на фильтрационные свойства пород в плане и разрезе [18–20].

Таким образом, гидрогеологическое сопровождение добычных работ является сложной и очень важной задачей, главной целью которой является обоснование и проведение технически безопасной и экономически рациональной эксплуатации месторождений.

На основании изложенного считаем, что:

1. сложившаяся в настоящее время структура гидрогеологической службы в целом соответствует стоящим задачам и целям;

2. используемые в настоящее время методики, технологии и способы ведения

мониторинга позволяют обеспечивать необходимый контроль и кратковременное прогнозирование на горизонте планирования до 2–3 лет;

3. прогнозируемые изменения криогидрогеологических условий, которые будут происходить в процессе ведения горных и добычных работ на месторождениях, потребуют некоторой корректировки применяемых методов и технологий, особенно в части их интенсификации и детализации, а также более активного применения «цифровых двойников» изучаемых объектов, способствующих существенному улучшению прогнозного потенциала на более длительных временных отрезках (5 лет и более).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов Ю. Г. Месторождения алмазов в Якутии // Алмазы. Алмазодобывающая промышленность: Сборник научно-технической информации. Вып. 2. — 2012. — С. 5–7.
2. Атрощенко Ф. Г., Филин Р. А. Гидрогеологические проблемы на месторождениях алмазов Якутии // Записки Горного института. — 2003. — Т. 153. — С. 123–125.
3. Янников А. М., Корепанов А. Ю., Зырянов И. В. Проблемы и перспективы развития гидрогеологической службы АК «АЛРОСА» // Горный журнал. — 2021. — № 5. — С. 30–34. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.01.
4. Гасанов Ш. Ш. Криолитологический анализ. — М.: Наука, 1981. — 195 с.
5. Методика гидрогеологических исследований криолитозоны / Отв. ред. В. В. Шепелев. — Новосибирск: Наука, 1983. — 107 с.
6. 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. 6. — № 2. — С. 61–65.
7. 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.
8. Chen M., Izady A., Abdalla O. A. An efficient surrogate – based simulation – optimization method for calibrating a regional MODFLOW model // Journal of Hydrology. 2017, vol. 544, pp. 591–603. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.011.
9. Hughes J. D., Russcher M. J., Langevin C. D., Morway E. D., McDonald R. R. The MODFLOW application programming interface for simulation control and software interoperability // Environmental Modelling & Software. 2022, vol. 148, article 105257. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105257.
10. Kelson V. Predicting collector well yields with MODFLOW // Ground Water. 2012, vol. 50, no. 6, pp. 918–926. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x.
11. Frederiksen R. R., Molina-Navarro E. The importance of subsurface drainage on model performance and water balance in an agricultural catchment using SWAT and SWAT-MODFLOW // Agricultural Water Management. 2021, vol. 255, article 107058. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107058.
12. Зуев В. М., Сафонов Л. А., Солопанов А. Т. Создание экологически безопасной системы защиты горных работ от подземных вод // Разведка и охрана недр. — 1990. — № 12. — С. 39–42.
13. Янников А. М., Лепокурова О. Е., Трифонов Н. С. Влияние разрывных нарушений на обводнение и газоносность глубоких горизонтов трубки «Айхал» (Республика Саха (Якутия)) //

Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. — 2021. — № 1. — С. 104–113. DOI: 10.17308/geology.2021.1/3342.

14. Дроздов А. В., Иост Н. А., Лобанов В. В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. — Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. — 507 с.

15. Янникова С. А., Янников А. М. Газодинамическая характеристика вмещающих пород глубоких горизонтов шахтного поля трубки «Мир» // Науки о Земле и недропользование. — 2021. — Т. 44. — № 3(76). — С. 293–300. DOI: 10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300.

16. Ланшаков В. Г., Дружинин И. А., Тимушева Л. В. Обзор проблем в области гидрогеологии и пути их решения / Сборник научных трудов II Научно-практической конференции по вопросам гидрогеологии и водообеспечения. — Ижевск: Типография «МарШак», 2020. — С. 45–52.

17. Thomann A., Werner A. D., Irvine D. J., Currell M. J. Adaptive management in groundwater planning and development: A review of theory and applications // Journal of Hydrology. 2020, vol. 586, article 124871. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124871.

18. Keegan-Treloar R., Irvine D. J., Solórzano-Rivas S. C., Werner A. D., Banks E. W., Currell M. J. Fault-controlled springs: A review // Earth-Science Reviews. 2022, vol. 230, article 104058. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.104058.

19. 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.

20. Бабенко А. Г., Лапин С. Э. Системы комплексной безопасности горного производства // Технадзор. — 2008. — № 12. — С. 26–27. **ПДАБ**

REFERENCES

1. Danilov Yu. G. Diamond deposits in Yakutia. Almazy. *Almazodobyvayushchaya promyshlennost': Sbornik nauchno-tekhnicheskoy informatsii*. Vyp. 2 [Diamonds. Diamond mining industry: collection of scientific and technical information, no. 2], 2012, pp. 5–7. [In Russ].

2. Atroshchenko F. G., Filin R. A. Hydrogeological problems at diamond deposits in Yakutia. *Journal of Mining Institute*. 2003, vol. 153, pp. 123–125. [In Russ].

3. Yannikov A. M., Korepanov A. Yu., Zyryanov I. V. Problems and prospects for the development of the hydrogeological service of AK «ALROSA». *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 5, pp. 30–34. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.01.

4. Gasanov Sh. Sh. *Kriolitologicheskii analiz* [Cryolithological analysis], Moscow, Nauka, 1981, 195 p.

5. *Metodika gidrogeologicheskikh issledovaniy kriolitozony*. Otv. red. V. V. Shepelev [Methodology of hydrogeological studies of permafrost, Shepelev V. V. (ed.)], Novosibirsk, Nauka, 1983, 107 p.

6. Alekseev S. V., Drozdov A. V., Drozdova T. I., Alekseeva L. P. The first experience of burying salty drainage waters of the Udachnaya pipe quarry in permafrost. *Earth cryosphere*. 2002, vol. 6, no. 2, pp. 61–65. [In Russ].

7. 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.

8. Chen M., Izady A., Abdalla O. A. An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model. *Journal of Hydrology*. 2017, vol. 544, pp. 591–603. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.011.

9. Hughes J. D., Russcher M. J., Langevin C. D., Morway E. D., McDonald R. R. The MODFLOW application programming interface for simulation control and software interoperability. *Environmental Modelling & Software*. 2022, vol. 148, article 105257. DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105257.

10. Kelson V. Predicting collector well yields with MODFLOW. *Ground Water*. 2012, vol. 50, no. 6, pp. 918–926. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x.

11. Frederiksen R. R., Molina-Navarro E. The importance of subsurface drainage on model performance and water balance in an agricultural catchment using SWAT and SWAT-MODFLOW. *Agricultural Water Management*. 2021, vol. 255, article 107058. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107058.

12. Zuev V. M., Safonov L. A., Soloponov A. T. Creation of an environmentally safe system for protecting mining operations from groundwater. *Prospect and protection of mineral resources*. 1990, no. 12, pp. 39–42. [In Russ].

13. Yannikov A. M., Trifonov N. S., Lepokurova O. E. The impact of faults on the water inflow and gas content of the deep levels of the Aikhal pipe (Republic of Sakha (Yakutia)). *Proceedings of*

Voronezh state university. Series: Geology. 2021, no. 1, pp. 104–113. [In Russ]. DOI: 10.17308/geology.2021.1/3342.

14. Drozdov A. V., Iost N. A., Lobanov V. V. *Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdeniy Zapadnoy Yakutii* [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia], Irkutsk, Izd-vo IGTU, 2008, 507 p.

15. Yannikov A. M., Yannikova S. A., Kharchenko A. V. Influence of rupture disturbances on the advanced degassing system of the projected mine «Mir». *Earth science and subsoil use*. 2021, vol. 44, no. 3(76), pp. 293–300. [In Russ]. DOI: 10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300.

16. Lonshakov V. G., Druzhinin I. A., Timusheva L. V. Overview of hydrogeological challenges and ways of their solution. *Sbornik nauchnykh trudov II Nauchno-prakticheskoy konferentsii po voprosam gidrogeologii i vodoobespecheniya* [Collection of scientific papers of the 2nd Scientific and Practical Conference on Hydrogeology and Water Supply], Izhevsk, Tipografiya «MarSHak», 2020, pp. 45–52. [In Russ].

17. Thomann A., Werner A. D., Irvine D. J., Currell M. J. Adaptive management in groundwater planning and development: A review of theory and applications. *Journal of Hydrology*. 2020, vol. 586, article 124871. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124871.

18. Keegan-Treloar R., Irvine D. J., Solórzano-Rivas S. C., Werner A. D., Banks E. W., Currell M. J. Fault-controlled springs: A review. *Earth-Science Reviews*. 2022, vol. 230, article 104058. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.104058.

19. 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].

20. Babenko A. G., Lapin S. E. Integrated safety systems for mining production. *Tekhnadzor*. 2008, no. 12, pp. 26–27. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Янников Алексей Михайлович¹ — канд. геол.-минерал. наук, заместитель директора по научной работе, e-mail: YannikovAM@alrosa.ru, ORCID ID: 0000-0002-2169-123X,

Зырянов Игорь Владимирович — д-р техн. наук, зав. кафедрой, Политехнический институт — филиал в Мирном Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова,

e-mail: iv.zyrianov@s-vfu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4346-6671,

Корепанов Алексей Юрьевич¹ — начальник комплексного отдела горно-геологических проблем разработки месторождений, 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.), Deputy Director for Research, e-mail: YannikovAM@alrosa.ru, ORCID ID: 0000-0002-2169-123X,

I.V. Zyryanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Chair, Mirny Polytechnic Institute, Branch of the Ammosov North-Eastern Federal University, Mirny, Russia,

e-mail: iv.zyrianov@s-vfu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4346-6671,

A.Yu. Korepanov¹, Head of Department, e-mail: KorepanovAYu@alrosa.ru,

¹ «Yakutnioproalmaz» Institute, PJSC «ALROSA», Mirny, Russia.

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

Получена редакцией 18.11.2023; получена после рецензии 25.12.2023; принята к печати 10.06.2024.

Received by the editors 18.11.2023; received after the review 25.12.2023; accepted for printing 10.06.2024.