

Прогноз изменения гидродинамического режима метегеро-ичерского водоносного комплекса в процессе эксплуатации трубыки Интернациональная (Западная Якутия)

©2025 С. А. Янникова^{1,2}, А. М. Янников¹✉, А. С. Стручкова¹

¹Институт «Якутнипроалмаз» АК АЛРОСА (ПАО), ул. Ленина, 39,
678174, Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация

²Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Введение: в процессе эксплуатации трубыки «Интернациональная» прогнозируется значительное увеличение притоков подземных вод к шахтному полю с 10–15 м³/час до 1000 м³/час в 2027 г., связанное с вскрытием коллекторов ичерской свиты. Увеличение притока к шахтному полю месторождения потребует многократной интенсификации процесса обратной закачки, реализованной в настоящее время в коллекторы метегеро-ичерского водоносного комплекса в пределах двух участков, расположенных в зоне динамического воздействия регионального Западного разлома. Принятые технические решения повлияют на гидродинамический режим изучаемого водоносного комплекса. Прогнозирование гидродинамического режима является важной составляющей обеспечения экологической безопасности процесса обратной закачки, в части определения границ репрессионного купола растекания, а также своевременного реагирования на создание избыточного напорного фронта.

Методика: основным методом прогнозирования выступало гидрогеологическое моделирование. При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик метегеро-ичерского водоносного комплекса. Исходные параметры комплекса приняты по материалам ранее выполненных опытно-промышленных и научно-исследовательских работ за весь период отработки месторождения и корректировались на этапе калибровки модели. Прогноз изменения гидродинамического режима осуществлялся при помощи программы гидрогеологического моделирования ПО Feflow.

Результаты и обсуждение: была получена новая информация по локальному изменению гидродинамического режима метегеро-ичерского водоносного комплекса. Представлены карты-схемы пьезометрических поверхностей, прослежено развитие депрессионной воронки и наложенного репрессионного купола растекания. К 2029 г. пьезометрическая поверхность метегеро-ичерского водоносного комплекса приобретет дипольный вид, депрессионная воронка вокруг рудника «Интернациональный» совместится с репрессионным куполом растекания с Западного разлома. В дальнейшем существенных изменений пьезометрическая поверхность водоносного комплекса претерпевать не будет.

Заключение: выполнение гидродинамических и гидрогеологических расчётов позволило оценить прогнозную суммарную производительность участков закачки с учётом текущего состояния закачных скважин, а также выполнить прогноз обеспеченности потребности в обращении с дренажными водами рудника «Интернациональный». Полученные по результатам моделирования прогнозные отметки пьезометрической поверхности позволяют прогнозировать возможность дальнейшей закачки дренажных рассолов в метегеро-ичерский водоносный комплекс.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Янников Алексей Михайлович, e-mail: yannikov90@mail.ru

Ключевые слова: Мирнинское кимберлитовое поле, трубка Интернациональная, метегеро-ичерский водоносный комплекс, моделирование гидродинамического режима, водопонижение, узлы закачки.

Для цитирования: Янникова С. А., Янников А. М., Стручкова А. С. Прогноз изменения гидродинамического режима метегеро-ичерского водоносного комплекса в процессе эксплуатации трубы Интернациональная (Западная Якутия) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2025. № 1. С. 113–126. DOI: <https://doi.org/10.17308/geochemistry/1609-0691/2025/1/113-126>

Введение

На территории Мирнинского кимберлитового поля Западной Якутии большая часть дренажных водrudников «Мир» и «Интернациональный» удаляется обратно в недра криолитозоны наиболее рациональным методом – обратной закачкой в коллекторы подмерзлотного метегеро-ичерского водоносного комплекса (МИВК). МИВК является наиболее водообильным из всех вскрываемых комплексов и составляет 90 % от суммарного объема формируемых дренажных вод.

В процессе эксплуатации трубы «Интернациональная» в отм. -20/-145 м прогнозируется существенное увеличение притоков подземных вод к шахтному полю с имеющих место 10–15 м³/час до 1000 м³/час в 2027 г., связанное с вскрытием коллекторов ичерской свиты. Такое увеличение притока к шахтному полю месторождения потребует многократной интенсификации процесса обратной закачки, реализованной в настоящее время в коллекторы МИВК в пределах двух

участков, расположенных в зоне динамического воздействия регионального Западного разлома. Необходимость гидрогеологических исследований Западного разлома в качестве рассолопоглощающей структуры продиктована развитием системы обратной закачки рудника «Интернациональный».

Принятые технические решения повлияют на гидродинамический режим изучаемого водоносного комплекса, пьезометрическая поверхность которого в «стресс-режиме» будет формировать дипольную природно-техногенную структуру, аналогичную, возникшей в зоне регионального Восточного разлома при отработке трубы «Мир» [1].

Прогнозирование гидродинамического режима является важной составляющей обеспечения экологической безопасности процесса обратной закачки, в части определения границ репрессионного купола растекания, а также своевременного реагирование на создание избыточного напорного фронта [2, 3].

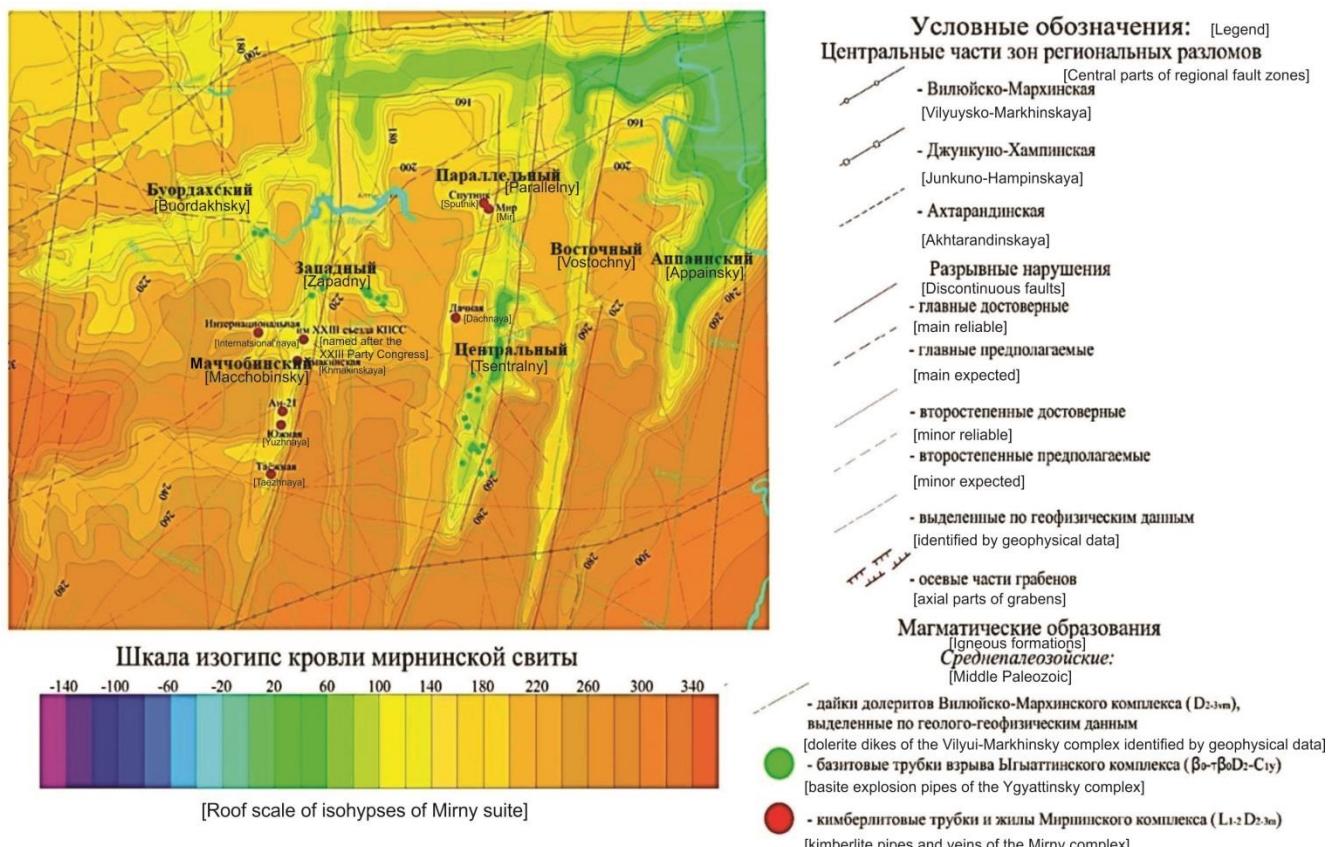


Рис. 1. Структурно-тектоническая карта изучаемого участка (составлена по материалам Ботуобинской и Мирнинской ГРЭ). [Fig. 1. Structural-tectonic map of the studied area (compiled based on the materials of the Botuobinskaya and Mirny geological exploration expeditions).]

Краткая характеристика объекта исследований

Структурная позиция района исследования определяется положением его в пределах Мирнинского свода, разбитого на блоки Вилойско-Мархинской зоной глубинных субмеридиональных разломов, контролирующих среднепалеозойский трапповый магматизм. В пределах свода выделяются разноплановые типы пликативных и дизъюнктивных дислокаций (рис.1) [4, 5].

Объектом изучения выступали коллекторы метегеро-ичерской свиты в зоне динамического влияния Западного разлома, как целевые пласти для реализации технологии обратной закачки.

МИВК от дневной поверхности отделён мощной толщей (300–400 м) многолетнемёрзлых пород холмоловской и мирнинской свит. Абсолютная отметка кровли составляет -5/+20 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза ичерской свиты (пласти №№ 25–26 по сводному корреляционному разрезу), находящаяся на абсолютных отметках -130/-150 м. Общая мощность водоносного комплекса колеблется от 125

до 220 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты с прослойями менее проницаемых гипс-ангидритов. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~200–250 м. [6–8].

В настоящее время проходка и добыча на месторождении производится в пределах первых коллекторов метегерской свиты, наблюдается незначительный капеж. Водопонижение в метегеро-ичерском водоносном комплексе, согласно календарному плану, начнется в 2026 г. с горизонта -145 м абс. Дополнительное влияние на массоперенос в метегеро-ичерском водоносном комплексе в пределах месторождения оказывают узлы обратной закачки (УОЗ) и узлы закачки вод (УЗВ), расположенные за Западным разломом.

Метегеро-ичерский водоносный комплекс является наиболее обводненным и затрудняющим добычу в пределах Мало-Ботубинского района [9]. Состоит из 10 коллекторов, наиболее водообильным из которых является 8-й коллектор (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика коллекторов МИВК
[Table 1. Characteristics of the collectors of the Metegero-Ichersky aquifer complex]

№№ колл. [No. of collectors]	Зона динамического влияния Западного разлома [Dynamic influence zone of the Western fault]											
	скважина 430 [well 430]				скважина 432 [well 432]				скважина 433 [well 433]			
	От глу- бина абс.отм. [From depth abs. m]	До глу- бина абс.от м. [To depth abs. m]	Кп. нгк, %	Кп. БК откр., %	От глу- бина абс.отм. [From depth abs. m]	До глу- бина абс.от м. [To depth abs. m]	Кп. нгк, %	Кп. БК откр., %	От глу- бина абс.отм. [From depth abs. m]	До глу- бина абс.отм. [To depth abs. m]	Кп. нгк, %	Кп. БК откр., %
7	444.0 -61.4	450.0 -67.4	21.0	9.0	430.2 -43	435.2 -48	14. 5	5.4	427.4 -38.4	431.4 -42.4	14.8	1.3
8	462.0 -79.4	521.0 -138.4	7.6	2.5	442.5 -55.3	496.3 -109.1	7.8	1.8	444.0 -55	484.5 -95.5	6.8	2.5
9-10					515.8 -128.6	520.6 -133.4	5.7	1.3	502.5 -113.5	506.5 -117.5	4.0	3.8
№№ колл. [No. of collectors]	Межразломный блок [interfault block]				Зона динамического влияния Центрального разлома [zone of dynamic influence of the Central fault]							
	скважина 431 [well 431]				скважина 439 [well 439]				скважина 440 [well 440]			
	От глу- бина абс.отм. [From depth abs. m]	До глу- бина абс.от м. [To depth abs. m]	Кп. нгк, %	Кп. БК откр., %	От глу- бина абс.отм. [From depth abs. m]	До глу- бина абс.от м. [To depth abs. m]	Кп. нгк, %	Кп. БК откр., %	От глу- бина абс.отм. [From depth abs. m]	До глу- бина абс.отм. [To depth abs. m]	Кп. нгк, %	Кп. БК откр., %
4	333.6 43.4	336.4 40.6	15.0	3.0								
5	343.0 34	349.0 28	23.5	6.1								
6	354.5 22.5	358.5 18.5	5.5	2.3								
7	375.0 2	380.2 -3.2	12.0	2.1	398.0 -80	403.6 -85.6	12. 3	4.1	440.4 -78.9	444.5 -83	6.5	
8	387.7 -10.7	441.7 -64.7	4.6	2.6	414.6 -96.6	461.0 -143	10. 4	4.8	453.4 -91.9	497.5 -136	4.3	
9-10	456.0 -79	464.4 -87.4	6.1	2.3	483.6 -165.6	484.5 -166.5	16. 0	17.0				

В процессе анализа режимных наблюдений, выполняемых геологоразведочным комплексом АК АЛРОСА, установлено, что в зоне динамического влияния Западного, как и Параллельного, Центрального региональных разломов корреляция отложений метегерской свиты нарушена.

В разрезе ичерской свиты выделяются 3 пласта-коллектора. Наиболее водообильным считается 8-ой

коллектор, который распространён на изучаемой площади повсеместно. Коллектор представлен известняками с трещинной составляющей пористости. Характеристика 8-го коллектора представлена в табл. 2.

Гидродинамические параметры МИВК в районе трубы «Интернациональная» по результатам выполненных опытно-фильтрационных работ даны в табл. 3.

Табл. 2. Характеристика основного 8-го коллектора МИВК
[Table 2. Characteristics of the main 8-th collector of the Metegero-Ichersky aquifer complex]

Приуроченность к разлому [Fault related]	Расположение [Location]	№№ скв. [Well No.]	Кровля 8-го коллектора [Roof of the 8th collector, abs. m]	Мощность, м [Thickness, m]	Коэффициент пористости по данным ГИС, % [Porosity coefficient according to GIS data, %]		
			в абс. отм., м.		Общая [general]	Открытая [open]	Эффективная [effective]
Зона динамического влияния Западного разлома [zone of dynamic influence of the Western fault]	УОЗ [Reinjection unit]	403	-98.3	56.4	н.о.	н.о.	н.о.
		400	-111.2	51.0	2.3–18.8	1.2–5.9	1.3–7.8
		401	-116.9	41.6	6.7–17.2		2.6–7.0
		402	-124.6	42.2	4.7–13.2	3.2–10.6	1.1–3.4
		420	-116.6	41.4	5.3–15.0		1.7–13.0
		421	-117.5	40.8	6.5–13.0		1.7–11.0
		405	-105.2	47.6	6.5–11.5	4.0–10.6	1.4–4.3
		430	-74.5	59.0	1.9–16.5	1.5–3.0	1.1–7.8
		432	-54.2	53.8	5.7–10.0	3.0–8.0	0.8–3.0
		433	-54.7	41.0			
Межразломный блок [interfault block]	Западная часть от Западного разлома [western part of the Western Rift]	404	-119.9	40.6	3.9–9.3	3.0–9.1	1.8–6.0
		406	-94.9	49.8	3.9–21.1	4.0–20.9	1.0–7.3
		408	-79.7	46.9	3.8–14.8	2.1–13.4	1.2–13.0
		410	-72.3	50.2	5.0–14.2	4.0–11.4	1.4–3.9
		301	-69.6				
		306	-57.8	49.2			
		416	-31.0	40.5			
	Восточная часть от Западного разлома [eastern part of the Western Rift]	412	-111.4	45.2	4.4–9.8	1.4–10.5	2.0–5.4
		414	-97.4	51.6	н.о.	2.1–8.2	н.о.
		431	-10.4	54.0	3.1–7.1	2.2–7.0	2.7–3.1

Табл. 3. Гидродинамические параметры МИВК
[Table 3. Hydrodynamic parameters of the Metegero-Ichersky aquifer complex]

№№ скв. [Well No.]	Кровля МИВК, м абс [Roof of the Metegero-Ichersky aquifer complex, abs. m]	Мощность, м [Power, m]	Год [year]	Водопроводимость, м ² /сут [Water conductivity, m ² /day]	Коэффициент фильтрации, м/сут [Filtration coefficient, m/day]	Пьезопроводности, м ² /сут. [Piezoconductivity, m ² /day]
				Km		
301	+71.2	152.8	1980	50.1	0.3	10^6
306	+43.8	130.9	2007	6	0.05	10^8
406	-13.9	157.4	1999	116–149	0.8	10^6
410	+7.69	156	1999	53	0.3	$10^5–10^6$
416	-6.6	87	2007	44–69	0.6	10^6
17	+59.2	166.4	1980	67.5	0.4	10^6
			1999	42–74	0.3	
			2007	49–60	0.3	$6.4\times10^5–6\times10^6$
1 ^{II}	-	-	2007	46	-	4×10^5
2 ^{ГГ}	+25	-	2009	-	-	-

Зона Западного разлома до момента его испытания в качестве рассоло-поглощающей структуры была изучена структурно-разведочными скважинами различной глубины и сейсморазведочными профилями. Разлом на всем протяжении характеризуется небольшими амплитудами блоковых смещений при контактовых вмещающих пород и, как следствие, незначительными зонами дробления их и дайки долеритов, выполняющей разлом. Разлом по своей тектонической активности испытывал спокойное развитие.

В настоящее время в зоне динамического влияния

Западного разлома построено и эксплуатируется два узла закачки узел обратной закачки (УОЗ) и узел закачки карьерных вод (УЗВ).

УОЗ построен и сдан в эксплуатацию в 2001 г. В его состав входят нагнетательные, наблюдательные и водозаборные скважины, канализационно-насосная станция, трансформаторные подстанции, системы трубопроводов, водоприемные ёмкости, пункт управления дежурным персоналом, узел смешения, камера расходомеров, нагнетательная насосная станция, пруд-регулятор аварийных сбросов (рис.2).

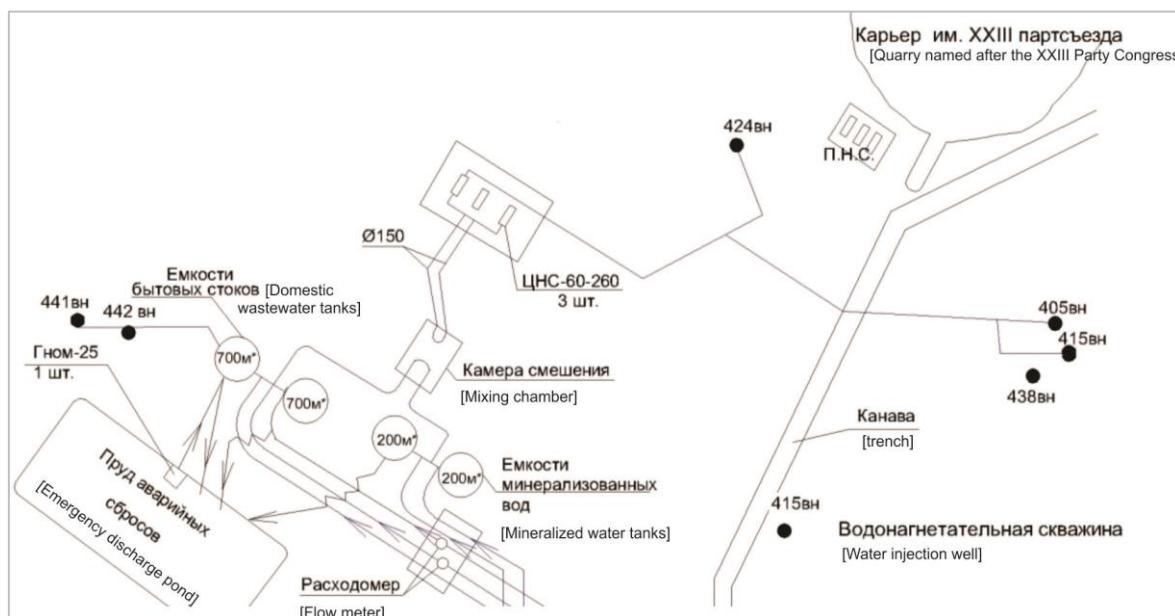


Рис. 2. Функциональная схема узла обратной закачки.
[Fig. 2. Functional diagram of the reverse injection unit.]

Закачка в пределах участка осуществляется в скважины № 405, 415, 424, 438, 441, 442. Объём закачиваемых вод ~ 300 тыс. m^3 в год. Режим закачки свободный налив с расходом от 13.9 до 41.8 $\text{m}^3/\text{ч}$.

В 2008 г. введен в строй узел закачки карьерных вод (УЗВ), находящийся южнее существующего участка УОЗ промстоков рудника в пределах единого согласованного горного отвода. УЗВ состоит из 12 нагнетательных скважин (№ 450з-461з), расположенных в линейном ряду вдоль зоны Западного разлома с шагом 150 м (рис. 3), наблюдательной скважины № 451н и наблюдательных скважин УОЗ, насосной станции обратной закачки магистрального внутрикарьерного водоводов и внутрикарьерных насосных станций.

Закачка в пределах участка осуществляется попеременно в скважины № 450з, 451з, 452з, 453з, 454з, 455з, 456з, 457з, 458з, 459з, 460з, 461з. Объём закачиваемых вод ~ 500 тыс. m^3 в год. Режим закачки: свободный налив-нагнетание с расходом от 40 до 200 $\text{m}^3/\text{ч}$ в одну скважину.

В результате эксплуатации участков УОЗ и УЗВ вдоль линии Западного разлома сформировался купол растекания площадью порядка 12 km^2 .

Строительство участка осуществлялось в 2 этапа. На первом этапе (в 2007–2008 гг.) были построены скважины северной ветки №450з–454з. Строительство скважин южной ветки и их опробование были выполнены в 2014–2015 гг. Максимальная приемистость скважин составила: 456з – 200 $\text{m}^3/\text{час}$ (в режиме свободного налива); 457з – 150 $\text{m}^3/\text{час}$ (избыточное давление на устье 5.3 kgs/cm^2); 458з – 95 $\text{m}^3/\text{час}$ (избыточное давление на устье 3.9 kgs/cm^2); 459з – 200 $\text{m}^3/\text{час}$ (в режиме свободного налива); 460з – 47 $\text{m}^3/\text{час}$ (избыточное давление на устье 4.3 kgs/cm^2); 461з – 125 $\text{m}^3/\text{час}$ (избыточное давление на устье 4.2 kgs/cm^2).

Проведенными ранее работами [1] подтверждено, что структура Западного разлома обладает более низкими гидродинамическими характеристиками по сравнению с Аппаинским, Восточным и Центральным разломами. Однако, выявленные низкоранговые неоднородности разломной зоны и потенциально-блоковое строение с отдельными более проницаемыми блоками (до 90 $\text{m}^2/\text{сут}$) позволяют рассматривать данную структуру, как основную для производства обратной закачки дренажных вод рудника «Интернациональный».

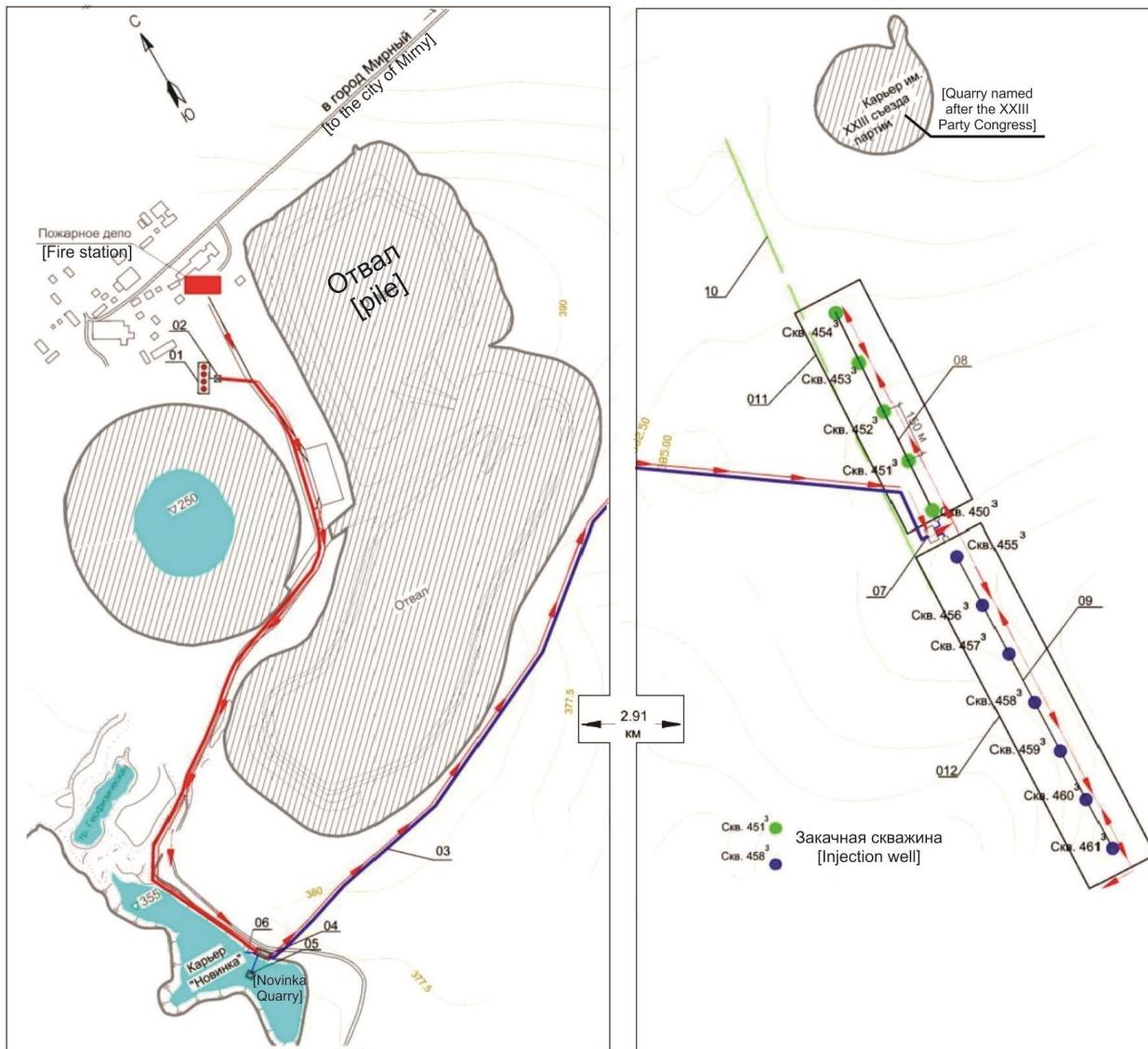


Рис. 3. Функциональная схема узла закачки карьерных вод.
[Fig. 3. Functional diagram of the quarry water injection unit.]

Методика исследований

Основным методом прогнозирования, позволяющим обеспечить учёт описанных гидрогеологических и горно-геологических условий объекта исследований, выступало гидрогеологическое моделирование. При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик метегеро-ичерского водоносного комплекса. Исходные параметры расчетного метегеро-ичерского водоносного комплекса приняты по материалам ранее выполненных опытно-промышленных и научно-исследовательских работ за весь период отработки месторождения в интервале водоносного комплекса и корректировались на этапе калибровки модели.

В плане метегеро-ичерский водоносный комплекс в силу изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород, вызванных, прежде всего, литолого-фациальными и структурно-тектоническими факторами, принят кусочно-однородным. В районе трубки

Интернациональной и Западного разлома, как отмечалось выше, по данным ГИС, корреляция метегерской свиты (с 1 по 7 коллектора) нарушена, были определены низкие фильтрационные параметры. Поэтому для решения прогнозной задачи при отработке запасов в разрезе принята двухслойная система, в которой 1 слой – малопроницаемый метегерский водоносный горизонт, 2 слой с более высокими фильтрационными параметрами – ичерский водоносный горизонт.

Размеры области моделирования в плане выбраны, исходя из гидрогеологических условий района и решаемых задач, таким образом, чтобы ее внешние границы оказывали минимальное влияние на гидродинамические процессы, протекающие в районе разработок рудника «Интернациональный».

Решение фильтрационных задач на модели осуществлялось в нестационарном режиме. Более подробно методика моделирования приведена в опубликованных ранее работах [10–14].

Результаты и их обсуждение

Изменение уровня подземных вод метегеро-ичерского водоносного комплекса в настоящее время подвержено влиянию закачки на участках УОЗ и УЗВ в зависимости от расстояния до центра закачки. Динамика уровня в районе рудника «Интернациональный» представлена на рис. 4а. Годовая амплитуда колебания уровня составляет от 20 до 40 м, в зависимости от расхода среднемесячной закачки, составлявшей от 20 до 300 м³/ч. В 2024 г. отмечается повышение уровня в скважине № 452Н до отметок остальных скважин, с 2019 по 2023 гг. разница в уровнях относительно других

скважин составляла 10–15 м. На 2024 г. уровень подземных вод в скважинах изменяется в пределах 154–159 м абс., кроме скважины №416, в которой 173 м абс.

С 2020 г. среднемесячный расход закачки составлял 20–50 м³/ч, что привело к снижению уровня до 136 м абс. в районе рудника и 150–160 м абс. в районе участков закачки (рис. 4б), а колебание уровня в течение года составляет до 10–15 м. Кроме этого можно отметить тенденцию к понижению уровня в скважинах с 2019 г., что возможно связано со снижением интенсивности закачки на участке закачки дренажных вод рудника «Мир».

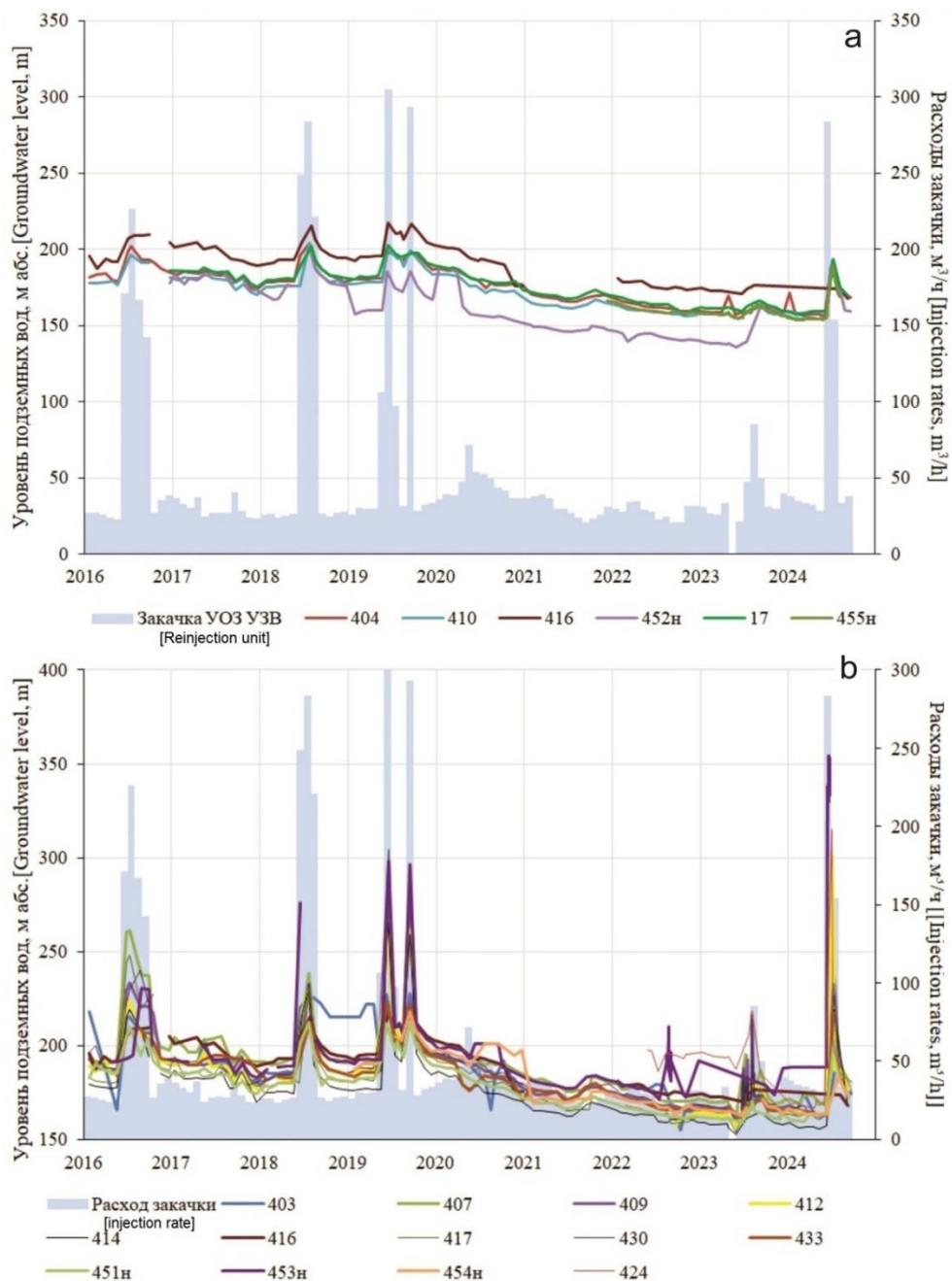


Рис. 4. Динамика уровня подземных вод в районе а) рудника «Интернациональный» и б) участков обратной закачки (зона влияния Западного разлома).

[Fig. 4. Dynamics of groundwater levels in the area of a) the Internatsionalny mine and b) in the area of reinjection sites (zone of influence of the Western fault).]

В скважинах №403, 414, 454Н, уровень подземных вод ниже, так как они расположены дальше от центра закачки. Основные факторы, влияющие на изменение уровня в этих скважинах, связаны с закачкой на УЗВ, УОЗ и изменением уровня в карьере и участках обратной закачки месторождения трубы «Мир». В скважинах №407, 417, 424 уровень в большей степени зависит от закачки УОЗ. В наблюдательных скважинах №430, 409, 453Н уровень повышается под действием закачки в эксплуатационные скважины УЗВ, в меньшем степени в скважинах №451Н и 433, так как они расположены за

Западным разломом.

Влияние закачки дренажных рассолов на участках УОЗ и УЗВ распространяется на расстояние до 10–11 км в межразломной зоне Западного и Параллельного региональных разломов (рис. 5а) до Центрального разлома (рис. 5б).

Амплитуда колебаний уровня в наблюдательных скважинах при закачке с производительностью 100–300 м³/ч в зависимости от расстояния от центра закачки, интенсивности закачки и расположения наблюдательной скважины составляет 5–120 м.

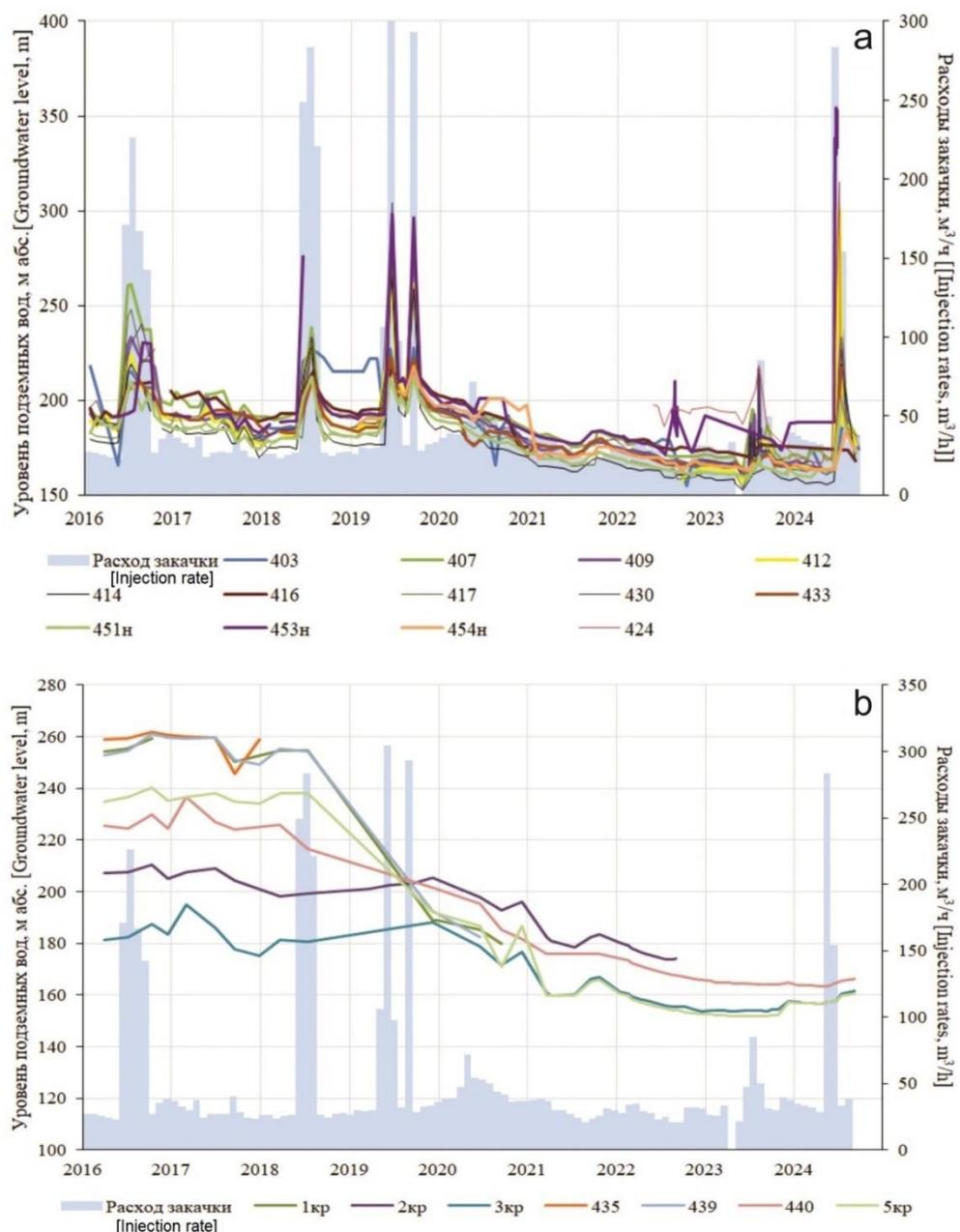


Рис. 5. Динамика уровня подземных вод а) в межразломной зоне Западного и Параллельного разломов и б) в зоне влияния Центрального разлома.

[Fig. 5. Dynamics of groundwater level in a) the interfault zone of the Zapadny and Paralllny faults and b) in the zone of influence of the Tsentralny Fault].]

Анализ графиков на рис. 4, 5 показал, что уровень подземных вод метегеро-ичерского водоносного комплекса в районе месторождения трубы «Интернациональная» вследствие закачки повышается на 4–11 м при среднемесячном расходе закачки 100–150 м³/ч и на 25–35 м при закачке 250–300 м³/ч. На представленных графиках выделяются периоды кратковременных остановок

закачки, затрагивающие не только центральную часть участка, но и северо-восточный и северный блоки.

В табл. 4 представлена информация по динамике изменения уровня подземных вод по сети наблюдательных скважин, расположенных относительно сети ОЗВ по сторонам света. В 2024 г. суммарный среднемесячный дебит достиг 437 м³/ч.

Табл. 4. Амплитуда уровня подземных вод в наблюдательных скважинах в зависимости от интенсивности суммарной закачки

[Table 4. Amplitude of groundwater level in observation wells depending on the intensity of total injection]

Год [Year]	2016	2018	2019	2023	2024
Суммарный среднемесячный дебит, м ³ /ч [Total average monthly flow rate, m ³ /h]	226	283	305	130	437
№ скв. [No. well]	Амплитуда уровня подземных вод, м абс. [Groundwater level amplitude, m abs.]				
Западная часть [Western part]					
17		22	20	7	36
404	23	23	14	6	31
410	20	26	24	11	38
416	17	22	22	4	-
452н	-	35	25		35
455н	-	-	-	8	35
Центральная часть [Central part]					
451н	25	34	29	12	43
430	53	54	117	52	216
409	46	52	110	26	213
453н	41	87	106	-	180
Восточная часть [Eastern part]					
414	42	58	122	11	188
431	12	14	21	3	25
444	-	27	16	6	31
445	-	-	16	6	32
Южная часть [Southern part]					
433	24	40	40	8	79
Северная часть [Northern part]					
454н	-	-	27		20
403	49	39	41	7	79
424	-	-	-	40	148
412	40	50	80	23	138
407	70	48	-	33	175
417	68	53	104	24	71

Определение производительности скважин выполнялось аналитическими методами и при помощи гидрогеологического моделирования. В отличие от аналитических методов на гидродинамической модели можно отследить зависимость основных факторов, влияющих на изменение уровня подземных вод. В данном случае уточнялись не только фильтрационно-емкостные параметры в пределах участка УЗВ, как следствие влияние процесса закачки на притоки в рудник, но и определялись расходы закачки рассолов в эксплуатационные скважины. На модели были заданы следующие граничные условия [15, 16]:

1. Граничное условие 1 рода на руднике «Интернациональный» в интервале добывчных работ;

2. Граничное условие 1 рода на месторождении трубы с фактическими отметками уровня воды в карьере;

3. Граничное условие 2 рода на УОЗ и УЗВ с

заданием фактических расходов закачки.

В результате были уточнены фильтрационно-емкостные параметры, геометрическая конфигурация в плане и в разрезе основных элементов гидрогеологической модели. Проведен подбор расходов закачки в каждую скважину для калибровки модели.

Оптимальные расходы закачки в каждую скважину с учетом результатов решения обратной задачи, при поддержании эксплуатационных скважин в рабочем состоянии приведены в табл. 5 и на рис. 6.

В табл. 5 представлен прогноз объемов откачки и закачки (по результатам моделирования) по годам. С 2025 по 2027 гг. будет продолжаться бурение дренажных скважин, в 2027 их количество достигнет 60 шт. С увеличением количества скважин будет увеличиваться совершенство вскрытия водоносного комплекса с целью осушения трубы «Интернациональная».

Табл. 5. Объемы откачки и закачки (по результатам моделирования)
[Table 5. Pumping and injection volumes (based on simulation results)]

Период расчета [Calculation period]	Приток к дренажной системе рудника без закачки, м ³ /ч [Inflow to the mine drainage system without injection, m ³ /h]	Объем, м ³ [Volume, m ³]	Количество скважин в работе, шт. [Number of wells in operation, pcs.]	Закачка на УЗВ		Уровень в скважинах рудника, м абс. [Level in mine wells, m abs.]
				Приток в рудник с возвратом из шахты (закачка в шахту) [Injection at the quarry water injection unit (inflow into the mine with return)]	Объем, м ³ [Volume, m ³]	
2025	Сентябрь [September]	199970	278	4	207180	288
	Октябрь [October]	247440	333	8	272950	367
	Ноябрь [November]	265890	369	12	307260	427
	Декабрь [December]	295070	397	16	354420	476
	Январь [January]	306570	412	20	380750	512
	Февраль [February]	285460	425	24	364400	542
	Март [March]	321590	432	28	420510	565
	Апрель [April]	317100	440	32	423610	588
	Май [May]	333930	449	36	454920	611
	Июнь [June]	324880	451	40	450600	626
2026	Июль [July]	372870	501	44	514130	691
	Август [August]	368090	495	48	519790	699
	Сентябрь [September]	354070	492	50	507490	705
	Октябрь [October]	363280	488	52	526530	708
	Ноябрь [November]	349050	485	54	510630	709
	Декабрь [December]	359160	483	56	529710	712
	2027	4408900	503	60	6779200	774
	2028	4531100	516	60	7150300	814
	2029	4692200	536	60	7547600	862
	2030	4784500	546	60	7865200	898
	2031	5324700	608	60	8740700	998

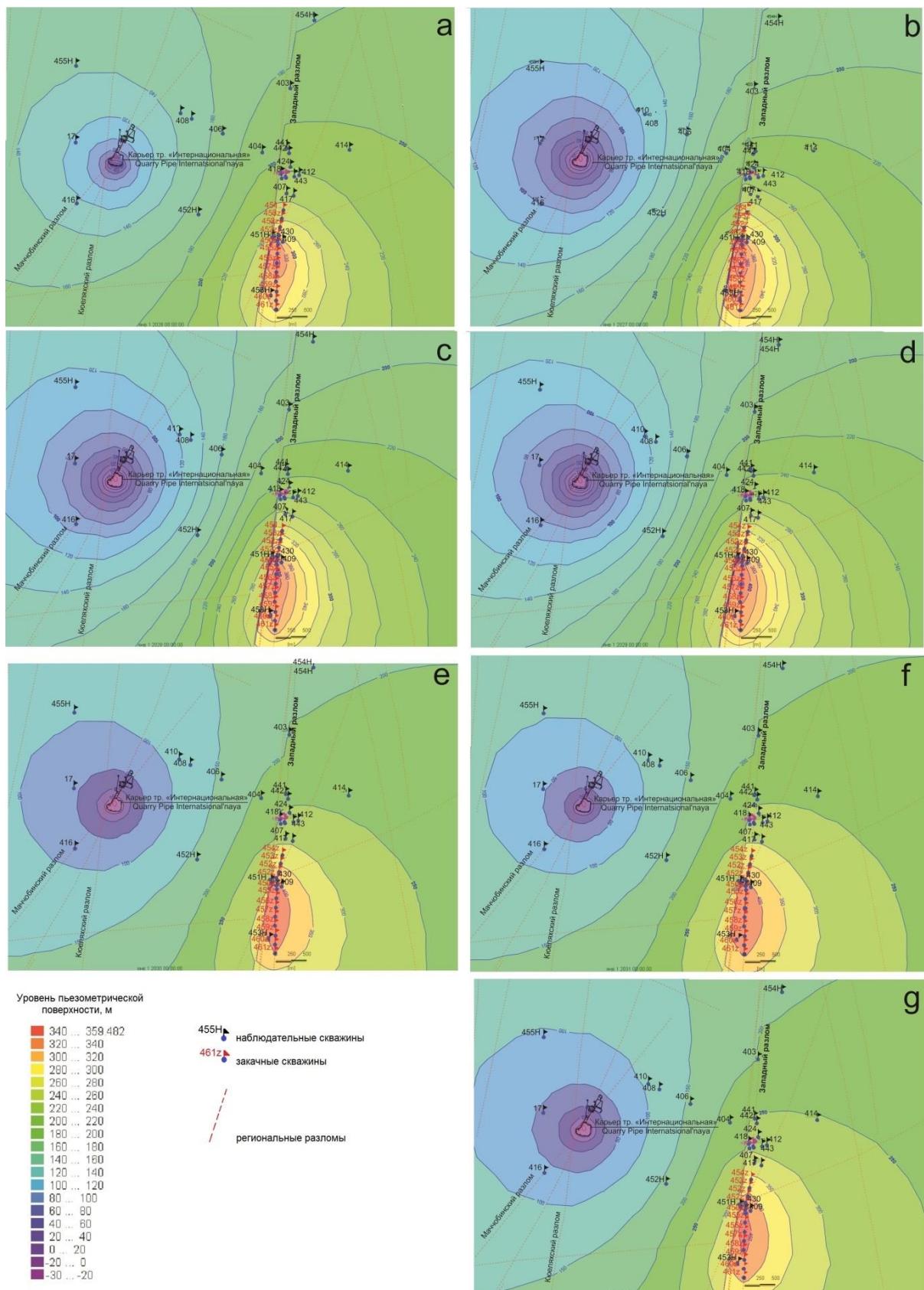


Рис. 6. Пьезометрическая поверхность МИВК: *a* – на конец 2025 г. *b* – на конец 2026 г., *c* – на конец 2027 г., *d* – на конец 2028 г., *e* – на конец 2029 г., *f* – на конец 2030 г., *g* – на конец 2031 г.

[Fig. 6. Piezometric surface of the Metegero-Ichersky aquifer complex: (*a*) – at the end of 2025, (*b*) – at the end of 2026, (*c*) – at the end of 2027, (*d*) – at the end of 2028, (*e*) – at the end of 2029, (*f*) – at the end of 2030, (*g*) – at the end of 2031.]

На рис. 6 отражена площадная информация по изменению пьезометрическая поверхности МИВК с 2025 по 2031 г. Наиболее интенсивные прогнозные изменения будут происходить в 2026 и 2027, 2028 г., к 2029 г. пьезометрическая поверхность приобретет дипольный вид, в этой ситуации на депрессионную воронку вокруг рудника «Интернациональный» накладывается репрессионный купол растекания с Западного разлома. В дальнейшем существенных изменений пьезометрическая поверхности МИВК не будет претерпевать.

Выводы

В рамках прогнозируемого периода жизненного цикла отрабатываемых месторождений пьезометрическая поверхность метегро-ичерского комплекса претерпит существенные изменения, которые будут связаны с этапами отработки ключевых месторождений трубок «Интернациональная» и «Мир». В результате проведенных расчётов и гидродинамического моделирования в целом была подтверждена возможность закачки дренажных вод рудника «Интернациональный» в пределах участков, расположенных в зоне динамического воздействия Западного разлома.

Определены прогнозные расходы в пределах дренажного горизонта рудника «Интернациональный» и дебиты закачки в зоне Западного разлома. Построенные схемы-карты напоров позволяют оценить скорость формирования в пределах шахтного поля депрессионной воронки и наложенного в зоне динамического воздействия Западного разлома купола растекания, которые к 2029 г. совместятся друг с другом. В дальнейшем существенных изменений пьезометрическая поверхности МИВК претерпевать не будет.

Полученные по результатам моделирования прогнозные отметки пьезометрической поверхности позволяют прогнозировать возможность дальнейшего экологически безопасного процесса закачки дренажных вод в МИВК.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Янников А. М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля (республика Саха (Якутия)). Под общ. ред. А.В. Толстова. Мирный: АЛРОСА, 2021. 238 с.
2. Янников А. М., Бочаров В. Л. Проблема экологически безопасного захоронения дренажных вод рудника "Интернациональный" // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2019. № 4. С. 99–103.
3. Дроздов А. В. Структурно-тектонические критерии оценки приемистости массивов для захоронения сточных вод алмазодобывающих предприятий в криолитозоне Западной Якутии // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 2. С. 27–45
4. Колганов В. Ф., Акишев А. Н., Дроздов А. В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный, Мирнинская типография, 2013. 568 с.
5. Клиновский И. В., Готовцев С. П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 167 с.
6. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
7. Янников А. М., Янникова С. А. Корепанов А. Ю. Изменение коэффициента водопроводимости метегро-ичерского водоносного комплекса в пределах мирнинского кимберлитового поля (Якутия) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 3. С. 96–103.
8. Агринский А. В. Результаты изучения гидрогеологических условий при разведке одной из кимберлитовых трубок в Западной Якутии // Тр. ВСЕГИНГЕО. 1980. № 135. С. 48–57.
9. Дроздов А. В., Иост Н. А., Лобанов В. В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
10. Янников А. М., Стручкова А. С. Особенности гидрогеологического моделирования цифровых двойников эксплуатируемых коренных месторождений алмазов и сопряженных участков закачки // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. № 6. С. 71–78. DOI 10.31857/S0869780923060097.
11. Янников А. М., Янникова С. А., Корепанов А. Ю. Влияние тектонических нарушений на проектируемые системы опережающего водопонижения на примере трубки "Юбилейная" // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 5–2. С. 174–186. DOI 10.25018/0236_1493_2022_52_0_174.
12. 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.
13. 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, 100822, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100822>.
14. Bense V. F., Read T., Bour O., Le Borgne T., Coleman T., Krause S., Chalari A., Mondanos M., Ciocca F., Selker J. S. Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology// Water Resour. Res. 2016. Vol. 52. DOI:10.1002/2016WR018869.
15. Jones D., Jones N., Greer J., Nelson J. A cloud-based MODFLOW service for aquifer management decision support // Computers & Geosciences. 2015. Vol. 78. P. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.02.014>.
16. Bidwell V. J. Realistic forecasting of groundwater level, based on the eigenstructure of aquifer dynamics // Mathematics and Computers in Simulation. 2005. Vol.69. Iss. 1–2. P. 12–20, <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2005.02.023>.

Forecast of changes in the hydrodynamic regime of the Metegero-Ichersky aquifer complex during the operation of the Internatsionalnaya pipe (Western Yakutia)

©2025 S. A. Yannikova^{1,2}, A. M. Yannikov^{1✉}, A. S. Struchkova¹

¹*Institute Yakutniproalmaz ALROSA PJSC, 39 Lenina ul., 678174,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation*

²*Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl., 394018, Voronezh, Russian Federation*

Abstract

Introduction: during the operation of the Internatsionalnaya pipe, a significant increase in groundwater inflows to the mine field is predicted from the current 10-15 m³/hour to 1000 m³/hour in 2027, associated with the opening of the Icherskaya suite collectors. An increase in the inflow to the mine field of the deposit will require multiple intensification of the reinjection process, currently implemented in the collectors of the Metegero-Icherskaya aquifer complex within two areas located in the zone of dynamic influence of the regional Western fault. The adopted technical solutions will affect the hydrodynamic regime of the studied aquifer complex. Forecasting the hydrodynamic regime is an important component of ensuring the environmental safety of the reinjection process, in terms of determining the boundaries of the repression spreading dome, as well as timely response to the creation of an excess pressure front.

Methodology: the main forecasting method was hydrogeological modeling. When constructing the hydrodynamic model, the hydrogeological characteristics of the Metegero-Ichersky aquifer complex were detailed. The initial parameters of the complex were adopted based on the materials of previously completed pilot and research work for the entire period of field development and were adjusted at the stage of model calibration. The forecast of changes in the hydrodynamic regime was carried out using the Feflow hydrogeological modeling program.

Results and discussion: new information was obtained on local changes in the hydrodynamic regime of the Metegero-Ichersky aquifer complex. Maps and diagrams of piezometric surfaces are presented, the development of a depression funnel and an imposed repression spreading dome is traced. By 2029, the piezometric surface of the Metegero-Ichersky aquifer complex will acquire a dipole appearance, the depression funnel around the Internatsionalny mine will coincide with the repression spreading dome from the Western fault. In the future, the piezometric surface of the aquifer will not undergo significant changes.

Conclusion: the implementation of hydrodynamic and hydrogeological calculations made it possible to estimate the predicted total productivity of injection sites taking into account the current state of injection wells, as well as to forecast the availability of the need for handling drainage waters of the Internatsionalny mine. The predicted piezometric surface marks obtained as a result of modeling make it possible to predict the possibility of further injection of drainage brines into the Metegero-Ichersky aquifer complex.

Keywords: Mirny kimberlite field, Internatsionalnaya pipe, Metegero-Ichersky aquifer complex, modeling of the hydrodynamic regime, dewatering, injection units.

For citation: Yannikova S. A., Yannikov A. M., Struchkov A. S. Forecast of changes in the hydrodynamic regime of the Metegero-Ichersky aquifer complex during the operation of the Internatsionalnaya pipe (Western Yakutia) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2025, no. 1, pp. 113–126. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/1/113-126>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Aleksey M. Yannikov, e-mail: yannikov90@mail.ru

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

REFERENCES

1. Yannikov A. M. *Gidrogeologiya Mirninskogo kimberlitovogo polya (respublika Sakha (Yakutia))* [Hydrogeology of the Mirny kimberlite field (Republic of Sakha (Yakutia))]. Ed. A. V. Tolstov. Mirny, ALROSA publ., 2021, 238 p. (In Russ.)
2. Yannikov A. M., Bocharov V. L. K probleme ekologicheskoi bezopasnosti zakhoroneniya drenazhnykh vod rudnika «Internatsional'nyi» [The problem of environmentally safe disposal of drainage waters of the «International» mine]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya - Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 4, pp. 99–103 (In Russ.)
3. Drozdov A. V. Strukturno-tektonicheskie kriterii otsenki priemistosti massivov dlya zakhoroneniya stochnykh vod almadobyyayushchikh predpriyatiy v kriolitozone Zapadnoi Yakutii [Structural-tectonic criteria for assessing the capacity of massifs for disposal of wastewater from diamond mining enterprises in the cryolithozone of Western Yakutia]. *Kriosfera Zemli – Earth's Cryosphere*, 2006, vol. X, no. 2, pp. 27–45 (In Russ.)
4. Kolganov V. F., Akishev A. V., Drozdov A. N. *Gorno-geologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdenii almazov Yakutii* [Mining and geological features of indigenous diamond deposits in Yakutia]. Mirny, Mirny publ., 2013, 568 p. (In Russ.)
5. Klimovsky I. V., Gotovtsev S. P. *Kriolitozona Yakutskoy almanosnoy provintsiy* [Cryolithozone of the Yakut diamond-bearing province]. Novosibirsk, Nauka publ., 1994, 167 p. (In Russ.)
6. *Gidrogeologiya SSSR* [Hydrogeology of the USSR]. V.XX. Yakut ASSR. Moscow, Nedra publ., 1970, 384 p. (In Russ.)
7. Yannikov A. M., Yannikova S. A. Korepanov A. Yu. Changes in the water permeability coefficient of the metegeoric hershey aquifer within the Mirny kimberlite field (Yakutia). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya - Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 3, pp. 96–103 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.3/3655>
8. Agrinskii A. V. Rezul'taty izucheniya gidrogeologicheskikh uslovii pri razvedke odnoi iz kimberlitovykh trubok v Zapadnoi Yakutii [Results of the study of hydrogeological conditions during the exploration of one of the kimberlite pipes in Western Yakutia]. *Tr. VSEGINGEO – Proceedings of VSEGINGEO*, 1980, no. 135, pp. 48–57 (In Russ.)
9. Drozdov A. V., Iost N. A., Lobanov V. V. *Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdenii Zapadnoi Yakutii* [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, IGTU publ., 2008, 507 p. (In Russ.)
10. Yannikov A. M., Struchkova A. S. Geofiltration modeling of water flows to produced primary diamond deposits and injection in associated areas. *Geoekologiya*, 2023, no. 6, pp. 71–78 DOI: 10.31857/S0869780923060097
11. Yannikov A. M., Yannikova S. A., Korepanov A. Yu. Influence of tectonic faults on the projected advanced water reduction systems on the example of the “Yubileynaya” pipe. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*, 2022, no. 5-2, pp. 174–186. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_174.
12. 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.
13. 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, 100822, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100822>.
14. Bense V. F., Read T., Bour O., Le Borgne T., Coleman T., Krause S., Chalari A., Mondanos M., Ciocca F., Selker J. S. Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology. *Water Resour. Res.*, 2016, vol. 52, DOI: 10.1002/2016WR018869.
15. Jones D., Jones N., Greer J., Nelson J. A cloud-based MODFLOW service for aquifer management decision support. *Computers & Geosciences*, 2015, vol. 78, pp. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.02.014>.
16. Bidwell V. J. Realistic forecasting of groundwater level, based on the eigenstructure of aquifer dynamics. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2005, vol. 69, iss. 1–2, pp. 12–20, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2005.02.023>.

Янникова Светлана Александровна, науч. сотрудник, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, Республика Саха-Якутия; Российской Федерации; аспирант, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российской Федерации; e-mail: yannikovasa@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7297-0725>

Янников Алексей Михайлович, к.г.-м.н., г.н.с., Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, Республика Саха-Якутия; Российской Федерации; e-mail: yannikov90@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2169-123X>

Стручкова Агита Сергеевна, зав. сектором гидрогеологического и гидродинамического моделирования, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, Республика Саха-Якутия; Российской Федерации; e-mail: StruchkovaAS@alrosa.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7835-6048>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Svetlana A. Yannikova, research fellow, Yakutniproalmaz Institute, PJSC ALROSA, Mirny, Republic of Sakha-Yakutia, Russian Federation; postgraduate student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: yannikovasa@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7297-0725>

Aleksey M. Yannikov, PhD in Geol-Min., Chief Researcher, Institute "Yakutniproalmaz", "ALROSA" PJSC, Mirny, Republic of Sakha-Yakutia; Russian Federation; e-mail: yannikov90@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2169-123X>

Agita S. Struchkova, Head of the hydrogeological and hydrodynamic modeling sector, Institute "Yakutniproalmaz", "ALROSA" PJSC, Mirny, Republic of Sakha-Yakutia; Russian Federation; e-mail: StruchkovaAS@alrosa.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7835-6048>

Authors have read and approved the final manuscript.