

---

---

**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ  
И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

---

---

УДК 622.583.2

**ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ ОБРАТНОЙ ЗАКАЧКИ  
ДРЕНАЖНЫХ ВОД КАРЬЕРА И РУДНИКА МИР**

© 2015 г. А. В. Дроздов\*, Г. Н. Гензель\*\*

*\*Институт “Якутнипроалмаз” АК “АЛРОСА”, ул. Ленина, д. 39, г. Мирный, 678170 Россия.  
E-mail: DrozdovAV@alrosa.ru*

*\*\*ООО НТЦ “НОВОТЭК”, просп. Б. Хмельницкого, д. 131, г. Белгород, 308002 Россия.  
E-mail: Sekretar@novotek15.ru*

Поступила в редакцию 10.07.2014 г.

После исправления 12.11.2014 г.

Рассмотрены криогидрогеологические условия трубки Мир и участка закачки дренажных рассолов, а также особенности защиты подземных горных работ от обводнения. Выполнен прогноз эксплуатации системы обратной закачки стоков карьера и рудника с использованием численного моделирования для обеспечения дальнейшей отработки месторождения на краткосрочную и среднесрочную перспективы без значительного ущерба окружающей среде.

**Ключевые слова:** алмазное месторождение, дренажные рассолы, подмерзлотный водоносный комплекс, обратная закачка, гидродинамическая модель.

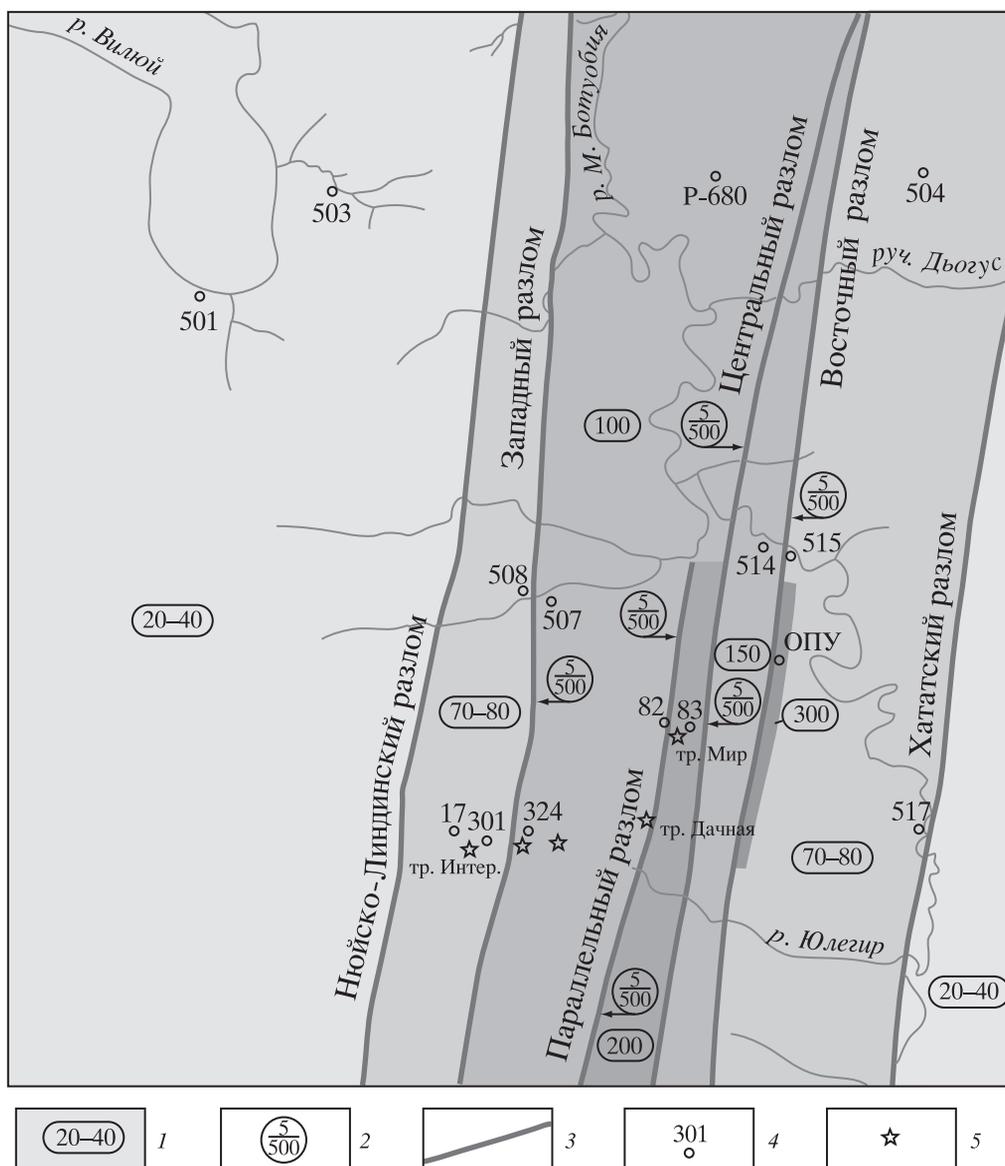
### ВВЕДЕНИЕ

Добыча алмазов на глубоких горизонтах коренных месторождений Якутии производится АК “АЛРОСА” в сложных горно-геологических условиях при поступлении в открытые и подземные горные выработки взрывоопасных газов, нефти и высокоминерализованных подземных вод. Криогидрогеологические условия алмазоносных районов имеют ряд существенных отличительных черт, связанных с водообильностью и строением водовмещающих пород, составом и свойствами подземных флюидов, которые определяют затраты на утилизацию промстоков и в целом на эффективность освоения месторождений [12]. Общая особенность глубоких горизонтов кимберлитовых трубок – их обводненность хлоридными натриевыми и кальциевыми рассолами, прямой сброс которых в водотоки или водоемы негативно сказывается на экологической ситуации региона.

По интенсивности притоков подземных вод и объемам закачки минерализованных стоков коренные алмазные месторождения Якутии можно разделить на 2 группы: со значительными водопритоками – 300–1200 м<sup>3</sup>/ч (трубки Мир, Интернациональная, Удачная) и низкими – 10–30 м<sup>3</sup>/ч (трубки Айхал, Юбилейная, Нюрбинская и др.). Основные месторождения с высокими притоками

дренажных вод (трубки Мир и Интернациональная) расположены на юге Западной Якутии в Мало-Ботуобинском алмазоносном районе, где развит региональный надсолевой метегеро-ичерский водоносный комплекс (МИВК), высокие емкостные и гидродинамические параметры которого связаны с зонами региональных разломов (рис. 1). На горных предприятиях, осваивающих эти алмазоносные трубки, опробованы разные технологии по ограничению водопритоков, что позволило осуществлять открытые горные работы в относительно благоприятных условиях. Месторождения с низкими притоками дренажных вод находятся на севере Якутии в Далдыно-Алаakitском, Среднемархинском и Верхнемунском алмазоносных районах. Разработка кимберлитовых трубок на этих территориях осуществляется в основном открытым способом с осушением горных выработок за счет внутрикарьерного водоотлива.

В настоящее время основная часть поступающих дренажных рассолов на горнодобывающие предприятия (ГОКи) удаляется обратно в подземные недра криолитосферы двумя способами: захоронение в толщи многолетнемерзлых пород (ММП) [9, 10] и закачка в водоносные горизонты, последний наиболее широко распространен в стране и мире [4–8]. Для каждого ГОКа



**Рис. 1.** Гидрогеологическая схематизация подмерзлотного метегеро-ичерского водоносного комплекса в Мало-Ботубинском районе. 1 – блоки пород в пределах водоносного комплекса, обладающие близкими по значениям фильтрационными свойствами, цифры – коэффициенты водопроницаемости, м<sup>2</sup>/сут; 2 – фильтрационные показатели центральной части разломных зон: в числителе – коэффициент водопроницаемости, м<sup>2</sup>/сут, в знаменателе – мощность зоны, м; 3 – субмеридиональные разломные зоны; 4 – скважина; 5 – кимберлитовая трубка.

АК “АЛРОСА” разработан определенный метод ликвидации сточных минерализованных вод с учетом конкретных криогидрогеологических условий. На месторождениях трубок Мир, Интернациональная применяется обратная закачка дренажных вод в благоприятные гидрогеологические структуры подмерзлотного МИВК, приуроченные к зонам тектонических дислокаций [1–3, 11].

Вопрос удаления дренажных вод карьера Мир рассматривался еще в 70-х годах прошлого столетия на межведомственном уровне союзных ми-

нистерств. Профессором В.А. Бабушкиным была предложена идея обратной закачки природных рассолов в благоприятные гидрогеологические структуры подмерзлотного водоносного горизонта. Начались изыскания на прилегающей к месторождению территории с проведением необходимых исследований по схематизации гидродинамических условий, изучением физико-химических и газовых показателей. Оценивалась совместимость дренажных стоков и природных рассолов в разных гидрохимических и геотермических условиях. Для решения этих вопросов

были привлечены ведущие ученые “ВСЕГИН-ГЕО” и других научных учреждений.

В настоящее время защита подземных горных выработок рудника Мир от дренажных вод выполняется в рамках реализованной системы “сухой” консервации карьера с использованием заглубленного карьерного водоотлива [12]. Фактические среднегодовые водопритоки в карьер Мир с 2005 г. (начало работы системы “сухой” консервации) по настоящее время изменялись от 1150 до 1360 м<sup>3</sup>/ч. Дренажные воды из карьера перекачиваются в накопитель, находящийся в верховье руч. Тымтайдаах. Из накопителя рассолы через поглощающие скважины системы обратной закачки (СОЗ) удаляются в МИВК с расходом, равным сумме дебита откачки дренажных рассолов из карьера, объемов атмосферных осадков и вод оттайки, аккумулируемых в накопителе. Среднегодовые объемы закачки стоков варьируют от 1230 до 1510 м<sup>3</sup>/ч.

Таким образом, на протяжении ряда лет наблюдается дисбаланс между объемами воды в накопителе, соотношением объемов откачиваемых дренажных рассолов и объемами обратной закачки, т.е. ежегодно сбрасывается на 5–15% больше стоков, чем откачивается на месторождении, что приводит к дополнительному повышению уровней подземных вод в МИВК. Поэтому предложены и оценены разные варианты улучшения гидрогеологической ситуации на участке СОЗ. Для управляемого водопонижения и развития системы СОЗ дренажных рассолов откорректирована ранее разработанная постоянно действующая гидродинамическая модель, учитывающая все технологические элементы системы дренажа и обратной закачки дренажных рассолов рудника и карьера Мир, и выполнен прогноз с целью обеспечения экологически безопасной отработки месторождения на краткосрочную и среднесрочную перспективы.

В целом к решению вопроса защиты крупнейшего алмазного месторождения Мир от агрессивных рассолов и их дальнейшей утилизации в водоносный комплекс привлекались различные научные и производственные организации: ПГО “Якутскгеология”, ФГУП “ВСЕГИНГЕО”, СПБГУ, ИМЗ и ИЗК СО РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, МГРИ-РГГРУ, Институт “Якутнипроалмаз” и многие другие. Следует отметить участие в решении данной проблематики ведущих ученых страны: Л.С. Язвина, В.А. Мироненко, Б.В. Боровского, В.Г. Румынина, Л.И. Сердюкова, И.С. Ломоносова, П.И. Мельникова, А.И. Кравцова, О.Н. Толстихина и многих других.

## КРИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ И УЧАСТКА ОБРАТНОЙ ЗАКАЧКИ

Коренное месторождение алмазов – трубка Мир, находится в сложных, не имеющих аналогов в мировой и отечественной практике, геолого-гидрогеологических и горнотехнических условиях. Наиболее важные осложняющие факторы при его разработке:

- наличие криолитозоны мощностью до 700 м, ярус ММП достигает 350 м;

- развитие подмерзлотного надсолевого высоконапорного МИВК, подземные воды которого представлены агрессивными хлоридными натриевыми рассолами со средней минерализацией 100–130 г/дм<sup>3</sup>;

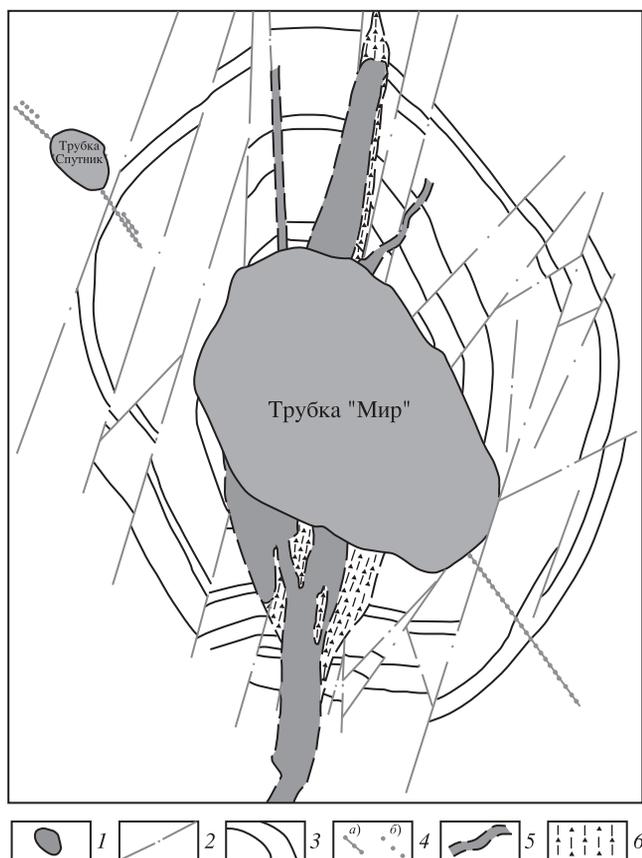
- наличие в природных рассолах газов углеводородного состава с содержанием до 0.2 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> и концентрацией сероводорода до 130 мг/дм<sup>3</sup>, а также присутствие нефтебитумопроявлений во вмещающих породах и кимберлитах;

- приуроченность кимберлитовой трубки к Параллельному разлому, входящему в Вилюйско-Мархинскую группу региональных тектонических нарушений, который является зоной повышенной трещиноватости и водопроницаемости пород (см. рис. 1);

- присутствие на глубоких горизонтах галогенных отложений значительной мощности (до 300 м), обладающих высокой растворимостью и способностью к карстообразованию;

- наличие базитовых тел на месторождении (долеритовые силлы и дайка) и трубки Спутник (рис. 2), приуроченных к разным этапам магматической активизации, которые формировали зоны значительной трещинной нарушенности пород осадочного чехла.

Последовательность образования разрывных структур для трубки Мир и связанных с ними различных нарушений в осадочном чехле при внедрении интрузивных тел хорошо отслежена в карьере [11]. Геологическая структура осадочных образований окolorудного пространства трубки определяется контрастно проявленной асимметричной антиклинальной складкой субмеридионального простирания, выраженной клиновидным грабеном с амплитудой 15–20 м в центральной части. Данные структуры занимают до 40–50% карьерного пространства. В осевой плоскости этих гетерогенных и асинхронных структур расположена мощная субвертикальная зона дробления, трасси-



**Рис. 2.** Схема структурного строения месторождения трубки Мир: 1 – кимберлитовая трубка; 2 – разрывные нарушения; 3 – положение реперных пачек пород; 4 – долеритовые дайки: а – установленные, б – предполагаемые; 5 – кимберлитовые жилы; б – зоны дробления.

рующая Параллельный разлом, заполненный долеритами до отметки +40 м. Сложно выраженная тектоническая структура при ширине около 500 м сопровождается серией разрывных нарушений сбросо-взбросового характера. Разрывные нарушения северо-западного и северо-восточного простирания имеют подчиненный характер как по количеству, так и по масштабу структуроформирующего воздействия на вмещающие породы. Общая трещиноватость околорудного пространства относительно равномерна и имеет региональный характер с установленными системами трещин: преобладающей субмеридиональной ( $5-20^\circ$ ), субширотной ( $75-85^\circ$ ) и северо-западной ( $305-315^\circ$ ).

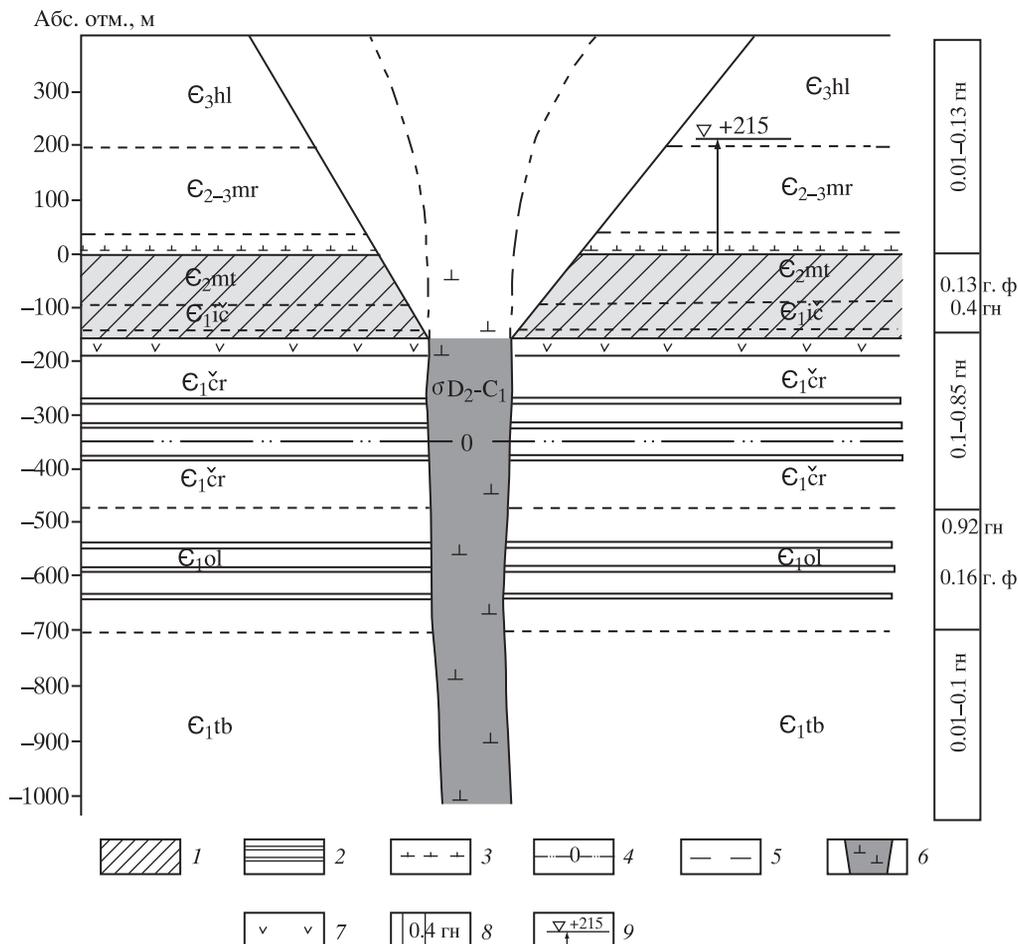
По характеру взаимоотношений различных тектонических элементов в исследованном рудном узле геологические структуры можно разделить по относительному возрастному показателю на несколько стадий развития. В целом последовательность формирования долеритовых и ким-

берлитовых тел представляется таким образом: 1 – внедрение пластообразных тел долеритов; 2 – внедрение дайки долеритов в центральную часть субмеридионального (Параллельного) глубинного разлома; 3 – инъекции кимберлитовых жил по оперяющим трещинам северо-западного простирания; 4 – одноактное образование трубки-сателлита Спутник; 5 – многоактное формирование основной трубки Мир.

По мнению некоторых исследователей, Параллельный разлом – достаточно простая тектоническая структура, прорывающая комплекс осадочных отложений без существенных преобразований. Это подтверждается строением его осевой части: мощная зона дробления постепенно сужается сверху вниз. К проявлениям разлома можно отнести трассирующие базитовые образования среднепалеозойского возраста, картируемые на поверхности в некотором удалении от месторождения. Сопровождающие разлом субпараллельные разрывы были более поздними и безамплитудными, однако они значительно обводнены на уровне подмерзлотного МИВК. Эти нарушения как раз и оказали основное влияние на водопритоки в горные выработки на месторождении.

Исследования околорудного пространства “Мир–Спутник” позволили сделать определенный вывод, что основные контрастные пликативные и дизъюнктивные деформации в районе месторождения связаны с докимберлитовым этапом формирования структурно-тектонической обстановки. Это подтверждается также изучением многочисленных обнажений в удалении (на несколько километров) от кимберлитопроявлений, пересекающих ряд разломов Вилюйско-Мархинской зоны, где наблюдаются различные локальные дислокации (в основном разрывные), связанные глубинными разломами. Начальные и основные водопритоки рассолов в карьерное пространство при отработке трубки Мир были связаны со вскрытием подмерзлотных разломных зон субмеридионального простирания.

Основная обводняющая толща трубки, существенно влияющая на отработку месторождения, – надсолевой ниже-среднекембрийский МИВК, повсеместно распространенный в районе и приуроченный к отложениям ичерской и метегерской свит (рис. 3). Его водоупорная кровля – подошва ММП, подошва – сульфатно-карбонатные породы низов ичерской свиты и долеритовый силл в кровельной части чарской свиты. Подземные воды комплекса напорные, величины напора достигают в статических условиях 220 м и более.



**Рис. 3.** Схематический криогидрогеологический разрез с элементами газонасыщенности по трубке Мир: 1 – подмерзлотный МИВК; 2 – нефтегазонасыщенные и водонасыщенные пласты-коллекторы в галогенно-карбонатных толщах слабообводненного комплекса; 3 – подошва ММП; 4 – нулевая изотерма; 5 – стратиграфические границы свит; 6 – кимберлитовая трубка; 7 – долеритовый силл; 8 – газонасыщенность пород (гн) и подземных вод (г.ф), цифры – диапазон значений,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ; 9 – естественный пьезометрический уровень подмерзлотного комплекса, стрелка – напор, цифра – абсолютная отметка, м.

В естественных гидродинамических условиях до начала осушения месторождения существовала гидрохимическая зональность в водоносной толще, согласно которой в ее кровельной части минерализация рассолов составляла 60–80, а в подошвенной – 300–320  $\text{г}/\text{дм}^3$ , т.е. соответствовала садке галита.

Надсолевая водоносная толща характеризуется существенной фильтрационной неоднородностью как в плане, так и в разрезе, которая связана с зонами региональных тектонических нарушений. Коэффициенты водопроводимости вмещающих пород изменяются от 0.04 до 188  $\text{м}^2/\text{сут}$ , с увеличением в трещинных зонах до 280–360  $\text{м}^2/\text{сут}$  (см. рис. 1). За период отработки трубки Мир пьезометрическая поверхность комплекса претерпела сложные и разнонаправленные изменения.

За первый этап осушения карьера (1977–1988 гг.) сформировалась региональная депрессионная воронка с радиусом свыше 70 км и снижением уровня в центре депрессии до 340 м. С 1988 г. после отключения системы водопонижения происходило восстановление уровня воды с заполнением выработанного карьерного пространства. С 1992 г. выполнялись работы по осушению карьера, поэтому уровень в депрессионной воронке понижался. Одновременно с января 1993 г. началась и продолжается по настоящее время эксплуатация системы сброса дренажных рассолов в скважины на узле обратной закачки.

Начальный этап испытаний на полигоне показал, что приемистость скважин не зависит от их диаметра, а напрямую связана с технологией проходки и местом расположения в разломной

зоне. Оказалось, что на фоне линейных субширотных пласт-полос с разным коэффициентом водопроницаемости выделяются приконтактные зоны с трапповыми интрузиями, обладающие повышенной проницаемостью. Дайка долеритов, заполняющая осевую часть разлома, играет роль барражной завесы.

Ниже по разрезу в отложениях эльгянской, толбачанской, олекминской и чарской свит распространены межсолевой слабоводоносный комплекс. Водонасыщенные отложения представлены трещиноватыми и кавернозными доломитами и ангидритами. Межсолевой комплекс обладает низкими коллекторскими свойствами и содержит несколько пластов-коллекторов с общей мощностью от 19 до 30 м и эффективной – от 3.0 до 5.2 м. По результатам испытаний притоки составили 0.01–0.04 м<sup>3</sup>/ч, а коэффициент водопроницаемости  $n \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/сут. Подземные воды межсолевого комплекса представлены метаморфизованными хлоридными кальциевыми рассолами с минерализацией до 515 г/дм<sup>3</sup>, которые обогащены бромом, стронцием, редкими щелочами и являются промышленными водами. Таким образом, подмерзлотная толща на месторождении представляет собой своеобразную водонапорную систему, где обособляются несколько водоносных комплексов-стратонов, которые различаются по своему литолого-фациальному составу, коллекторским свойствам и гидродинамическим параметрам водонасыщенных пород.

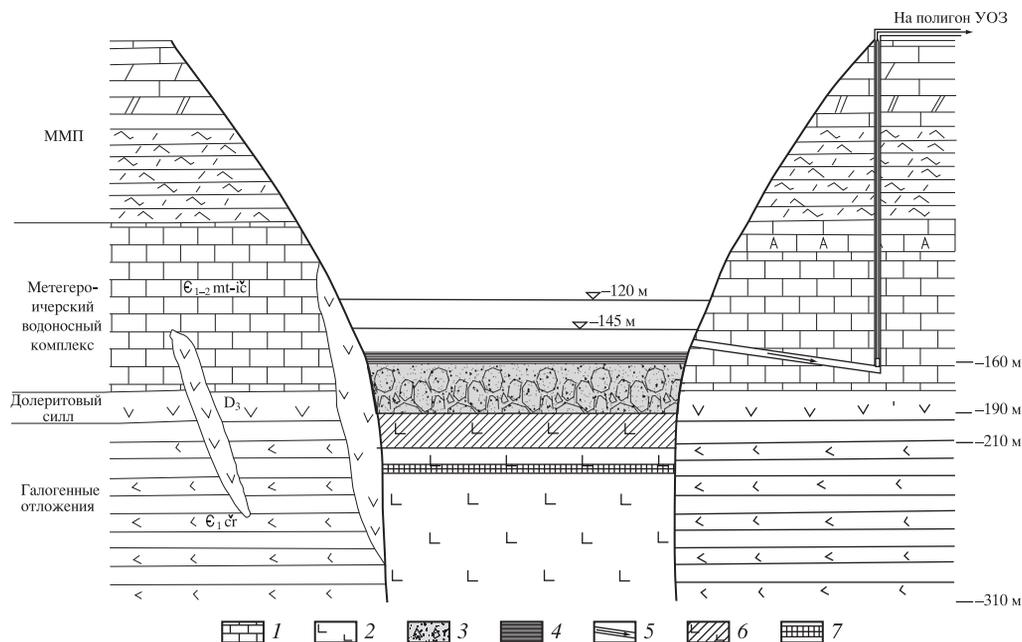
#### ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ГОРНЫХ РАБОТ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ОТ ОБВОДНЕНИЯ

При открытом способе обработки месторождения за период 1977–1988 гг. в интервале залегания МИВК применялась комбинированная система осушения, включающая в себя открытый карьерный водоотлив и опережающую систему водопонижения. Водопонижающие скважины глубиной 530 м с конечным диаметром 426 мм, оборудованные погружными насосами “Плейгер”, располагались по периметру карьера. Основные водопитоки в карьерное пространство при обработке трубки Мир были связаны со вскрытием подмерзлотных разломных зон субмеридионального простирания (см. рис. 1). Эффективность опережающего осушения карьера зависела главным образом от работы насосов в водопонижающих скважинах, расположенных на северном и южном флангах. Доля притока подземных рассолов с этих направлений достигала 85–95% от их общего объема.

На последнем этапе открытой разработки в 1992–2004 гг., когда сооружаемая противодиффузионная тампонажная завеса, под защитой которой предполагалась дальнейшая отработка месторождения, не достигла проектных показателей, водоотведение осуществлялось только за счет внутрикарьерного водоотлива. При глубине карьера 525 м в условиях полного вскрытия МИВК и весьма ограниченном забойном пространстве притоки подземных вод составляли 1100 м<sup>3</sup>/ч. Отработка запасов ниже отметки –190 абс. м предусматривается подземным способом. АК “АПРОСА” приняла решение о “сухой” консервации карьера на основе технических разработок, суть которых сводилась к засыпке дна карьера до отметки –160 абс. м трапповыми глыбами, созданию грунтово-пленочного экрана и заглубленного карьерного водоотлива на отметке –141 абс. м (рис. 4).

“Сухая” консервация карьера произведена путем формирования на его дне техногенного 3-слойного массива общей мощностью ~50 м. Нижний слой толщиной до 30 м отсыпан грубообломочными долеритами и гидродинамически характеризуется как слой с “ураганной” проницаемостью. На этот слой на суглинистой подушке уложена непроницаемая пленка толщиной 2 мм, способная выдерживать в течение длительного времени значительные растягивающие нагрузки и не терять свои свойства в рассолах с отрицательной температурой. На пленку, укрытую суглинком, отсыпаны глинистые вскрышные породы. Противодиффузионный экран над слоем “ураганной” проницаемости позволяет в существенной мере отсеять приток дренажных рассолов в карьер от попадания в долеритовую толщу. Эффективность защитной роли экрана ранее оценивалась величиной проскока в нижний слой с расходом не более 50–100 м<sup>3</sup>/ч. Такая величина проскока и наличие слоя с “ураганной” проницаемостью позволяют упростить шахтный водоотлив, решающий задачу дренажа остаточного проскока рассолов МИВК к горным выработкам.

Согласно предусмотренной технологии, поступающие на противодиффузионный экран карьера рассолы МИВК и атмосферные осадки через дренажную отсыпку на отм. –152 абс. м перетекают в водоотводящую штольню и далее поступают в специальные камеры, в которые с бермы карьера на отм. +235 абс. м были пробурены 4 водоподъемные скважины, оборудованные погружными насосами фирмы “RITZ”. Откачиваемые рассолы по системе водоводов направляются в пруд-накопитель, из которого затем подаются на узел



**Рис. 4.** Разрез месторождения трубки Мир с существующей схемой водоотведения при “сухой” консервации карьера: 1 – метегеро-ичерский водоносный комплекс; 2 – рудное тело с оставшимися запасами алмазов; 3 – долеритовая отсыпка; 4 – суглинистые грунты, на которые уложен сварной полиэтиленовый экран из пленки толщиной 2 мм; 5 – штольня для сбора воды с поверхности экрана; 6 – рудный барьер целик; 7 – подземные горные выработки.

обратной закачки, сооруженный для удаления минерализованных стоков в МИВК. Проектная производительность насосов соответствует притокам подземных рассолов и составляет  $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для обеспечения такой производительности предусмотрено иметь в наличии 5 погружных насосов (2–3 в работе, 1 в резерве и 1 в ремонте). При нормальном функционировании насосного оборудования поверхность прудка на дне карьера должна соответствовать отметке  $-140 \dots -145$  абс. м. Работы по сооружению основных элементов “сухой” консервации в карьере были завершены в 2004 г. За период с 2001 по 2012 г. из карьера откачано более 100 млн  $\text{м}^3$  подземных вод, что позволило не допустить самопроизвольного затопления выработанного карьерного пространства с образованием искусственного водного объекта глубиной более 300 м.

В 2009 г. на подземном руднике Мир были начаты нарезные работы в слое № 4 (отм.  $-235$  абс. м). На горизонте  $-210$  абс. м по короткой оси рудного тела были пройдены заезды к вентвосстающим 3 и 4, в которых были размещены реперные станции для контроля за смещениями нижней части предохранительного целика под влиянием нарезных и очистных работ, выполняющихся в слоях № 4–6. При проходке подземных выработок были подсечены зоны интенсивной трещиноватости в кимберлитовой трубке, по которым зафиксированы

водопроявления в виде рассредоточенных струйных источников. При этом интенсивность притока рассолов возростала и в 2012 г. достигла  $230 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Позднее, данные горные выработки были заложены твердеющей закладочной смесью. Во вмещающих галогенных отложениях блока № 1, в том числе и на контактах с рудным телом, стали формироваться промоины, связанные с соевым карстом.

Системой комплексного гидрогеомеханического мониторинга, рассчитанной на выявление признаков, предшествующих проявлению критических деформаций, зафиксированы непосредственно эти смещения. Массив рудного целика на момент начала наблюдений уже находился в нарушенном состоянии, в дальнейшем под влиянием горных работ значения деформаций достигли больших величин, что подтверждается смещением оси наблюдательных скважин. Рост водопритоков к горным выработкам подземного рудника обусловлен, вероятнее всего, недозакладом выработанного пространства твердеющими смесями, что привело к изменению напряженно-деформированного состояния горного массива и, как следствие, развитию в рудной потолочине зоны водопроводящих трещин. По фактическим данным о водопритоках в подземные горные выработки рассчитан средний коэффициент фильтрации предохранительного целика  $K_{ц} = 0.12 \text{ м/сут}$  (трещинная проницаемость).

Согласно проектным решениям, через рудный целик пробурено 10 дренажных скважин в доле-ритовую отсыпку на дне карьера, которые испытаны на производительность. Выпуски из скважин показали, что их производительность изменяется от 0 до 103 м<sup>3</sup>/ч. Отмечено, что после начала выпусков произошло снижение интенсивности притоков воды на горизонтах –230...–235 абс. м и общее снижение водопритоков, позволившие стабилизировать гидрогеологическую ситуацию по руднику. В настоящее время поступающие к дренажным скважинам рассолы откачиваются обратно в карьер по водосбросным скважинам. В целом величина суммарных водопритоков через противодиффузионный экран практически постоянная. На руднике Мир начаты экспериментальные работы по инъекционному тампонажу высокопроницаемых зон различными материалами, включая глиноцементные, цементные растворы, а также гели и смолы.

В настоящее время приток в карьер из МИВК составляет 1200–1250 м<sup>3</sup>/ч. Основная часть поступающих рассолов (до 85%) откачивается системой “сухой” консервации, за счет чего поддерживается постоянство уровня зеркала воды в карьере в проектных отметках –145.5...–151.0 абс. м. Оставшаяся часть рассолов с дебитом около 180 м<sup>3</sup>/ч перетекает в подплечный техногенный массив через систему трещин в предохранительном целике и попадает в подземные горные выработки на горизонтах –210...–310 абс. м. Водовыпуск из дренажных скважин оценивается величиной в 30–35 м<sup>3</sup>/ч. Снижение эффективности дренажа связано с осушением статических запасов из-под плечного пространства и преобладанием фильтрации через тело предохранительного рудного целика.

Проходка трех субпараллельных выработок на горизонте –210 абс. м вдоль длинной оси трубки с организацией системы контроля гидрогеомеханического состояния позволяет на настоящем этапе получать надежную информацию о поведении рудного целика в зависимости от состояния горно-подготовительных и добычных работ в 1-м блоке. Создана стационарная сеть наблюдений за развитием гидрогеологической и геомеханической ситуации непосредственно в зоне, примыкающей к рудному целику. Пройденные выработки со слабонаклонными скважинами выполняют роль водосборников, перехватывающих проток дренажных рассолов МИВК через рудный целик. Это мероприятие позволяет снизить негативное влияние водопритоков на горно-подготовительные и добычные работы на нижележащих горизонтах.

## ТЕХНОЛОГИЯ УДАЛЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД НА УЧАСТКЕ ОБРАТНОЙ ЗАКАЧКИ

На месторождении трубки Мир с 1991 г. применяется технология обратной закачки дренажных вод в осушаемый МИВК [3]. Постоянная схема удаления рассолов на полигоне СОЗ включает 2–3 насосные станции, оборудованные насосами с производительностью 800 м<sup>3</sup>/ч и напором 0.7 МПа для перекачки воды из накопителя, а также ряд нагнетательных и наблюдательных скважин. Существующая технология закачки позволяет производить сброс до 1550 м<sup>3</sup>/ч дренажных вод в скважины, при этом общие объемы закачки за весь период превысили 240 млн м<sup>3</sup> (рис. 5). Закачные скважины эксплуатируются от безнапорного до напорного (с давлением на устье до 0.45 МПа) режимов. Их приемистость изменяется в широких пределах: от 50–150 до 900–1200 м<sup>3</sup>/ч. При ухудшении водоприемной способности нагнетательных скважин выполняется их регенерация (гидроразрыв пласта, солянокислотная обработка и т.п.).

Пьезометрические уровни МИВК за период отработки месторождения претерпевали существенные изменения. В последние годы сформировалась сложная уровенная поверхность с четко выраженным репрессивным куполом от обратной закачки дренажных вод на полигоне и депрессионной воронкой от водопонижения в карьере трубки Мир (рис. 6). Превышение уровней в центральной части участка закачки над забоем карьера составляет 450–480 м при расстоянии 8.8 км между этими объектами. По удаленным скважинам режимной сети отмечается постоянное повышение уровня рассолов, связанное с региональным восстановлением гидродинамического режима после прекращения работы системы осушения. В результате откачки дренажных вод из карьера и закачки стоков на полигоне СОЗ произошло непропорциональное увеличение перепадов напоров вблизи карьерного поля. Кроме того, на динамику уровня влияет баланс объемов откачки и обратной закачки рассолов и расстояние от точки наблюдения до центра возмущения (СОЗ, карьер).

В разрабатываемых проектах защиты горных предприятий АК “АЛРОСА” от дренажных рассолов и при переходе на подземную отработку месторождений важным экологическим ограничителем закладывается производительность дренажных систем, которая в существенной мере зависит от принимаемой схемы ведения добычных работ. Поэтому для прогноза водопритоков в гор-

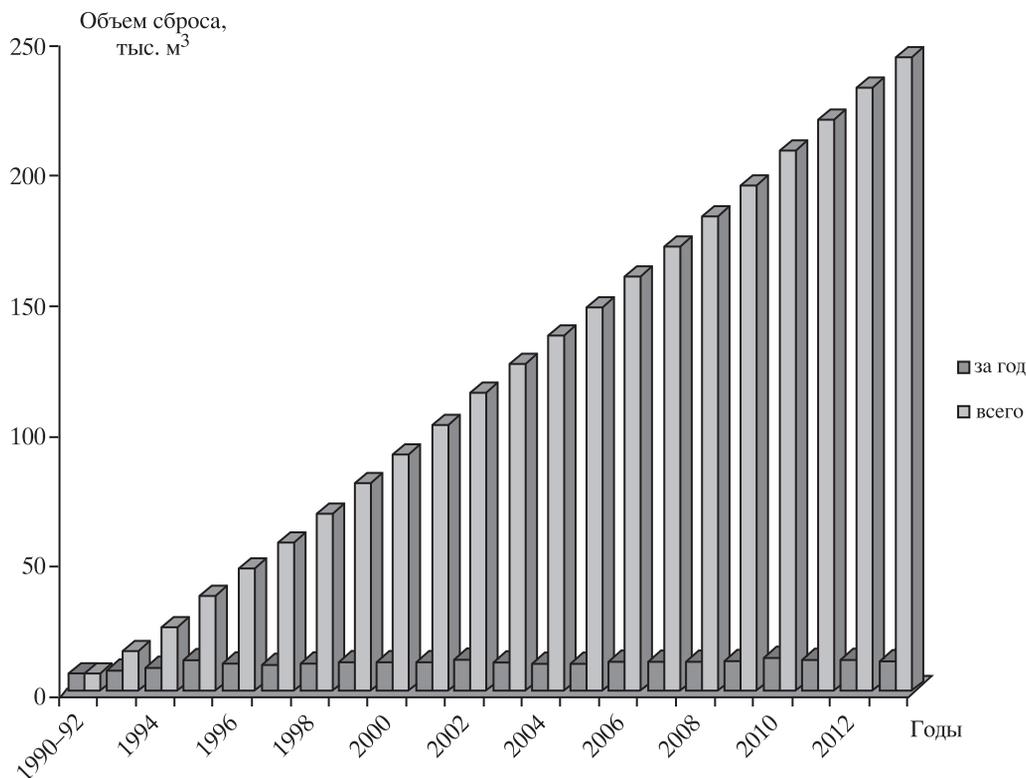


Рис. 5. Объемы обратной закачки дренажных рассолов на СОЗ карьера “Мир”

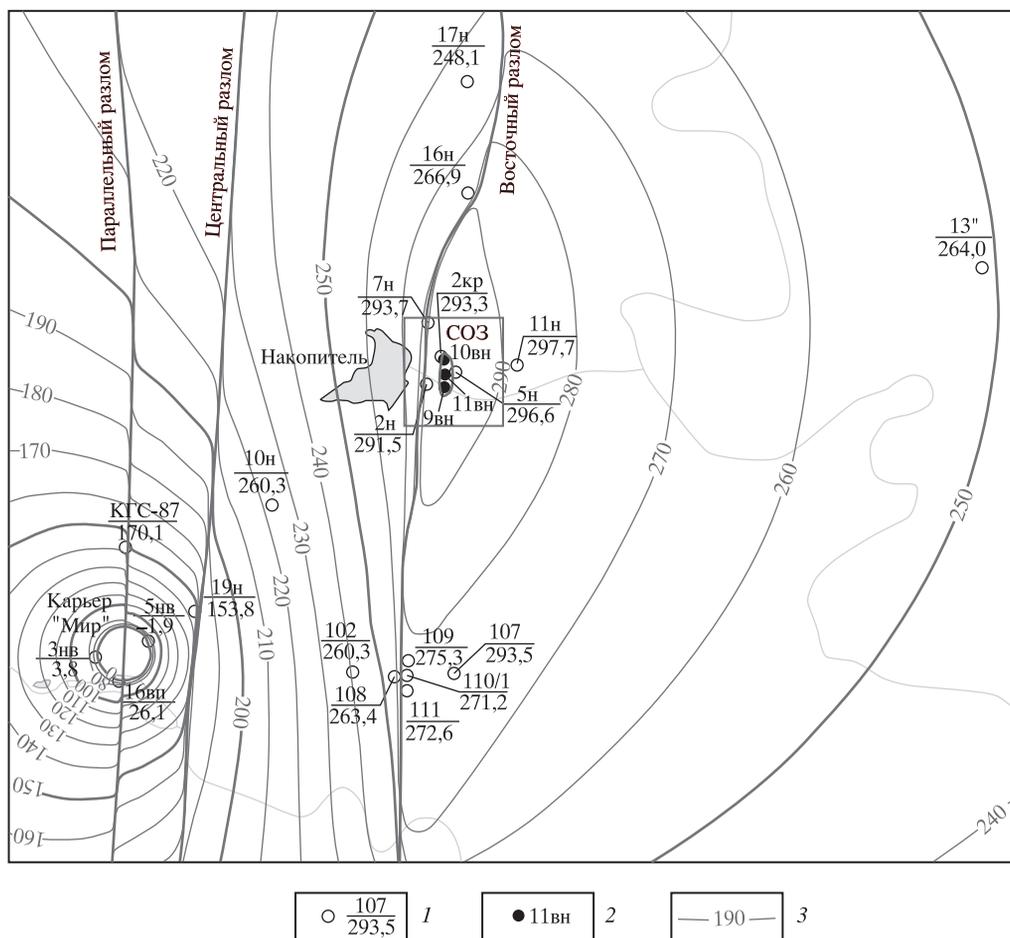
ные выработки и захоронения (обратной закачки) дренажных рассолов отстраиваются гидродинамические модели и проводятся многовариантные эксперименты с использованием численного моделирования. Выполненные прогнозные расчеты, в частности по программе “MODFLOW”, показывают, что сброс стоков карьеров и рудников на участках закачки возможен, однако его реализация, к примеру, на трубках Мир и Интернациональная, увеличит водопритоки к дренажной системе за счет возврата закачиваемых вод к подземным выработкам на 10–30%.

#### ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ НА УЧАСТКЕ ЗАКАЧКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование [13] для прогноза системы “откачка–обратная закачка”, в том числе с анализом роли противодиффузионной завесы, выполнялось неоднократно различными организациями (Институт “Якутнпроалмаз”, СПБГУ, НТЦ “НОВОТЭК”, ЗАО “ГИДЭК” и др.) [14]. В этих работах оценивались разные варианты удаления дренажных рассолов в под-

мерзлотный водоносный комплекс. Еще ранее специалистами ЗАО “ГИДЭК” рассматривался и предлагался вариант сброса части сточных вод на участке лога “Горелый”. Однако гидродинамическая ситуация на тот период была вполне благоприятной и позволяла использовать только эксплуатируемый участок СОЗ. Через десятилетний период гидродинамическая картина изменилась, что потребовало рассмотрения разных вариантов закачки с использованием численного моделирования.

На начальном этапе прогнозных расчетов проводилась корректировка разработанной ранее гидродинамической модели на основе опыта эксплуатации системы “сухой” консервации карьера и обратной закачки дренажных рассолов. Водоносная толща пород вблизи карьера Мир реализована в расчетной модели как многослойная, состоящая из 4-х слоев и одного слоя на остальной территории, отличающихся фильтрационными параметрами. Решение фильтрационных задач на модели осуществлялось в нестационарном гидродинамическом режиме, исходя из поставленных задач и наличия мощных возмущающих факторов (осушение месторождения и обратной закачки рассолов).



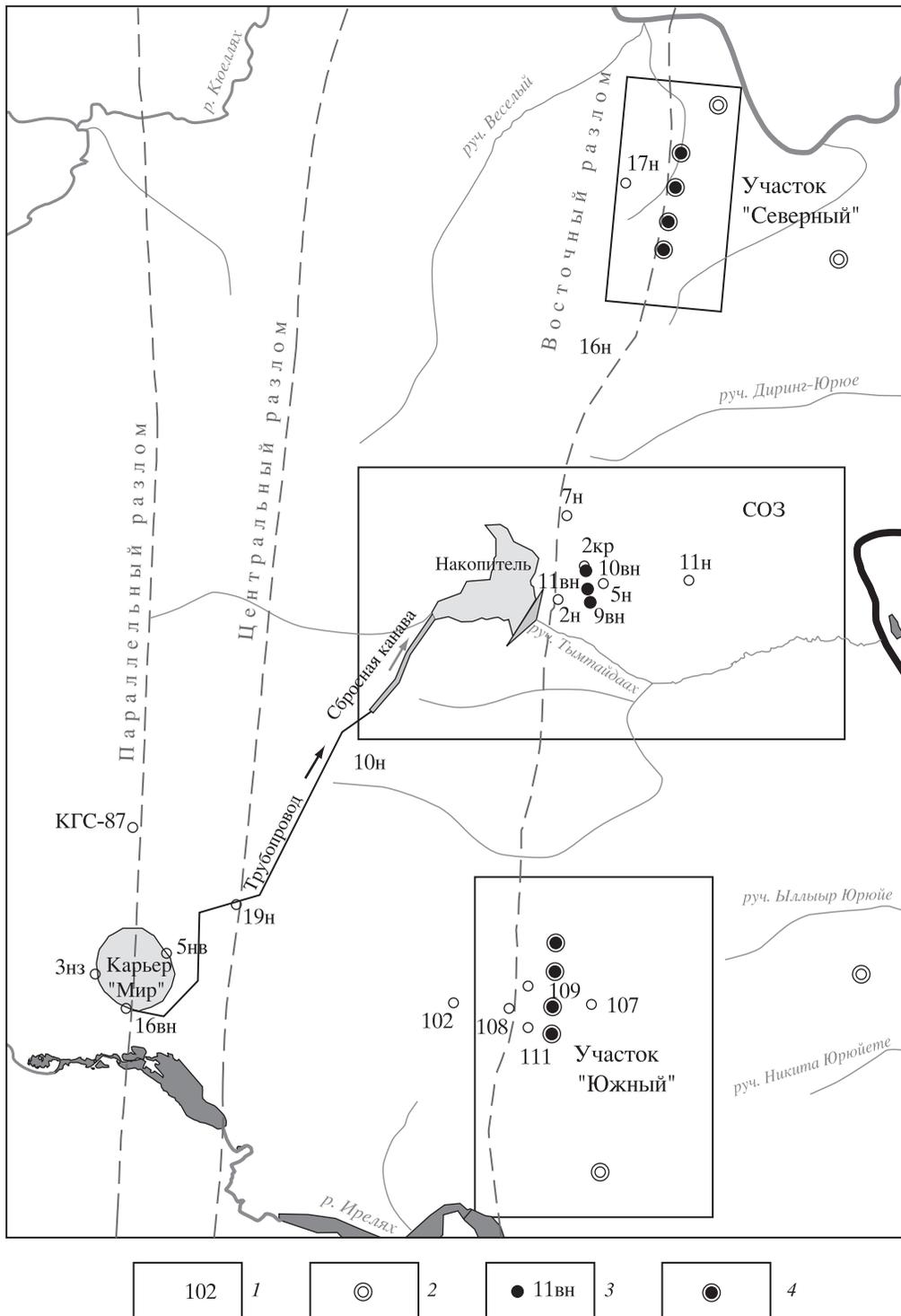
**Рис. 6.** Положение уровня подземных вод МИВК по результатам решения обратной задачи: 1 – наблюдательная скважина: в числителе – номер, в знаменателе – отметка уровня воды, абс. м; 2 – закачная скважина; 3 – пьезоизогипса, цифра – абс. м.

Напорный характер регионального фильтрационного потока и необходимость решения задач осушения в пределах рудного тела определили напорно-безнапорный режим фильтрации подземных вод. Размеры области исследований в плане выбраны таким образом, чтобы ее внешние границы оказывали минимальное влияние на гидродинамические процессы, протекающие в районе трубок Мир и Интернациональная, а также на участке обратной закачки дренажных рассолов (СОЗ) за Восточным разломом и узлах закачки (УОЗ, УЗВ) промстоков рудника Интернациональный за Западным разломом.

Площадь района исследований составила 2200 (50 × 44) км<sup>2</sup>, включающая представительную часть области МИВК с участками обратной закачки промстоков, отработанное пространство карьеров, системы дренажа и водоотведения. В плане водоносная толща из-за изменчивости фильтрационных свойств пород принята как

кусочно-однородная. В разрезе МИВК схематизирован как единый водоносный пласт с осредненным коэффициентом фильтрации. Разработка фильтрационной модели и последующие расчеты проводились с использованием программы MODFLOW [14].

На первом этапе моделирования выполнялась калибровка модели методом решения обратной задачи, т.е. идентификации, основная цель которой – достижение максимально возможного соответствия построенной фильтрационной модели исследуемому гидрогеологическому объекту (рис. 6). Установление соответствия гидрогеологических процессов, протекающих на изучаемой территории, их модельным реализациям проводилось на основе фактических данных о режиме подземных вод района за 2011–2013 гг., связанном с осушением карьера Мир, эксплуатацией системы “сухой” консервации карьера и обратной закачкой дренажных рассолов на СОЗ.



**Рис. 7.** Схема развития системы обратной закачки дренажных вод карьера и рудника Мир: 1 – существующая наблюдательная скважина; 2 – проектная наблюдательная скважина; 3 – эксплуатируемая закачная скважина; 4 – проектная закачная скважина.

Результаты калибровки модели фильтрации подземных вод при решении обратной задачи указали на допустимую сходимост фактического положения уровней подземных вод МИВК с их распределением на модели. Расхождение модель-

ных и фактических уровней в среднем составляло 2.6%. К настоящему времени сложилась довольно непростая ситуация из-за эксплуатации полигона СОЗ и водопритоков к месторождению трубки Мир. Относительно высокие фильтрационные

характеристики МИВК (коэффициент фильтрации до 7 м/сут) определяют быстрое распространение репрессивной волны при изменении объема закачки дренажных рассолов на участке. К тому же наличие гидродинамического барьера (Восточного разлома) способствует экологически опасному росту напоров на полигоне.

Учитывая сложную гидродинамическую обстановку, на участке закачки дренажных вод Ботубинской ГРЭ в 2002–2004 гг. были проведены изыскания нового полигона в районе лога “Горелый”, расположенного южнее эксплуатируемого участка СОЗ. Схема развития системы обратной закачки дренажных вод карьера и рудника Мир на перспективу приводится на рис. 7. На перспективу в 2015–2016 гг. планируется проведение работ по оценке гидрогеологических структур для закачки дренажных рассолов за Восточным разломом, севернее существующего полигона СОЗ. В последние годы среднегодовой водоприток к месторождению оценивается величиной порядка 1250 м<sup>3</sup>/ч, среднегодовой объем закачки дренажных рассолов в МИВК на СОЗ за Восточным разломом – 1350 м<sup>3</sup>/ч. Таким образом, объем закачки превышает величину водопритока в среднем на 8%. Разработанная в процессе калибровки гидродинамическая модель была использована для прогнозных расчетов.

На втором этапе моделирования осуществлялся прогноз изменения гидродинамического режима подземных вод и водопритоков к элементам системы “сухой” консервации карьера Мир по разным вариантам и при различных режимах закачки рассолов в МИВК. Модельные расчеты проводились по 4-м вариантам распределения дебита сточных вод по участкам (таблица):

Динамика изменения уровня подземных вод МИВК на участках закачки по разным вариантам

Вариант	Интенсивность закачки рассолов по участкам, м <sup>3</sup> /ч	Уровни подземных вод на участках закачки, абс. м		
		СОЗ	Южный	Северный
2013 г.	Q <sub>СОЗ</sub> = 1350 Q <sub>СОЗ</sub> = 1050, Q <sub>Ю</sub> = 300	300	275	275
		285	285	275
2	Q <sub>СОЗ</sub> = 750, Q <sub>Ю</sub> = 300, Q <sub>С</sub> = 300	275	275	280
3	Q <sub>СОЗ</sub> = 550	275	280	280
4	Q <sub>Ю</sub> = 500, Q <sub>С</sub> = 300 Q <sub>СОЗ</sub> = 350, Q <sub>Ю</sub> = 500, Q <sub>С</sub> = 500	270	280	290

- на действующем полигоне СОЗ в объеме 1050 м<sup>3</sup>/ч и на южном участке (300 м<sup>3</sup>/ч);
- на полигоне СОЗ (750 м<sup>3</sup>/ч), на южном (300 м<sup>3</sup>/ч) и на северном (300 м<sup>3</sup>/ч) участках;
- на полигоне СОЗ (550 м<sup>3</sup>/ч), на южном (500 м<sup>3</sup>/ч) и на северном (300 м<sup>3</sup>/ч) участках;
- на полигоне СОЗ (350 м<sup>3</sup>/ч), на южном (500 м<sup>3</sup>/ч) и на северном (500 м<sup>3</sup>/ч) участках.

Анализ результатов исследований показывает, что в пределах относительно высокопроницаемой зоны вдоль Восточного разлома, где расположены участки закачки, ограниченной от области разгрузки подземных вод (карьер Мир) гидродинамическим барьером (Восточный разлом), происходит выравнивание уровней подземных вод. Так, при закачке рассолов на СОЗ и южном участке (1-й вариант) водоприток в карьер увеличится не более чем на 5%. Снижение дебита закачки на СОЗ до 350–750 м<sup>3</sup>/ч и сбросе остальных объемов на проектируемых южном и северном участках (2-й и 3-й варианты исследований) приведут к понижению водопритока в карьер до 5%.

Исходя из анализа результатов исследований, сделаны выводы о возможности снижения дебита закачки дренажных рассолов карьера и рудника Мир на участке действующего СОЗ до 750–550 м<sup>3</sup>/ч и развития систем обратной закачки на новых перспективных участках: южном с производительностью 300–500 м<sup>3</sup>/ч и северном – 300 м<sup>3</sup>/ч. К проектированию на краткосрочную перспективу рекомендуется развитие системы обратной закачки дренажных рассолов рудника Мир на южном участке, расположенном на расстоянии 5 км южнее действующей СОЗ и в 5.5 км западнее карьера Мир.

Участок обратной закачки рекомендуется разместить за Восточным разломом в районе наблюдательных скважин 109 и 111 (лог “Горелый”). Участок обратной закачки представляет собой линейный ряд скважин, рассчитанный на суммарную производительность 300–500 м<sup>3</sup>/ч. Скважины должны располагаться на расстоянии не менее 150 м друг от друга. Длина линейного ряда закачных скважин составит 500 м. На среднесрочную перспективу планируется создание системы обратной закачки дренажных рассолов рудника Мир на северном участке, находящемся на расстоянии порядка 5 км севернее действующей СОЗ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного прогноза с использованием численного моделирования свидетельствуют, что при различных режимах закачки

рассолов из карьера и рудника Мир региональная гидродинамическая обстановка в районе месторождения существенно не изменится. При разных вариантах рассредоточенного сброса дренажных рассолов значимое снижение уровня поверхности МИВК прогнозируется только в районе участков закачки, что важно в связи с необходимостью улучшения гидродинамической обстановки, прежде всего на полигонах, где репрессия и нагрузка на ярус ММП криолитозоны максимальны.

В своей деятельности на территории Западной Якутии АК «АЛРОСА» постоянно разрабатывает и осуществляет одно из стратегических направлений – создание малоотходных технологий при отработке алмазных месторождений, учитывающих экологические аспекты данной проблемы. При принятии решения о месте складирования, захоронения или обратной закачке дренажных рассолов делается обоснованный выбор из множества альтернативных вариантов, а также учитываются особенности криогидрогеологических условий, в которых процесс удаления высококонцентрированных стоков осуществляется.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атрощенко Ф.Г., Лобанов В.В.* Гидрогеоэкологические проблемы утилизации дренажных рассолов при отработке подкарьерных запасов трубки Мир // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы решения. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002. С. 240–248.
2. *Атрощенко Ф.Г., Соловейчик К.А.* Оптимизация работы системы осушения и захоронения дренажных рассолов месторождения трубки Мир // Записки ЛГИ. 2003. С. 126–128.
3. *Вигандт В.А.* Опыт сооружения и эксплуатации обратной закачки дренажных вод карьера «Мир» // Горный журн. 1994. № 9. С. 60–62.
4. *Гаев А.Я., Щугорев В.Д., Бутолин А.П.* Подземные резервуары: условия строительства, освоения и технология эксплуатации. Л.: Недра, 1986. 223 с.
5. Гидрогеологические исследования для захоронения промышленных сточных вод в глубокие водонесные горизонты. Методические указания / Под ред. К.И. Антоненко, Е.Г. Чаповского. М.: Недра, 1976. 312 с.
6. Гидрогеологические исследования для обоснования подземного захоронения промышленных стоков / Под ред. В.А. Грабовникова. М.: Недра, 1993. 335 с.
7. Гидрогеоэкологический контроль на полигонах закачки промышленных сточных вод (Методическое руководство). М.: ИРЦ Газпром, 2000. 122 с.
8. *Гольдберг В.М., Скворцов Н.П., Лукьянчикова Л.Г.* Подземное захоронение промышленных сточных вод. М.: Недра, 1994. 282 с.
9. *Дроздов А.В.* Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 296 с.
10. *Дроздов А.В.* Природные и техноприродные резервуары промышленных стоков в криолитозоне (на примере Якутской части Сибирской платформы). Якутск: Изд-во СВФУ, 2011. 416 с.
11. *Дроздов А.В.* Роль базитового магматизма в формировании перспективных тектонических структур для захоронения промстоков на Сибирской платформе // Геоэкология. 2011. № 2. С. 123–137.
12. *Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В.* Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 507 с.
13. *Лукнер Л., Шестаков В.М.* Моделирование геофильтрации. М.: Недра, 1976. 407 с.
14. *Мироненко В.А., Румынин В.Г.* Проблемы гидрогеоэкологии. Т. 3. Прикладные исследования. М.: Изд-во МГГУ, 1999. 312 с.

## PROBLEMS IN OPERATION OF DRAINAGE WATER REINJECTION SYSTEM AT MIR PIPE AND OPEN PIT

A. V. Drozdov\*, G. N. Genzel\*\*

\**Yakutniproalmaz Institute, ALROSA JSC, ul. Lenina 39, Mirny, 678170 Russia.  
E-mail: DrozdovAV@alrosa.ru*

\*\**NOVOTEK Research Center, pr. B. Khmel'nitskogo 131, Belgorod, 308002 Russia.  
E-mail: Sekretar@novotek15.ru*

Cryohydrogeological conditions of pipe Mir and the site of drainage brines pumping have been considered, as well as specific features of protecting underground mining operations from water influx. Forecast has been made for the reinjection system operation at the open pit and the mine drainage runoff using digital modeling to provide further development of the deposit for short-term and average-term prospects without significant harm to environment.

**Keywords:** *diamond deposit, drainage brines, subpermafrost water-bearing complex, reinjection, hydrodynamic model.*