

11. Старостин, В.И. Металлогения / В.И. Старостин. — М.: Изд-во КДУ, 2012. — 560.
12. Хейзен, Р. История Земли: от звездной пыли — к живой планете / Р. Хейзен. — М.: Альпина нон-фикшн, 2018. — 458 с.
13. Шарафелдин, Х.Э. Перспективы золотоносности железисто-кремнистой формации Египта и КМА / Х.Э. Шарафелдин, А.А. Верчеба, Л.Д. Оникиенко // Маркшейдерия и недропользование. — 2019. — № 3. (101). — С. 10–15.
14. Шумилин, М.В. Историческая металлогения урана (опыт глобального анализа) / М.В. Шумилин. — Иркутск: изд. ООО «Репро-центр», 2015. — 255 с.

15. Щеглов, А.Д. Генетическая модель месторождений Витватерсранд и проблема золотоносности конгломератов / А.Д. Щеглов // Отечественная геология. — 1996. — С. 47.
16. Царев, Д.И. Металлоносные псевдоконгломераты Витватерсранда / Д.И. Царев // Руды и металлы. — 2000. — № 3. — С. 70–82.

© Оникиенко Л.Д., Верчеба А.А., Соколов С.А., 2021

Оникиенко Людмила Дмитриевна

Верчеба Александр Александрович // aa_ver@mail.ru
Соколов Сергей Александрович // sokolovsa@mgri.ru

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 556.639; 556.38

Кононченко Е.В., Петраш А.Б. (ФГБУ «Гидроспецгеология»), Дорофеев А.Н. (ГК «Росатом»)

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАСКАДА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОДОЕМОВ-НАКОПИТЕЛЕЙ ПАО «ППГХО» НА КАЧЕСТВО ПОДЗЕМНЫХ ВОД, ОТБИРАЕМЫХ ВОСТОЧНО-УРУЛЮНГУЙСКИМ ВОДОЗАБОРОМ

*На основе комплексного анализа природно-техногенных условий разработана трехмерная геомиграционная модель. Доказано отсутствие на настоящее время воздействия каскада промышленных водоемов на качество подземных вод, отбираемых водозабором, и дан долгосрочный прогноз распространения загрязнения. **Ключевые слова:** промышленные водоемы-накопители, численное моделирование, миграция загрязнения, водозабор, подземные воды.*

Kononchenko E.V., Petras A.B. (Hydrospetsgeology), Dorofeev A.N. (Rosatom)

MODEL ANALYSIS OF PIMCU INDUSTRIAL NUCLEAR WASTE WET STORAGE CASCADE IMPACT ON QUALITY OF GROUNDWATER EXTRACTING BY VOSTOCHNO-URULYUNGUISKI WATER INTAKE BASED

*Based on complex analysis of natural and industrial conditions 3D solute transport model was made. Absence at present of industrial wet storage cascade impact on quality of groundwater extracting by water intake was proved and long-term forecast of contamination transport with groundwater flow was made. **Keywords:** industrial wet storage for nuclear waste, numerical modeling, solute transport, water intake, groundwater.*

Введение

Предприятие Приаргунское — производственное горно-химическое объединение (ПАО «ППГХО»), располагается в Читинской области. Промышленный

узел, включающий основные производства, г. Краснокаменск и вспомогательные предприятия функционируют с 1968 г. Единственным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Краснокаменск и горно-химического комбината является водозабор подземных вод (ПВ) Восточно-Урулюнгуйского месторождения. Он расположен в долине р. Урулюнгуй, ниже по направлению потока ПВ от всех потенциальных источников загрязнения, что ставит вопрос об оценке воздействия техногенных объектов на качество ПВ в число приоритетных. Дополнительным осложняющим фактором является практически повсеместное развитие естественных гидрохимических аномалий, в частности, по урану как в водовмещающих породах, так и в ПВ, вследствие наличия на рассматриваемой территории рудных и нерудных месторождений.

До недавнего времени вопрос техногенного воздействия на ПВ рассматривался только на уровне аналитических оценок, позволяющих сформировать представление о современном состоянии ПВ, но недостаточном для прогнозирования влияния на их качество отдельных объектов, расположенных на рассматриваемой территории.

Одним из наиболее спорных является вопрос о степени влияния на ПВ каскада промышленных водоемов-накопителей, расположенных в пади Широудукой. По мнению некоторых исследователей [1] их эксплуатация в наибольшей степени влияет как на общее поднятие уровней в пади Сухой Урулюнгуй, так и на качество ПВ с негативным прогнозом на будущее питьевого водоснабжения г. Краснокаменск. Результаты работы над данным вопросом сотрудников ФГБУ «Гидроспецгеология» [5, 13] показывают, что ореолы сульфат-иона и урана, которые являются основными индикаторами загрязнения, поступающего от каскада водоемов, весьма ограничены по площади и не могут являться прямым источником загрязнения ПВ Восточно-Урулюнгуйского месторождения.

Целью настоящей работы являлась оценка воздействия каскада промышленных водоемов на ПВ, в частности, на качество вод Восточно-Урулюнгуй-

ского месторождения с использованием методов численного моделирования. На основе анализа многолетних данных объектного мониторинга состояния недр (ОМОН), фондовых материалов и результатов ранее проведенных работ, была разработана математическая модель, позволившая воссоздать историю формирования ореолов сульфат-иона и урана в ПВ и дать модельно обоснованный прогноз их дальнейшего распространения.

Общие сведения о предприятии

ПАО «ППГХО» находится в Забайкальском крае. Основное направление деятельности предприятия включает добычу урановых руд и их переработку гидрометаллургическим способом с получением природной закиси-окиси урана. Дополнительно осуществляется добыча бурого угля и выработка серной кислоты для перерабатываемого производства. Предприятие размещается в пределах водосборного бассейна р. Урулюнгуй, на территории Стрельцовского рудного поля и пади Сухой Урулюнгуй с ее правыми притоками — малыми падами (рис. 1).

В долине р. Урулюнгуй разведано Восточно-Урулюнгуйское месторождение ПВ, которое является единственным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Краснокаменск и горно-химического комбината. Месторождение находится ниже по потоку ПВ от потенциальных источников загрязнения.

Наличие на изучаемой территории рудных и нерудных месторождений является причиной практически повсеместного развития естественных гидрохимических аномалий. Естественный фон территории характеризуется повышенными концентрациями урана, свинца, молибдена и фтора в водовмещающих породах и ПВ.

Одним из основных техногенных источников химического и радиоактивного загрязнения ПВ на территории предприятия является каскад промышленных водоемов (хвосто-

хранилища (ХХ) «Верхнее» и «Среднее» гидрометаллургического завода, а также огаркохранилище (ОХ) сернокислотного цеха), которые размещаются в пади Широндукуй (рис. 1, 2).

Геологическое строение и гидрогеологические условия территории

Рассматриваемая территория находится в пределах Восточно-Урулюнгуйской межгорной впадины и ее горного обрамления. Геологическое строение характеризуется наличием двух структурных этажей (рис. 2, 3). Нижний структурный этаж (фундамент) представлен разновозрастными интрузивными и метаморфическими породами. В верхней части скальных пород выделяются также отложения древней коры выветривания. Верхний структурный этаж сложен мезозойскими (юрскими и меловыми) вулканогенными и

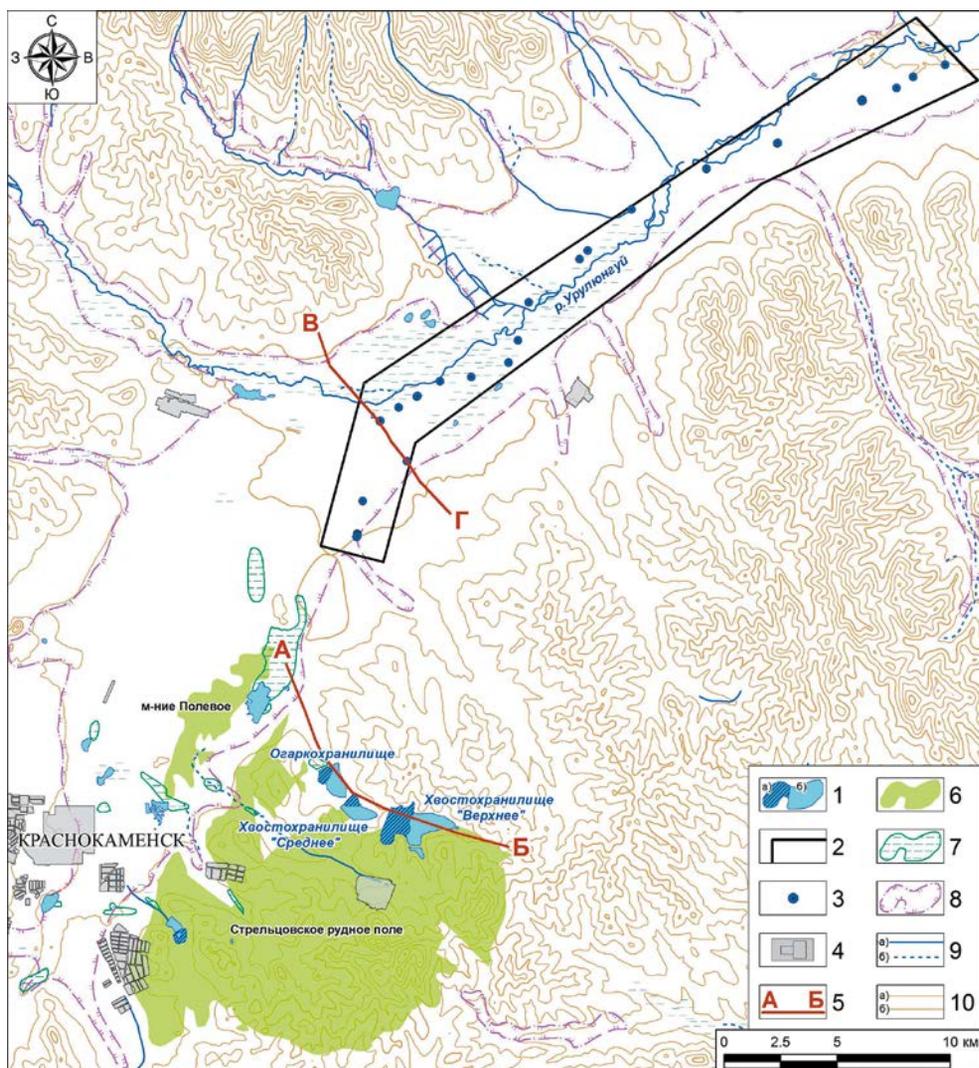


Рис. 1. Схематическая карта расположения объектов ПАО «ППГХО» и Восточно-Урулюнгуйского водозабора: 1 — водоемы (а) и их засыпанные части (б); 2 — граница 1-го пояса зоны санитарной охраны (ЗСО) Восточно-Урулюнгуйского водозабора подземных вод; 3 — водозаборные скважины; 4 — контуры населенных пунктов, районов; 5 — линии схематических гидрогеологических разрезов; 6 — природные источники радиоактивного загрязнения подземных вод; 7 — заболоченные области; 8 — область распространения современных ММП; 9 — водотоки: а) — постоянные, б) — временные; 10 — изолинии рельефа по ЦМР: а) — основные с шагом 200 м, б) — дополнительные с шагом 40 м

осадочными (терригенными) породами, а также неогеновыми и четвертичными отложениями различных генетических типов.

В долине р. Урулюнгуй развиты многолетнемерзлые породы (ММП) (рис. 1). В осевой части доли-

ны они характеризуются наибольшей мощностью (до 20 м), образуя полосу шириной 1–3 км.

На изучаемой территории выделяется несколько водоносных комплексов (ВК) по типам водовмещающих пород. Для неоген-четвертичного ВК водовме-

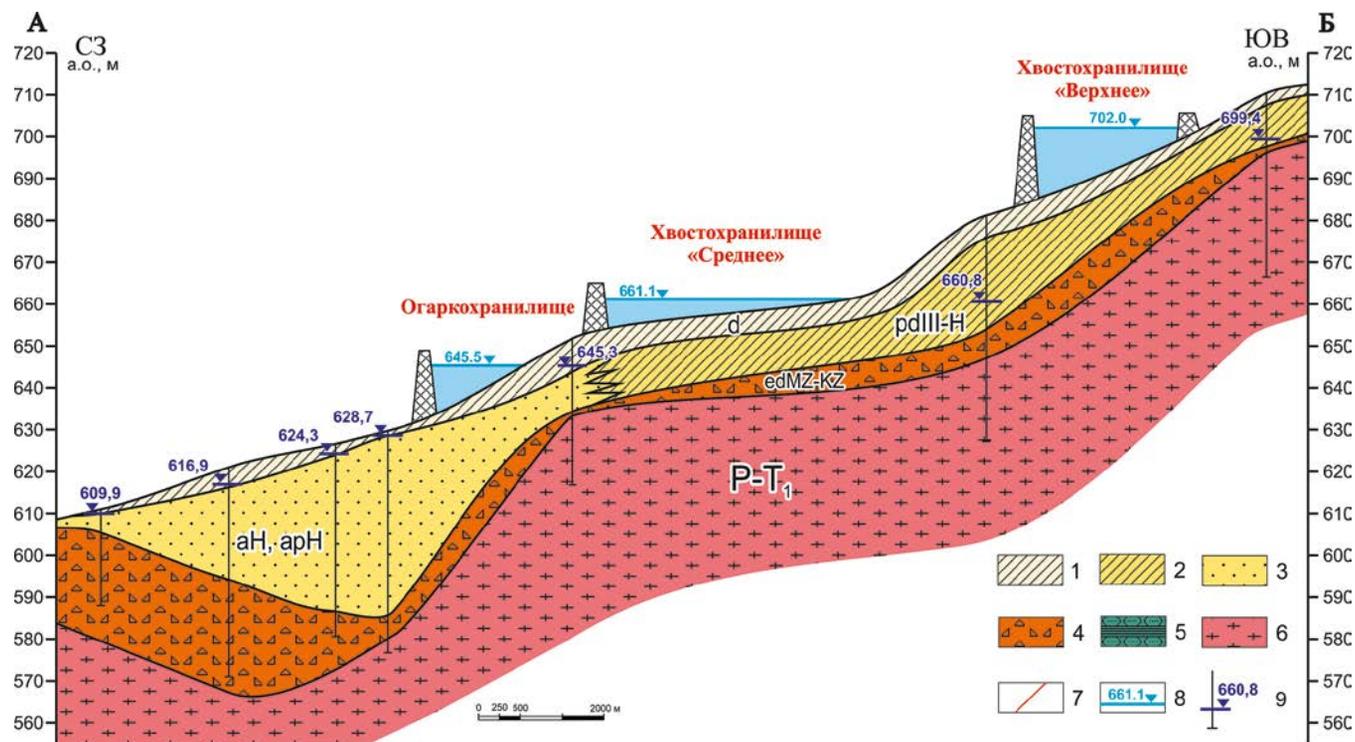


Рис. 2. Схематический гидрогеологический разрез по линии А-Б: 1–3 — четвертичные отложения: 1 — нерасчлененные делювиальные отложения (суглинки, супеси, глины, пески со щебнем и дресвой); 2 — голоцен-неоплейстоценовые пролювиально-делювиальные отложения (суглинки с дресвой и прослоями песка, глины); 3 — голоценовые аллювиальные, аллювиально-пролювиальные отложения пойм и падей (пески, галечники с валунами и щебнем, суглинки, супеси с дресвой и щебнем); 4 — мезозой-кайнозойские отложения древней коры выветривания (щебень и дресва материнских пород с супесчаным или глинистым заполнителем, суглинки и глины дресвянистые); 5 — меловая система (переслаивающиеся алевролиты, аргиллиты, песчаники, гравелиты, конгломераты); 6 — пермь-ранний триас (граниты, крупнозернистые, выветрелые, сильно трещиноватые); 7 — тектонические разломы; 8 — среднемноголетнее значение абсолютной отметки уровня промышленных водоемов за период 1977–2018 гг., м; 9 — скважина, сбоку — среднемноголетнее значение абсолютной отметки УПВ за период 1973–2018 гг., м

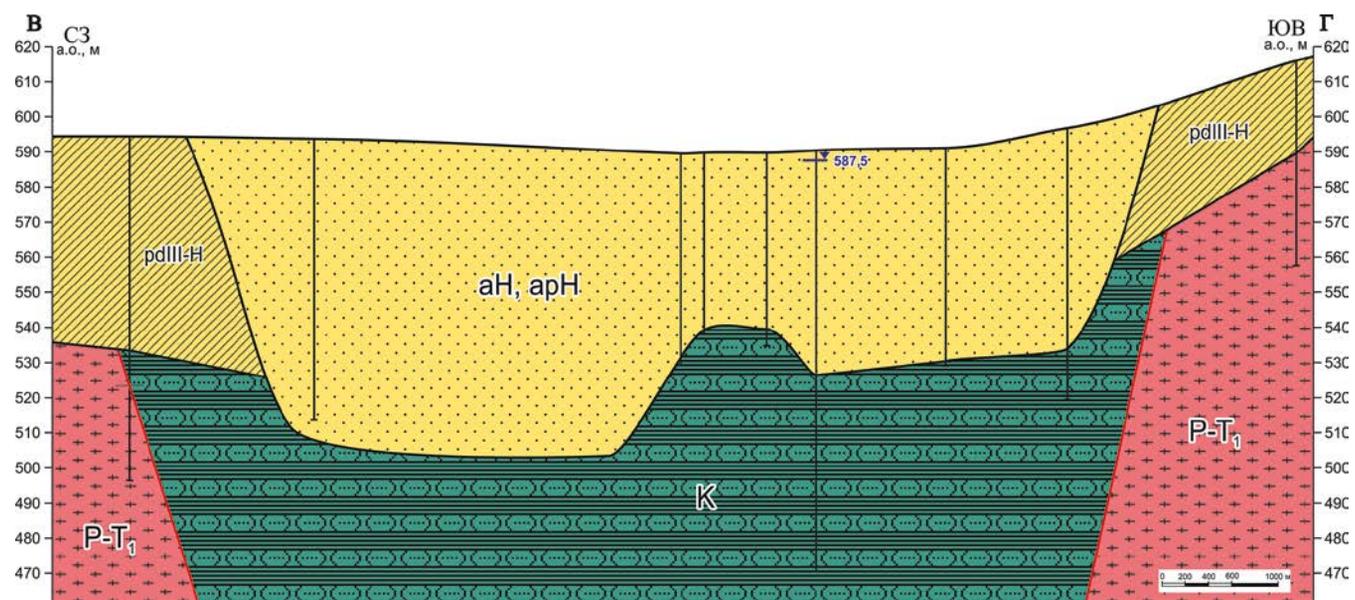


Рис. 3. Схематический гидрогеологический разрез по линии В-Г: условные обозначения приведены на рис. 2

щающими породами являются пески и песчано-гравийные отложения, которые тяготеют к центральной части пади Сухой Урулюнгуй. Вблизи бортов в разрезе преобладают глинистые породы (рис. 3). Максимальные суммарные мощности обводненных пород составляют около 40–60 м.

Неоген-четвертичный ВК в пределах Восточно-Урулюнгуйской впадины подстилается нижнемеловым, а на бортах граничит с юрским ВК, а также палеозойским и верхнепротерозойским ВК трещинных и трещинно-жильных ПВ.

Характеристика каскада промышленных водоемов как источников техногенного воздействия на подземные воды

Каскад промышленных водоемов: два ХХ и ОХ, располагается в пади Широндукуй (рис. 4). Заполнение хранилищ началось в 1976 г. (ХХ «Верхнее» и ОХ) и в 1991 г. (ХХ «Среднее») (рис. 5) и повлекло за собой значительное (до 20 м) поднятие уровня подземных вод (УПВ) в пади Широндукуй, что подтверждается данными ОМСН (рис. 6). Как следствие, функционирование каскада водоемов в совокупности с другими объектами ПАО «ППГХО» вызвало также увеличение УПВ в пади Сухой Урулюнгуй [5].

По данным ОМСН за время эксплуатации хранилищ минерализация жидкой фазы составляла от 1,2 до 25 г/л. При этом преобладающим компонентом в химическом составе являлся сульфат-ион. Концентрации урана в жидкой фазе изменялись в широких пределах (от 0,002 до 12 мг/л при предельно допустимой концентрации (ПДК), равной 0,015 мг/л [3]). Средние значения содержания компонента составляли 0,8–1,8 мг/л. Удельные активности радионуклидов, таких как ^{230}Th , ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{226}Ra , в водоемах были сопоставимы и систематически превышали уровни вмешательства (УВ) НРБ-99/2009 для питьевых вод [7].

Результаты гидрогеологического мониторинга по наблюдательным скважинам пади Широндукуй

В настоящее время сеть наблюдательных скважин в пади Широндукуй оборудована от восточной оконечности ХХ «Верхнее» до устья пади (рис. 4). Также имеется несколько скважин, расположенных в пади Сухой Урулюнгуй, ниже по потоку ПВ от каскада водоемов.

На начальном этапе промышленной деятельности, до создания хранилищ, в падь Широндукуй в течение 10 лет проводился

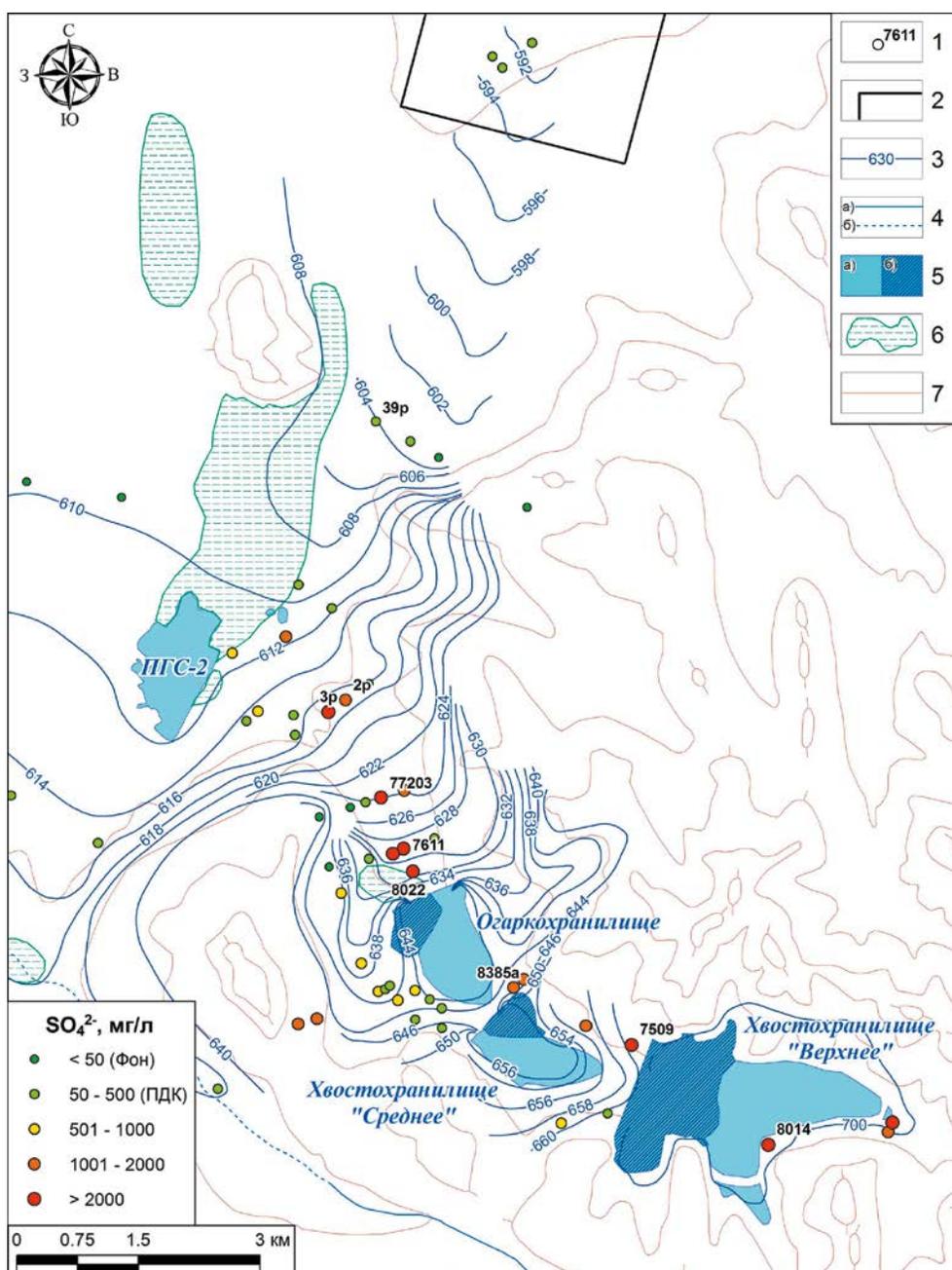


Рис. 4. Среднемноголетние концентрации сульфат-иона в подземных водах (за 2000–2018 гг.): 1 — наблюдательные скважины и их номера; 2 — граница 1-го пояса ЗСО Восточно-Урулюнгуйского водозабора подземных вод; 3 — гидроизогипсы водоносного комплекса четвертичных отложений с шагом 2 м; 4 — водотоки: а) — постоянные, б) — временные; 5 — водоемы (а) и их засыпанные части (б); 6 — заболоченные области; 7 — изолинии рельефа по ЦМР с шагом 20 м

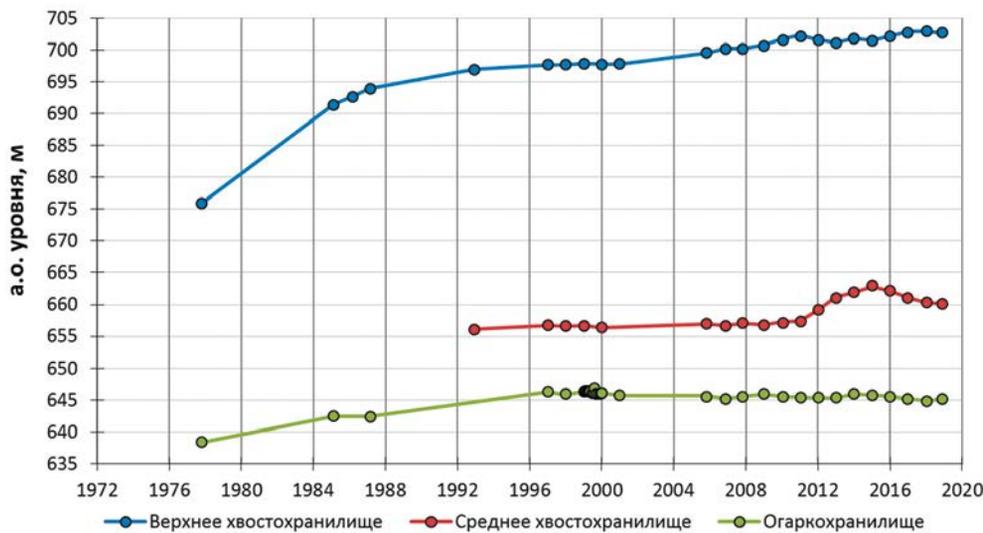


Рис. 5. Режим уровней в каскаде промышленных водоемов

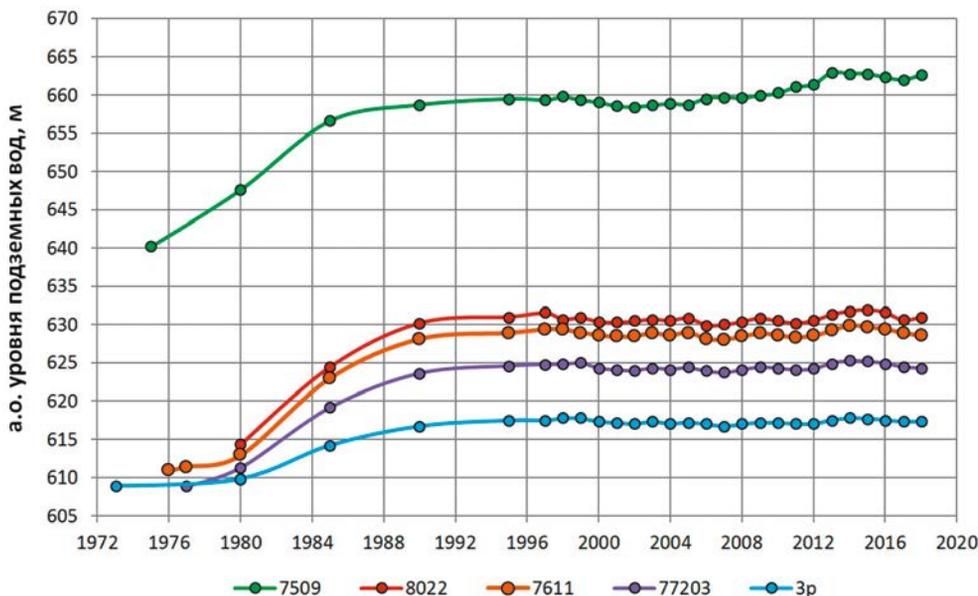


Рис. 6. Режим УПВ в скважинах пади Широндукуй за период 1973–2018 гг.

сброс шахтных сточных вод. В результате в ней существовал постоянный поверхностный сток, доходивший до пади Сухой Урулюнгуи и образующий заболоченность (рис. 1). Объем сбрасываемой воды достигал $2,4 \times 10^6$ м³/год, а состав, в частности, характеризовался концентрацией урана 0,1–4,9 мг/л (7–327 ПДК).

Таким образом, загрязнение ПВ пади Широндукуй началось еще до ввода в эксплуатацию каскада промышленных водоемов. После запуска хранилищ к нему также добавилось поступление загрязнения за счет фильтрационных потерь из них, что видно по результатам ОМСН (рис. 7).

Для обобщенного анализа химического загрязнения в качестве индикатора был выбран сульфат-ион, поскольку его содержание максимально как в хранилищах, так и в ПВ. Индикатором радиоактивного загрязнения принят уран, который характеризуется

наибольшей миграционной способностью среди перечня радионуклидов в составе жидкой фазы водоемов, а также длительным периодом полураспада.

В качестве фоновых значений принят состав вод Восточно-Урулюнгуйского месторождения, определенный во время разведочных работ в 1966–1968 гг. Для сульфат-иона фон принят на уровне 50 мг/л, для урана — 0,04 мг/л, что выше ПДК в 2,6 раза.

Анализ данных ОМСН показывает, что максимальные концентрации сульфат-иона приурочены к скважинам в осевой части пади Широндукуй (рис. 4), в которой происходит преимущественная миграция загрязнения. Режим концентраций сульфат-иона в наблюдательных скважинах (рис. 8) свидетельствует о продвижении ореола загрязнения вниз по потоку ПВ в пади Широндукуй, что выражается в последовательном снижении концентраций.

Для режима концентраций урана в ПВ описанных выше закономерностей не выявлено. В скважинах, расположенных ниже по потоку ПВ от водоемов, повышенные по отношению к фону содержания

урана (до 0,6 мг/л) наблюдались еще до подъема УПВ, вызванного заполнением хранилищ, что, вероятно, связано с образованием вторичных источников загрязнения за счет сброса шахтных вод в падь Широндукуй.

Восточно-Урулюнгуйское месторождение подземных вод

К отложениям Восточно-Урулюнгуйской впадины приурочен артезианский бассейн пресных ПВ. Основные запасы сосредоточены в неоген-четвертичном комплексе пластово-поровых вод (рис. 3). В 1966 г. в межгорной впадине разведано и оценено Восточно-Урулюнгуйское месторождение ПВ, которое является единственным источником питьевых вод в данном районе. В 2013 г. организацией ФГБУ «Гидроспецгеология» выполнены работы по переоценке запасов месторождения. Запасы ПВ оценены в количестве

54,8 тыс. м³/сут, в том числе 22,4 тыс. м³/сут для хозяйственно-питьевого водоснабжения, на расчетный срок 25 лет.

Восточно-Урулунгуйское месторождение ПВ находится ниже по потоку от всех потенциальных источников загрязнения. В соответствии с действующими нормами для питьевых вод [2, 3, 6, 7] была проведена оценка качества ПВ.

По данным ОМСН минерализация ПВ изменяется от нескольких до 975 мг/л при средних значениях

350 мг/л (ПДК = 1000 мг/л). Концентрация сульфат-иона в ПВ колеблется от нескольких до 488 мг/л, не превышая ПДК (500 мг/л). Превышения нормативов фиксируются по содержаниям фторидов, урана, марганца, молибдена, свинца и железа общего (табл. 1). Для содержаний фторидов и урана характерны практически постоянные превышения ПДК в большинстве скважин. Кроме того, частые превышения УВ наблюдаются по удельным активностям Рb²¹⁰ и Po²¹⁰, эпизодические — по Th²³⁰.

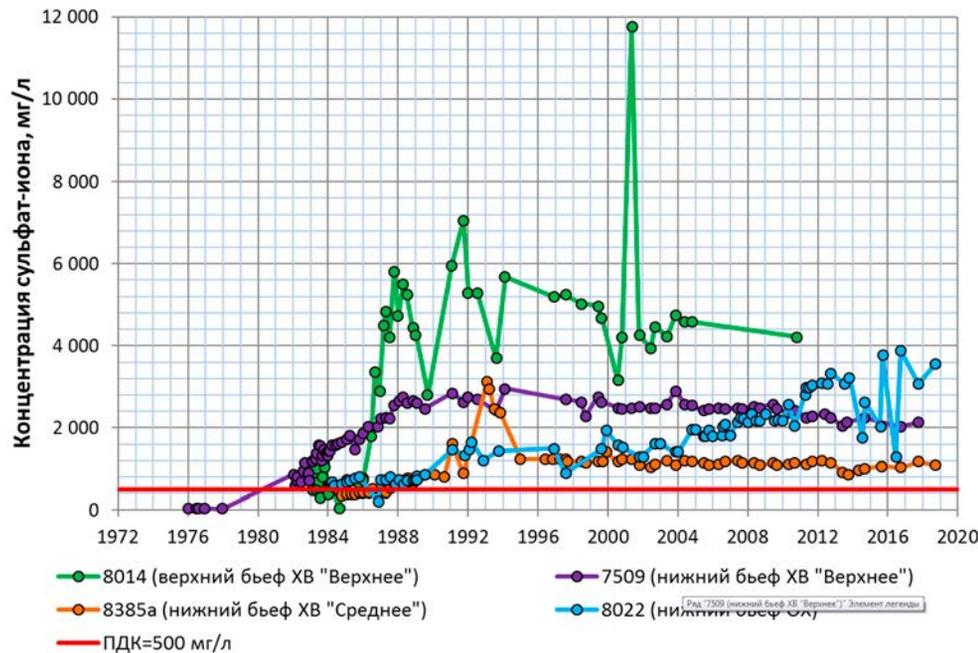


Рис. 7. Режим концентраций сульфат-иона в наблюдательных скважинах вблизи промышленных водоемов

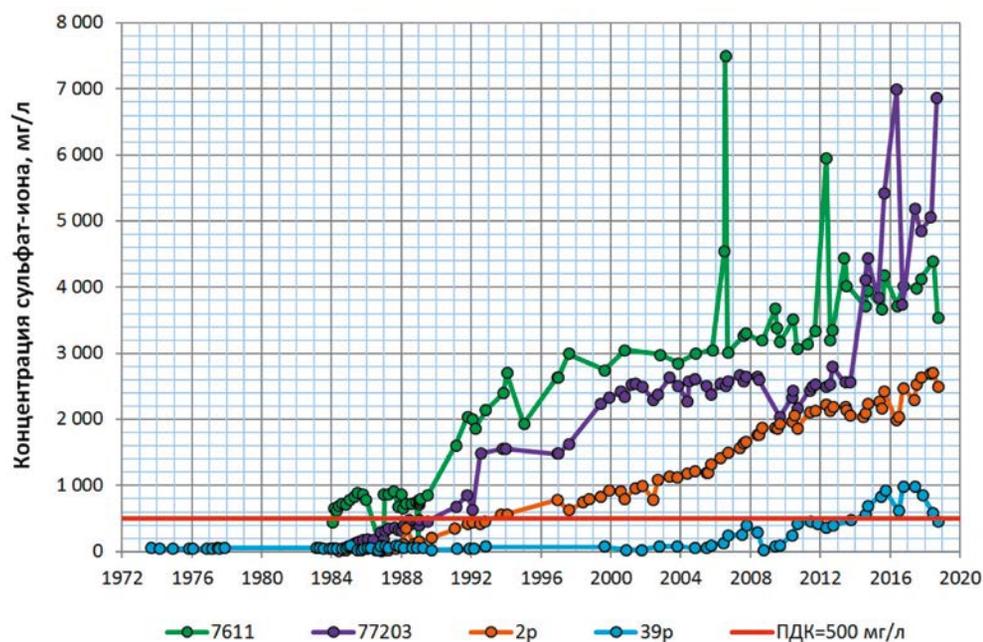


Рис. 8. Режим концентраций сульфат-иона в наблюдательных скважинах вниз по потоку подземных вод от каскада промышленных водоемов

В скважинах, расположенных в южной части водозабора (рис. 1), ближе всего к техногенным источникам загрязнения, фиксируемые содержания компонентов и активности радионуклидов в целом не отличаются от таковых в других скважинах, без тенденций к возрастанию. Таким образом, в скважинах южной части водозабора выявленные в ходе мониторинга превышения нормативов, вероятно, обусловлены природным фоном, а не техногенным загрязнением, поступающим от объектов предприятия.

Разработка геологической модели

Для определения размеров и динамики ореолов загрязнения, формирующихся от каскада промышленных водоемов ниже по течению ПВ в пади Широудкуй и далее в пади Сухой Урулунгуй (рис. 1), и оценки возможного влияния водоемов на качество ПВ, отбираемых Восточно-Урулунгуйским водозабором, разработана математическая модель. Процесс моделирования включал в себя последовательное создание геологической, геофильтрационной и далее геомиграционных моделей с использованием программного комплекса GMS [10].

Разработка моделей проводилась для зоны полного водонасыщения, без учета миграции загрязнения в зоне аэрации, поскольку при заполнении водоемов

Содержание компонентов, превышающих нормативы, в подземных водах Восточно-Урулюнгуйского месторождения

Химический состав (за период 1983–2018 гг.)			
Показатель	Разброс концентраций, мг/л	Среднегоголетние концентрации, мг/л	ПДК, мг/л
Сульфаты	<1–488	63,2	500 [6]
Фториды	0,02–7,02	1,45	1,5 [2]
Уран	<п.о.–0,3	0,03	0,015 [3]
Марганец	<п.о.–2,28	0,067	0,1 [2]
Молибден	<п.о.–0,6	0,067	0,07 [3]
Свинец	<п.о.–0,1	0,005	0,01 [2]
Железо общее	<п.о.–2,2	0,05	0,3 [6]
Радиохимический состав (за период 2001–2018 гг.)			
Показатель	Разброс удельных активностей, Бк/кг	Среднегоголетние удельные активности, Бк/кг	УВ, Бк/кг [7]
Pb ²¹⁰	0,03–0,64	0,22	0,2
Po ²¹⁰	0,01–0,56	0,13	0,11
Ra ²²⁶	0,005–0,31	0,05	0,49
Th ²³⁰	0,03–0,97	0,36	0,65

Примечание: <п.о. — ниже предела обнаружения

под ними за короткое время сформировались купола растекания фильтрующихся промстоков, о чем говорит повышение УПВ в окружающих скважинах (рис. 6).

лечных и супесчаных отложений с подчиненным значением суглинистых и глинистых, отложения относились к МС 1, в противном случае — к МС 2. Отложения

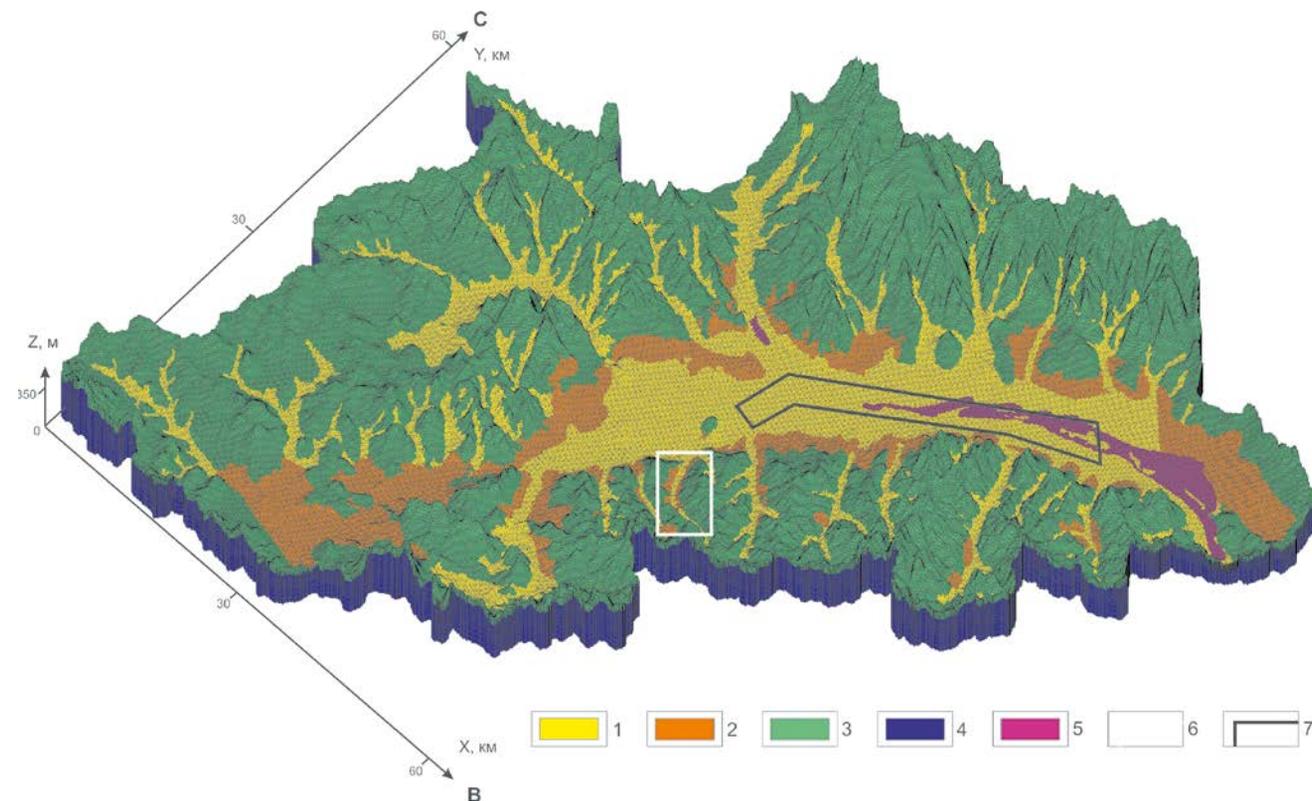


Рис. 9. Цифровая трехмерная геологическая модель долины р. Урулюнгуй: 1–5 – модельные слои: 1 — относительно более проницаемые отложения четвертичной системы; 2 — относительно менее проницаемые отложения четвертичной системы; 3 — отложения древней коры выветривания (*edMZ-KZ*); 4 — докайнозойские отложения (*PR-MZ*); 5 — ММП, распространенные в русле р. Урулюнгуй; 6 — область расположения каскада промышленных водоемов в пади Широндукуй; 7 — граница 1-го пояса ЗСО Восточно-Урулюнгуйского водозабора подземных вод

МС 1 распространены преимущественно по долинам падей, руслам ручьев и рек, а отложения МС 2 — под МС 1 в малых падах (например, пади Широндукуй) и по бортам пади Сухой Урулюнгуй. Мощности МС 1 и 2 доходят до 50–60 и до 40 м соответственно. В пределах МС 1 выделен также слой ММП, имеющий ограниченное распространение в русле р. Урулюнгуй, с коэффициентом фильтрации 1×10^{-3} м/сут.

МС 3 представлен отложениями древней коры выветривания (edMZ-KZ), которые сложены дресвянощепнистым материалом с супесчаным или глинистым заполнителем, суглинками и глинами. Слой имеет мощность 15–20 м. К МС 4 отнесены докайнозойские породы (PR-MZ). Их мощность принята равной от 100 м (в пади Сухой Урулюнгуй) до 300 м.

При создании ГМ в качестве поверхности, ограничивающей ее сверху, использована цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная на основе разномасштабной топографической информации. В качестве нижней непроницаемой границы модели принята подошва МС 5.

Разработка и калибровка геофильтрационной модели

На основе ГМ разработана геофильтрационная модель (ГФМ). Для проведения расчетов ГМ была разбита на 18 расчетных слоев. В плане разбивка осуществлялась с равномерным шагом, с размером ячеек 150×150 м. Средняя мощность ячеек для верхних слоев, где происходит преимущественная миграция загрязнения, составляет около 6 м. Общее количество расчетных ячеек модели превышает 6,5 млн.

Необходимо пояснить, что количество расчетных слоев на всей области модели постоянно и все они имеют ненулевую мощность. Данная особенность свя-

зана с использованием метода конечных разностей [9]. В результате слои ГМ, некоторые из которых имеют зоны выклинивания и распространены на ограниченной площади (см. рис. 9), были «встроены» в расчетную сетку. При этом в одном расчетном слое могут быть ячейки, относящиеся к различным МС.

Область моделирования включает в себя Восточно-Урулюнгуйскую впадину, в пределах которой находится большая часть производственного комплекса предприятия, Восточно-Урулюнгуйский водозабор и г. Краснокаменск, а также два малых водосборных бассейна: расположенную на юго-западе Умыкейскую бессточную котловину и находящийся на западе бассейн, питающий р. Уругуй (рис. 10).

Основными источниками питания геофильтрационного потока на изучаемой территории являются естественное инфильтрационное питание, а также утечки воды из ряда техногенных и природных водоемов.

Оценка естественного инфильтрационного питания проводилась путем анализа закономерностей трансформации атмосферных осадков в сток (поверхностный и подземный) с использованием зависимости Фу [12], а также с помощью моделирования в программе Surfbal по методике, описанной в работах [4, 8]. Расчеты проводились автором методики С.П. Поздняковым с учетом метеоклиматических условий территории и ее ландшафта, а также существенной расчлененности рельефа с перепадами высот около 600 м. Их результаты показали, что инфильтрация при глубинах залегания УПВ более 3 м составляет от 15–20 до 70 мм/год в зависимости от высотной отметки участка.

В целом исследуемый район относится к зоне с недостаточным увлажнением, поскольку испаряемость

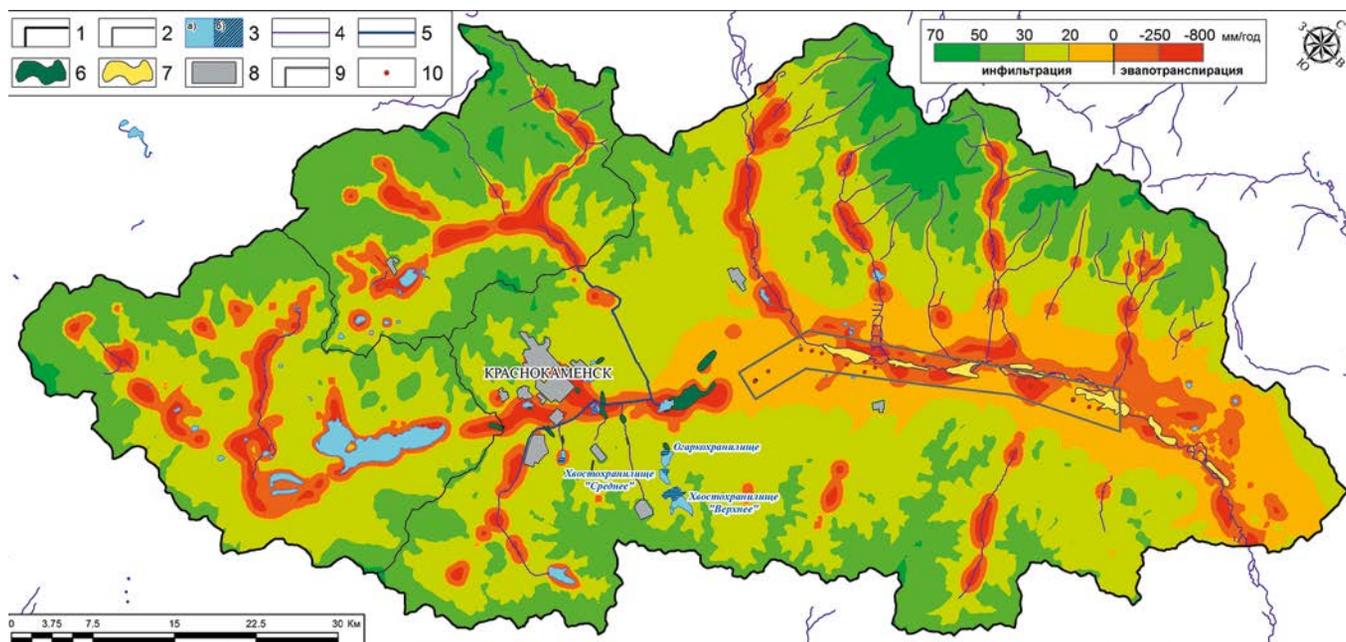


Рис. 10. Геофильтрационная схема области моделирования: 1 — границы области моделирования; 2 — границы малых водосборных бассейнов; 3 — водоемы (а) и их засыпанные части (б); 4 — водотоки; 5 — магистральные каналы; 6 — заболоченные области; 7 — области разгрузки; талики в пределах водозабора; 8 — контуры населенных пунктов; 9 — граница 1-го пояса ЗСО Восточно-Урулюнгуйского водозабора подземных вод; 10 — водозаборные скважины

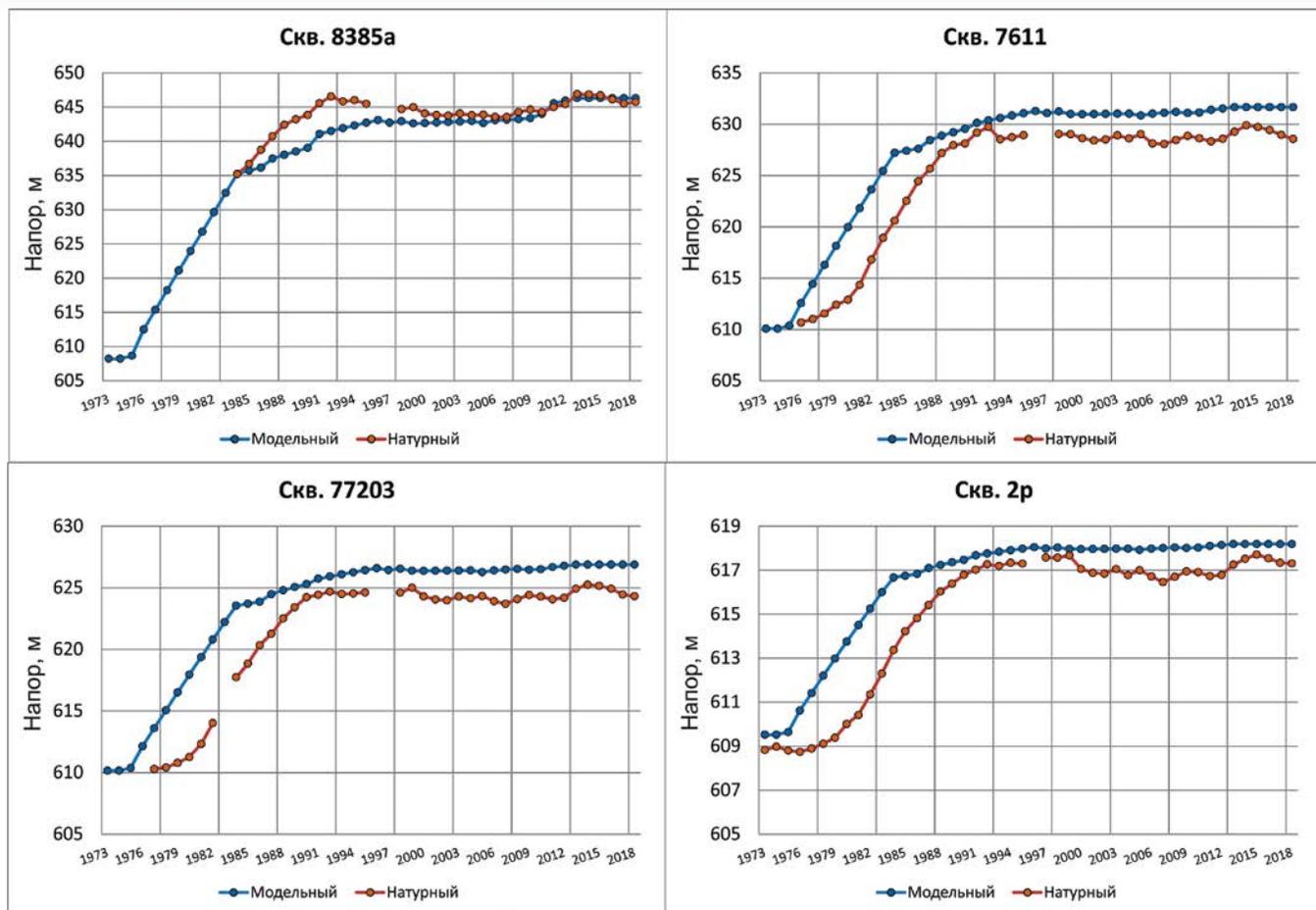


Рис. 11. Графики сравнения модельных и натуральных напоров в наблюдательных скважинах (для верификации геофильтрационной модели в нестационарной постановке)

(около 800 мм/год) существенно превышает норму осадков (около 320 мм/год). На карте инфильтрационного питания, полученной по результатам моделирования, видно, что в осевой части пади Сухой Урулюнгуи и в малых падах, где УПВ залегают неглубоко, преобладают процессы эвапотранспирации с зеркала грунтовых вод (см. рис. 10). На остальной части территории происходит питание ПВ.

При моделировании учитывалось время начала эксплуатации промышленных водоемов и изменение их уровней, а также формирование воронки депрессии за счет работы систем водопонижения при добыче урановых руд на Стрельцовском рудном поле. Начальные коэффициенты фильтрации отложений 4-х МС (кроме слоя ММП) задавались на основе осредненных данных, полученных по результатам опытно-фильтрационных работ, и далее подбирались в процессе калибровки модели по УПВ. В качестве параметров ГФМ также калибровались фильтрационные характеристики донных отложений водотоков и водоемов, а также зоны повышенного инфильтрационного питания в пределах г. Краснокаменск и дачных территорий.

Режим геофильтрационного потока ПВ при моделировании рассматривался как нестационарный. Для калибровки параметров ГФМ выделен период времени (2000–2018 гг.), когда наблюдалась относительная

стабилизация УПВ и режим потока можно было принять квазистационарным (рис. 6). Калибровка модели основывалась на осредненных значениях УПВ по 165 наблюдательным скважинам.

После калибровки модели при стационарном режиме геофильтрационного потока для участка пади Ширандукуй дополнительно проведена ее верификация в нестационарной постановке. Для этого использованы данные режима УПВ по скважинам осевой части пади (рис. 11).

Геомиграционное моделирование распространения загрязнения от каскада промышленных водоемов

На базе нестационарной ГФМ разработаны модели миграции загрязнения, поступающего в ПВ с фильтрационными потерями из водоемов-накопителей. В качестве индикаторов химического и радиоактивного загрязнения рассмотрены сульфат-ион и уран. Концентрации компонентов в хранилищах задавались по данным ОМСН. При моделировании учитывался перенос загрязнения с фильтрационным потоком, а также процессы диффузии и дисперсии. Для уранового загрязнения также учитывались процессы сорбции и радиоактивного распада.

Коэффициент распределения урана в системе поровая вода – водовмещающая порода принят близким к минимальному согласно [11] и составил 5×10^{-4} м³/кг.

При этом учитывались среднегодовые значения рН (6,5–8,5) ПВ в скважинах пади Широндукуй, поскольку при увеличении рН > 8 сорбция урана понижается.

Калибровка параметров геомиграционной модели (активной пористости и продольной дисперсивности отложений) осуществлялась по ряду скважин, расположенных в осевой части пади Широндукуй, с целью достижения максимальной сходимости модельных и натуральных концентраций сульфат-иона (рис. 12). Полученные отклонения модельных концентраций от натуральных, по-видимому, обусловлены численной дисперсией, а также неполнотой фактических данных о режиме работы систем водопонижения на Стрельцовском рудном поле.

Благодаря длительным временным рядам наблюдений системы ОМСН и отсутствию других источников загрязнения сульфат-ионом, которые могли бы повлиять на результаты мониторинга, модельные параметры были откалиброваны не только по данным режимных наблюдений за УПВ, но и по концентрациям сульфат-иона, что значительно повысило точность расчетов. В результате стало возможным провести расчеты распространения ореолов урана, формирующихся от каскада водоемов, что было бы затруднительно без предварительной калибровки параметров модели, вследствие

повышенных фоновых концентраций радионуклида и наличия вторичных источников загрязнения.

На основе верифицированной модели рассчитаны современные ореолы сульфат-иона (рис. 13) и урана. Ореолы загрязнения от ХХ «Верхнее» обособлены и радиально расходятся от источника. Ореолы от ХХ «Среднее» имеют вытянутую форму в южном направлении. Такая форма ореолов связана с наличием депрессионной воронки, сформировавшейся за счет работы водопонижительных систем Стрельцовского рудного поля, которые перехватывают геофильтрационный поток в верхней части пади Широндукуй. Вместе с ним перехватывается весь ореол загрязнения от ХХ «Верхнее» и большая часть ореола от ХХ «Среднее». Таким образом, эти хранилища практически не участвуют в формировании ореолов сульфат-иона и урана, распространяющихся в низовьях пади Широндукуй, а основной вклад вносит ОХ.

Моделирование показало, что к настоящему времени ореол сульфат-иона достигает юго-восточной оконечности заболоченного участка от карьера ПГС-2 (рис. 13) и не оказывает влияния на качество воды в скважинах Восточно-Урулюнгуйского водозабора. Тот же вывод можно сделать и относительно ореола урана, размеры которого в плане заметно меньше по сравнению с ореолом сульфат-иона вследствие сорбции

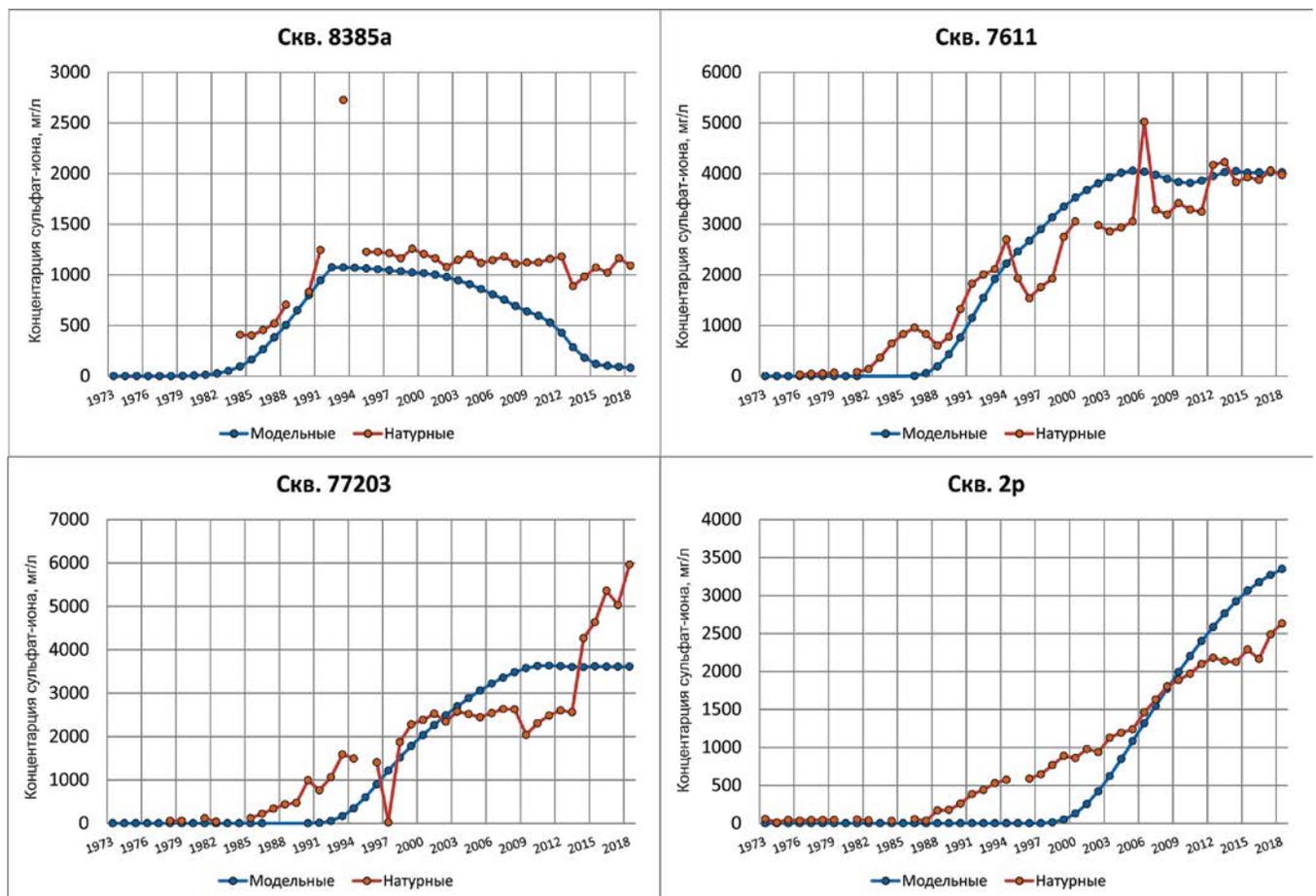


Рис. 12. Графики сравнения модельных и натуральных концентраций сульфат-иона в наблюдательных скважинах пади Широндукуй

урана водовмещающими породами. В частности, ореол урана от ОХ в границах фона (0,04 мг/л) к настоящему времени продвинулся вниз по потоку ПВ на расстояние не более 1,2 км.

Прогнозные расчеты миграции загрязнения в ПВ проведены по нескольким сценариям. При сохранении существующих условий эксплуатации каскада водоемов и работы водопонижительных систем будет происходить увеличение размеров ореолов загрязнения. В течение 100 лет ореол сульфат-иона распространится по потоку ПВ ориентировочно на 4–5 км в

сторону водозабора, но не достигнет его. Ореол урана за 100 лет достигнет юго-восточной оконечности заболоченного участка.

Отдельно был рассмотрен сценарий прогнозного моделирования при условии прекращения работы водопонижительных систем на Стрельцовском рудном поле. В таком сценарии прогнозные ореолы загрязнения от ХХ «Верхнее» и частично от ХХ «Среднее» перестают перехватываться системой водопонижения и начинают распространяться вниз по потоку ПВ вдоль пади Широндукуй вместе с ореолом от ОХ.

По прогнозным расчетам на 100 лет данные изменения не вызывают ускорения продвижения фронтальных частей ореолов к водозабору, а только меняют конфигурацию ореолов в районе каскада водоемов.

Для прогнозных геомиграционных расчетов также рассмотрен сценарий, учитывающий планируемые вывод из эксплуатации каскада водоемов и прекращение работы водопонижительных систем на Стрельцовском рудном поле. Расчеты проведены на срок 10 000 лет. Результаты моделирования показали, что ореолы сульфат-иона и урана при отсутствии источников загрязнения начинают постепенно деградировать за счет разбавления в потоке ПВ и не достигают водозабора. К концу расчетного периода ореол урана практически полностью деградирует до фоновых концентраций.

Заключение

Использование методов численного моделирования позволило воссоздать историю формирования гидродинамической обстановки в пади Широндукуй и на прилегающей территории. Проведенные геомиграционные расчеты подтвердили выводы об отсутствии химического и радиационного влияния каскада водоемов на качество ПВ, отбираемых Восточно-Урулюнгийским водозабором, отбираемых

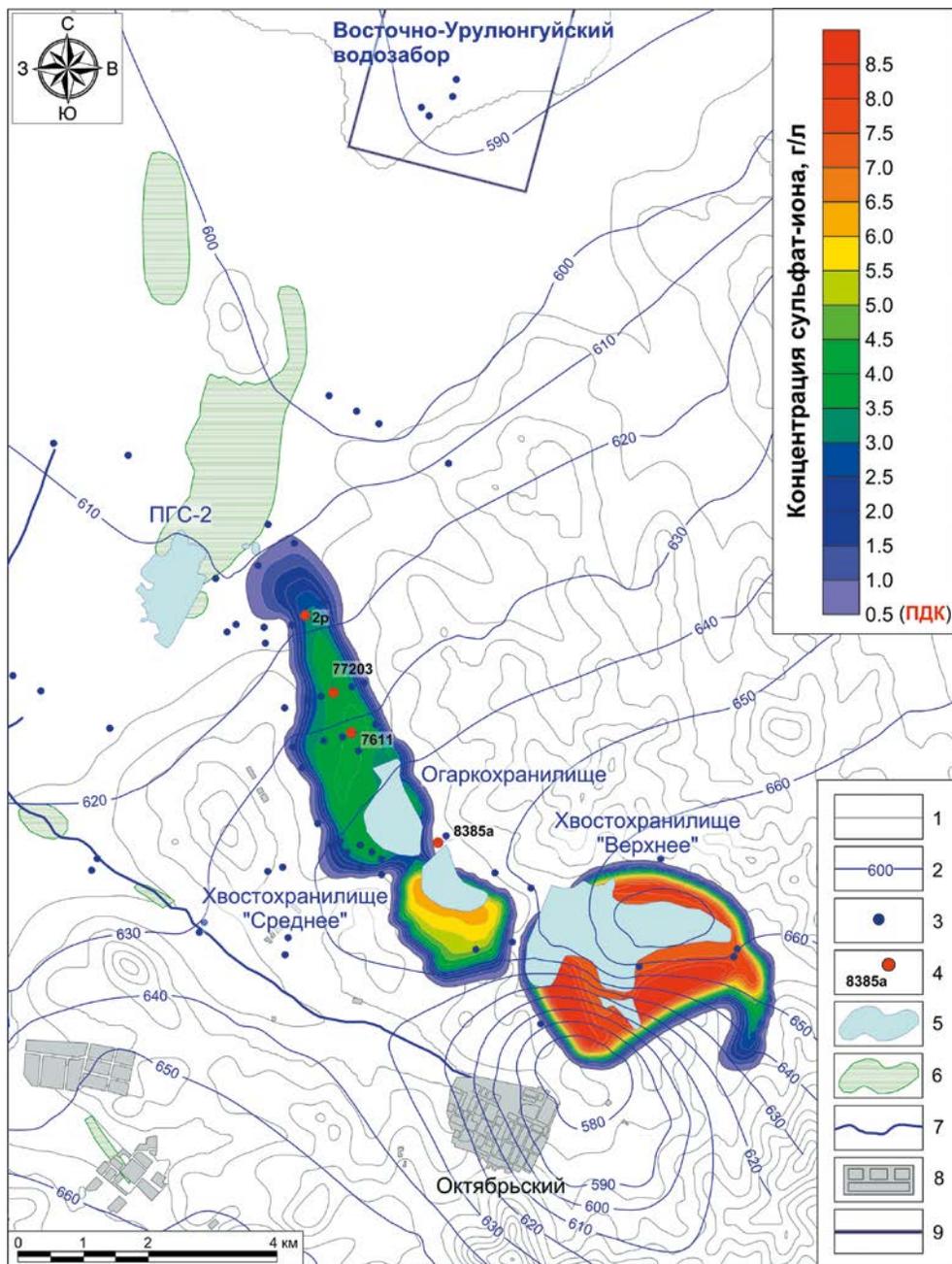


Рис. 13. Эпигнозный модельный ореол сульфат-иона на 2018 г.: 1 — изолинии рельефа с шагом 25 м; 2 — модельные гидроизогипсы с шагом 10 м; 3 — наблюдательные скважины; 4 — наблюдательные скважины, использовавшиеся для верификации модельных данных, и их номера; 5 — водоемы; 6 — заболоченные области; 7 — водотоки; 8 — контуры населенных пунктов, районов; 9 — граница 1-го пояса ЗСО Восточно-Урулюнгийского водозабора подземных вод

и позволили дать долгосрочный прогноз распространения ореолов загрязнения для наиболее вероятных сценариев изменения гидродинамической обстановки. Расчеты показали, что эксплуатация каскада водоемов в течение планируемых сроков не скажется на качестве вод питьевого водозабора.

Следует отметить, что математическая модель создавалась как постоянно действующая, что предполагает возможность ее развития с учетом изменения природно-техногенных условий рассматриваемой территории и появления новых данных ОМСН. Основой математической модели стала детально проработанная ГМ, охватывающая территорию размещения не только каскада водоемов в пади Широндукуй, но и остальных техногенных и природных объектов, находящихся в пределах рассматриваемого водосборного бассейна. Созданная на ее основе ГФМ позволила учесть все основные факторы формирования потока ПВ. В результате разработанную математическую модель можно в дальнейшем использовать для проведения расчетов по оценке влияния других объектов, находящихся в области моделирования как на формирование потока ПВ, так и на их качество.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Верхотуров, Г.Г.* Изменение состава подземных вод в районе г. Краснокаменск как результат хозяйственного освоения территории / Г.Г. Верхотуров, А.Г. Верхотуров // Вестник ТГУ. — 2014. — Т. 19. — Вып.5. — С. 1650–1654.
2. *ГН 2.1.5.1315-03* Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

3. *ГН 2.1.5.2280-07* Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315-03.
4. *Гриневский, С.О.* Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей / С.О. Гриневский, С.П. Поздняков // Водные ресурсы. — 2010. — Т. 37. — № 5. — С. 543–557.
5. *Климова, Т.И.* Влияние природных и техногенных факторов на подтопление территории пади Сухой Урулюнгуй / Т.И. Климова, Е.Б. Севтинова, Л.Я. Максимова // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 10. — С. 82–87.
6. *СанПиН 2.1.4.1074-01* Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения.
7. *Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523—09.* Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
8. *Шестаков, В.М.* Геогидрология / В.М. Шестаков, С.П. Поздняков. — Изд. ИКЦ «АКАДЕМКНИГА». — 2003. — 176 с.
9. *Fitts, C.* Groundwater Science. San Diego, California / C. Fitts. — Academic Press, 2002. — 450 p.
10. *GMS User Manual*, Vol. 1–4, 2014.
11. *Understanding variation in partition coefficient, Kd, values.* Vol. II: Review of Geochemistry and Available Kd Values for Cadmium, Cesium, Chromium, Lead, Plutonium, Radon, Strontium, Thorium, Tritium, and Uranium. EPA (Environmental Protection Agency), US-EPA, Office of Air and Radiation, Washington, USA. EPA 402-R-99-004B. 1999.
12. *Zhang, L.* A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration / L. Zhang, K. Hickel, W.R. Dawes et al. // Water Res. Research. — 2004. — Vol. 40. — W02502. doi:10.1029/2003WR002710.
13. http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Prezentation_31_10_2013/Sevtinova.pdf (дата просмотра 28.10.2020).

© Кононченко Е.В., Петраш А.Б., Дорофеев А.Н., 2021

Кононченко Елена Владимировна // lena.konon@mail.ru

Петраш Александр Борисович // A.B.Petrash@yandex.ru

Дорофеев Александр Николаевич // ANDorofeev@rosatom.ru

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 552.11

Горбатова Е.А., Пирогов Б.И. (ФГБУ «ВИМС»)

РЕАКЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ ОСНОВНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД — ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Минералогические исследования основных магматических горных пород позволили выявить и проанализировать особенности реакционных структур, являющихся индикаторами изменяющихся условий процессов минералообразования. Наличие реакционных кайм ортопироксен-амфиболового состава свидетельствует о первоначальном присутствии в интрузивных горных породах магматического оливина. Продукты изменения оливина (симплектитовые сростания ортопироксена и амфиболов, серпентин, сапонит, сапонит и гетит) отражают физико-химические параметры процес-

*сов минералообразования, что позволяет воссоздать постмагматические процессы преобразования горных пород. **Ключевые слова:** продукты изменения оливина, реакционные каймы, симплектитовые сростания ортопироксена и магнетита, индикаторы среды минералообразования.*

Gorbatova E.A., Pirogov B.I. (VIMS)

REACTION STRUCTURES OF BASIC IGNEOUS ROCKS-INDICATORS OF MINERAL FORMATION CONDITIONS

Mineralogical studies of the main igneous rocks allowed us to identify and analyze the features of reaction structures that are indicators of changing conditions of mineral formation processes. The presence of reaction rims of orthopyroxene-amphibole composition indicates the initial presence of igneous olivine in intrusive rocks. The products of olivine changes (symplectic accretions of orthopyroxene and amphiboles, serpentine, saponite, saponite, and goethite) reflect the physical and chemical parameters of mineral formation processes,