

8. Жучкова, В.К. Методы комплексных физико-географических исследований / В.К. Жучкова, Э.М. Раковская. — М.: Изд-во Академия, 2004. — 368 с.
9. Золотарев, Г.С. Инженерная геодинамика / Г.С. Золотарев. — М.: Изд-во МГУ, 1983. — 328 с.
10. Кравченко, И.В. Оценка морфологических особенностей рельефа центрального Кавказа для анализа формирования ландшафтов / И.В. Кравченко, Л.А. Галачиева, Т.З. Джандубаева, А.Д. Ибрагимов // Известия ДГПУ. — Махачкала, 2014. — Вып. 3. — С. 92–97.
11. Ломтадзе, В.Д. Инженерная геодинамика / В.Д. Ломтадзе. — Л.: Недра, 1977. — 479 с.
12. Мехбалиев, М.М. Влияние экспозиции склонов на естественно-хозяйственную систему (на примере междуречья Мазымчая и Гирдыманчая) / М.М. Мехбалиев // Матер. III Междунар. науч.-практ. конф.: Молодежь и наука: Реальность и будущее. Т.V. Естественные и прикладные науки: Сб. статей. — Невинномысск, 2010. — С. 286–287.
13. Мехбалиев, М.М. Прикладная морфометрия / М.М. Мехбалиев // Матер. IV Междунар. науч.-практ. конф.: Молодежь и наука: Реальность и будущее. Т.IV. Естественные и прикладные науки: Сб. статей. — Невинномысск, 2011. — С. 400–404.
14. Попов, Ю.В. Общая геология: Учеб. пособие к разделу «Континентальные склоновые процессы и отложения» / Ю.В. Попов, О.Е. Пустовит. — М-Берлин: Директ-Медиа, 2016. — 48 с.
15. Смолин, И.Ю. Численное исследование влияния распределения прочности в области земной коры блочной структуры на напряженно-деформированное состояние / И.Ю. Смолин, А.Ж. Ахметов, П.В. Макаров // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций: Междунар. конф.: Сб. тезисов. — Томск, 2015. — С. 553–554.
16. Степанов, И.В. Железная дорога Кызыл — Курагино: из прошлого в будущее [электронный ресурс]: Континент Сибирь Онлайн, 2015 — режим доступа: <https://ksonline.ru/207646/zheleznaya-doroga-kyzyl-kuragino-iz-proshlogo-v-budushhee>.
17. Трошкина, Е.С. Лавинный режим горных территорий СССР / Е.С. Трошкина. — М.: ВИНТИ, 1992. — 196 с.
18. Танасиенко, А.Д. Экологические аспекты эрозийных процессов: Аналит. обзор / А.Д. Танасиенко, А.Ф. Путилин, В.С. Артамонова / СО РАН. ГПНТБ. Институт почвоведения и агрохимии / Науч. ред. И.М. Гаджиев. — Новосибирск, 1999. — 95 с. — (Сер. Экология. Вып. 55).
19. Сергеев, Е.М. Инженерная геология / Е.М. Сергеев. — М.: Изд-во МГУ, 1978. — 384 с.
20. Федеральная служба государственной статистики [электронный ресурс]: режим доступа к информации: <https://gks.ru/folder/12781>.
21. EARTHDATA [электронный ресурс]: режим доступа к информации: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>.

© Надеждина Ю.Ю., 2021

Надеждина Юлия Юрьевна / levak.yuliya@mail.ru

УДК 550.8.028+553.495

Теровская Т.С.<sup>1</sup>, Кеслер А.Г.<sup>1</sup>, Лаптев Ю.И.<sup>2</sup>, Носков М.Д.<sup>1</sup>, Солодов И.Н.<sup>3</sup> (1 — Северский технологический институт НИЯУ «МИФИ», г. Северск, 2 — АО «Далур», 3 — АО «Атомредметзолото»)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА СПОСОБОМ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Рассматривается поведение различных индикаторов загрязнения, таких как уран, серная кислота, сульфат ион, железо, алюминий и др. Представлено программное обеспечение, способное описывать миграцию загрязня-

ющих компонентов в процессе скважинного подземного выщелачивания и после его завершения. **Ключевые слова:** геотехнологическое моделирование, скважинное подземное выщелачивание, геоэкология, миграция загрязняющих веществ, экология, математическое моделирование.

Terovskaya T.S.<sup>1</sup>, Kesler A.G.<sup>1</sup>, Laptev Yu.I.<sup>2</sup>, Noskov M.D.<sup>1</sup>, Solodov I.N.<sup>3</sup> (1 — Seversk Technological Institute of National Research Nuclear University MEPHI, 2 — DALUR, 3 — Atomredmetzoloto)

## MODELING THE GEOECOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE DEVELOPMENT OF URANIUM DEPOSITS BY THE IN-SITU LEACHING PROCESS

The behavior of various pollution indicators, such as uranium, sulfuric acid, sulfate ion, iron, aluminum, etc., was considered. The software that can describe the migration of polluting components in the process of downhole leaching and after its completion is presented. **Keywords:** geotechnological modeling, in situ leaching, geoecology, migration of pollutants, ecology, mathematical modeling.

### Введение

Важным условием развития уранодобывающих предприятий является мониторинг состояния геологической среды и обеспечение экологической безопасности разработки месторождений. Метод скважинного подземного выщелачивания (СПВ) оказывает меньшее влияние на окружающую среду по сравнению с традиционными подземным и открытым горными способами. Добыча урана осуществляется с помощью сооружения системы технологических скважин, вскрывающих содержащий рудное тело продуктивный горизонт. В нагнетательные скважины подаются выщелачивающие растворы, способные избирательно растворять урансодержащие минералы. Наибольшее распространение в мире получил способ серноокислотного СПВ. Продуктивный раствор извлекается на поверхность откачными скважинами и поступает на перерабатывающий комплекс для сорбционного извлечения урана. Таким образом, добыча осуществляется без извлечения руды на поверхность путем избирательного растворения минералов урана непосредственно в недрах. При этом разработка месторождения не сопровождается образованием отвалов вскрышных пород и хвостохранилищ, осушением подземных водоносных горизонтов, образованием сбросных вод гидрометаллургических заводов и др. Однако при разработке месторождения методом СПВ в результате нагнетания выщелачивающего раствора и взаимодействия его с вмещающей породой происходит загрязнение подземных вод петрогенными и техногенными веществами [1, 2, 6].

Для проведения мониторинга состояния продуктивного горизонта и оценки геоэкологических последствий СПВ целесообразно использовать методы математического моделирования. Это обусловлено сложностью происходящих при СПВ процессах и их высокой инерционностью, недостатком информации о



**Рис. 1. Рабочее окно программного обеспечения для прогнозирования миграции загрязняющих веществ и оценки воздействия на окружающую среду в результате добычи урана методом СПВ**

состоянии продуктивного горизонта, высокой стоимостью сооружения наблюдательных скважин. В статье представлены математическая модель сернокислотного выщелачивания урана и программное обеспечение для прогнозирования состояния недр при разработке месторождений методом СПВ. Приведены результаты эпигнозного и прогнозного моделирования изменения состояния продуктивного горизонта при разработке Хохловского месторождения урана в Зауральском рудном районе способом подземного выщелачивания.

#### Методы и модель

При сернокислотном СПВ с рабочим раствором в пластовые воды поступают техногенные макрокомпоненты — серная кислота и окислитель. В результате взаимодействия выщелачивающих растворов с урано-содержащими и породообразующими минералами в технологические растворы переходит достаточно большое количество различных химических элементов. По своим характеристикам и экологической значимости все загрязняющие компоненты могут быть разделены на три группы. В первую группу входят радионуклиды рядов урана и тория (рудогенные компоненты —  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ). Вторая группа включает элементы, переходящие в технологические растворы в количествах превышающих допустимые нормы (петрогенные макрокомпоненты — Be, Al, Fe, V, Cd, Zn, Pb, Ti, Tl, Ni — на 1–3 порядка, Na, Ca, Mg — в несколько раз). В третью группу входят элементы, концентрация которых в технологических растворах не превышает значение допустимых норм (петрогенные микрокомпоненты — Co, Mo, Sr, Se, Hg, Ag, Sb, Te, Cu).

С точки зрения мониторинга загрязнения подземных вод интерес представляют только элементы,

входящие в первые две группы. Перемещение загрязняющих компонентов в водоносном горизонте происходит в результате конвективного массопереноса, гидродинамической дисперсии и молекулярной диффузии. В растворах загрязняющие примеси мигрируют в виде ионов, нейтральных молекул и комплексных соединений. Форма, в которой присутствует загрязняющий компонент в жидкой фазе, зависит от гидрогеохимической обстановки. Гидрогеохимическая обстановка определяется следующими основными факторами: водородный показатель pH, окислительно-восстановительный потенциал Eh, ионная сила раствора, а также наличие в значительном количестве комплексообразователей [6]. В процессе СПВ гидрогеохимическая обстановка в продуктивном горизонте в пределах технологических блоков существенно изменяется. При сернокислотном СПВ с применением окислителей значения pH в пределах технологических блоков снижаются, а Eh возрастает по сравнению с пластовыми водами. При этом может изменяться степень окисления поливалентных элементов, таких как железо и уран, в результате изменяются их миграционные свойства. В технологическом растворе загрязняющие вещества могут находиться в виде комплексных соединений. Основным лигандом при сернокислотном выщелачивании является сульфат ион. При образовании комплексных соединений компоненты могут увеличивать свою миграционную способность либо формировать нерастворимые сульфатные соединения. Детально описать миграцию всех компонентов технологического раствора не представляется возможным. Поэтому при создании модели необходимо определить основные физико-химические процессы, выбрать ограниченное число минералов, компонентов, описания

которых достаточно для адекватного моделирования миграции загрязняющих веществ.

В настоящей работе представлена модель, описывающая основные гидродинамические и физико-химические процессы, определяющие поведение загрязняющих веществ при сернокислотном СПВ урана с применением окислителей [5]. К гидродинамическим процессам относятся фильтрация растворов в поровом пространстве и гидродинамическая дисперсия. Физико-химические процессы включают в себя комплексообразование, диффузию, гомофазные и гетерофазные окислительно-восстановительные и кислотно-щелочные процессы, сорбцию, осаждение-растворение минералов, соосаждение компонентов раствора. В модели рассматриваются следующие макрокомпоненты, содержащиеся в технологических растворах в значительных количествах и определяющие гидрогеохимическую обстановку в рудоносном водоносном горизонте —  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Также в модели рассматриваются радиоактивные загрязняющие компоненты ( $\text{U}^{4+}$ ,  $\text{UO}_2^{2+}$ ,  $\text{Ra}^{2+}$ ,  $\text{Th}^{4+}$ ). В модели не рассматриваются компоненты третьей группы, поскольку они содержатся в технологическом растворе в незначительном количестве и не влияют на гидрогеохимическую обстановку. Также в рассмотрении не включены некоторые из элементов второй группы (микрокомпоненты), содержащиеся в растворе в небольших количествах. Это обусловлено тем, что они осаждаются в виде гидроокислов при нейтрализации кислоты в результате взаимодействия с вмещающей породой и остаются в пределах технологических блоков.

На основе созданной математической модели было разработано программное обеспечение для прогнозирования миграции загрязняющих веществ и оценки воздействия на окружающую среду в результате добычи урана методом СПВ [7]. Вид рабочего окна представлен на рис. 1. Программное обеспечение позволяет проводить расчеты с учетом фактических режимов работы технологических скважин, составов рабочих

растворов, гидрогеологического строения продуктивного горизонта и регионального потока подземных вод. Программное обеспечение разработано на языке программирования C++ и предназначено для применения на персональных компьютерах, работающих под управлением операционных систем Microsoft Window XP-10. Взаимодействие с базами геологических и технологических данных осуществляется посредством SQL запросов.

### Результаты моделирования

Загрязнение подземных вод и автоочистка продуктивного горизонта после завершения добычи урана рассматривается на примере разработки центральной залежи Хохловского месторождения урана. Хохловское месторождение относится к Зауральскому ураново-рудному району. Разработку месторождения ведет АО «Далур», входящее в Урановый холдинг «АРМЗ». Моделирование проводилось на основе гидрогеологической модели месторождения, построенной с помощью горно-геологической информационной системы на основе данных исследования разведочных и технологических скважин [3]. Составы рабочих растворов и режимы работы технологических скважин импортировались из технологической базы данных информационной системы добычного комплекса [4]. Эпигнозные расчеты проводились с момента начала эксплуатации по настоящее время. Прогнозные расчеты были выполнены на двадцатилетний период после завершения добычи урана.

Результаты моделирования показывают, что после начала эксплуатации рудной залежи содержание кислоты в технологических растворах эксплуатационного блока увеличивается (рис. 2). После достижения значений на несколько граммов в литре, меньших содержания кислоты, в выщелачивающих растворах рост содержания кислоты прекращается. Сходным образом ведет себя окислительно-восстановительный потенциал, значения которого возрастают с 100–200 до 350–450 мВ в процессе отработки. В результате взаимодействия выщелачивающих растворов с

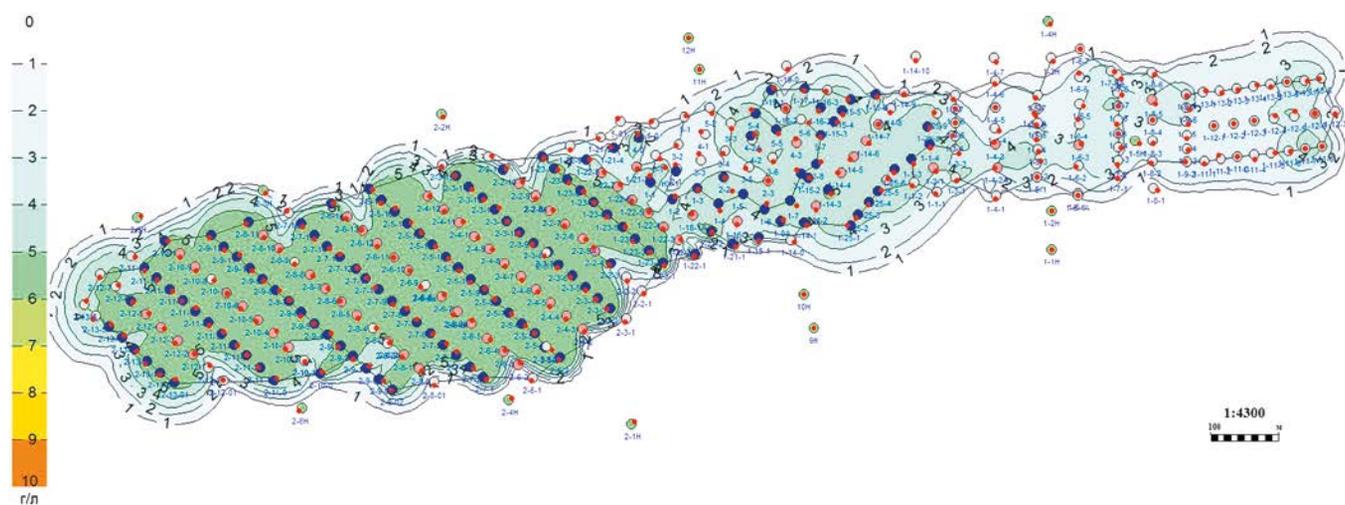


Рис. 2. Концентрация кислоты в продуктивных растворах на момент окончания расчета, г/л

вмещающей породой общее содержание железа также увеличивается в процессе отработки, достигая значений порядка 1 г/л. Содержание урана сначала растет до максимальных значений 100–150 мг/л, а затем снижается по мере отработки рудного тела (рис. 3). Содержание сульфат-иона в технологических растворах эксплуатационного блока увеличивается, достигая 15–20 г/л к моменту завершения отработки (рис. 4). Аналогично ведут себя концентрации алюминия, калия, натрия, магния. Таким образом, общая минерализация технологических растворов возрастает до 30–40 г/л. В процессе отработки большая часть технологических растворов остается в пределах эксплуатационного блока. Это обусловлено балансом нагнетаемых рабочих растворов и откачиваемых продуктивных растворов как для отдельных блоков, так и в целом по месторождению. При выходе технологических растворов за пределы эксплуатационного бло-

ка происходит нейтрализация кислоты, образование нерастворимых соединений урана и других загрязняющих веществ. В результате ареал распространения урана выходит за контур технологических блоков на расстояния, не превышающие 20–30 м. Имеющий наибольшую миграционную способность сульфат-ион распространяется за контур блоков на максимальное расстояние 80–100 м.

Для подтверждения адекватности описания процесса СПВ, используя геоэкологическую моделирующую систему, было проведено сравнение рассчитанных и фактических временных зависимостей концентрации урана, двух- и трехвалентного железа, серной кислоты и сульфат-иона в продуктивных растворах. Сравнение проводилось как по отдельным откачным и наблюдательным скважинам, так и по эксплуатационным блокам и всему месторождению. Хорошее совпадение результатов моделирования с реальными дан-

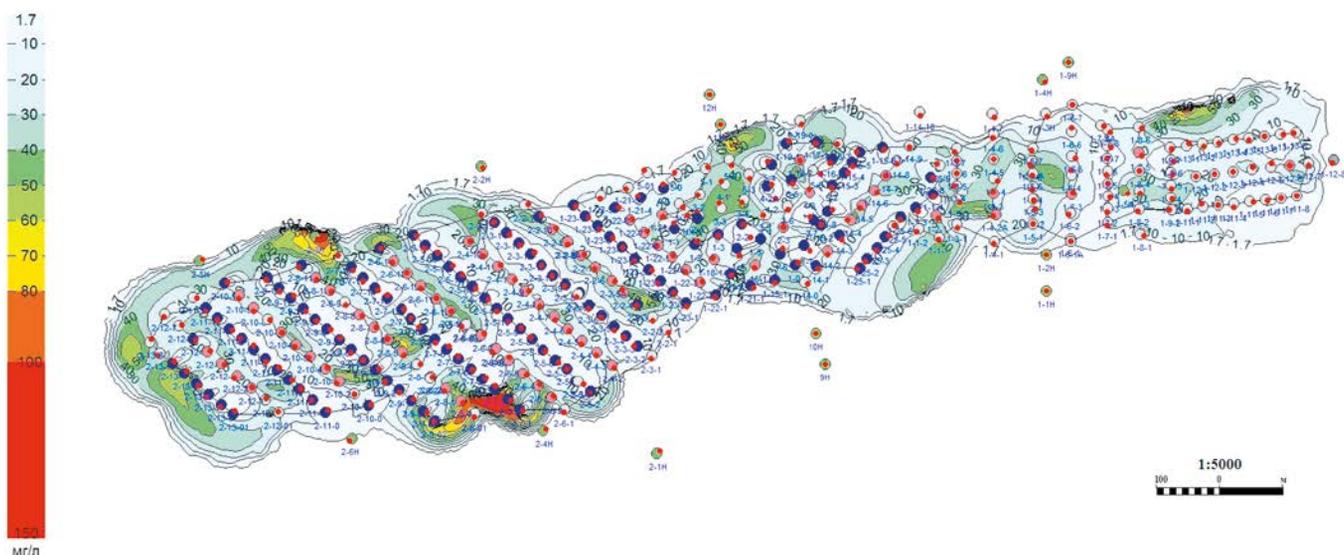


Рис. 3. Концентрация урана в продуктивных растворах на момент окончания расчета, мг/л



Рис. 4. Концентрация сульфат-иона в продуктивных растворах на момент окончания расчета, г/л

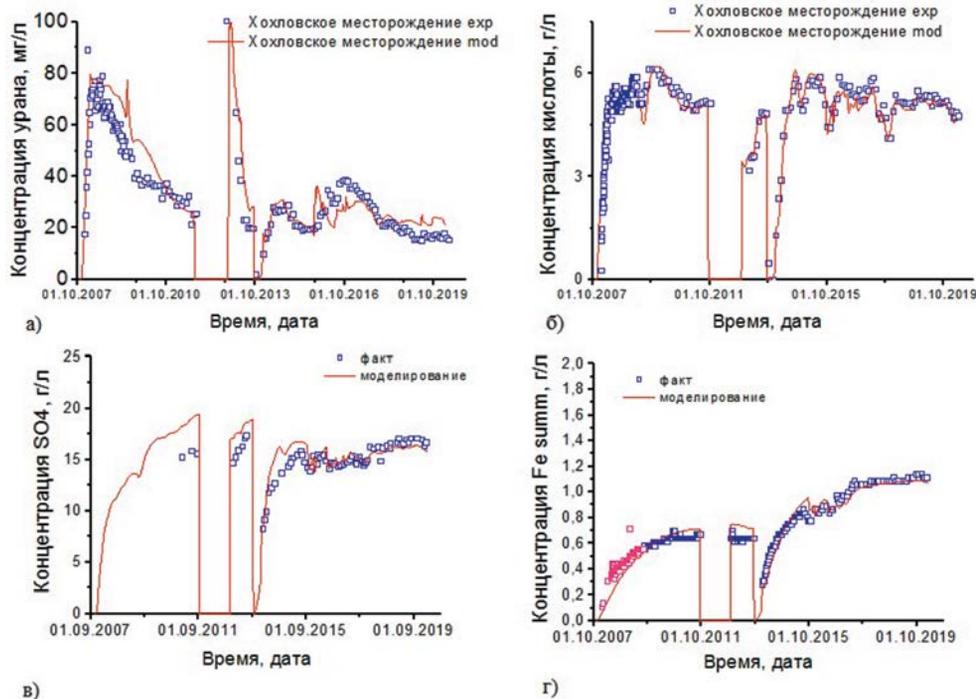


Рис. 5. Сравнение концентраций урана (а), кислоты (б), сульфат-иона (в), железа (г)

ными подтверждает адекватность предложенной модели и правильность работы геоэкологической моделирующей системы (рис. 5).

После завершения разработки месторождения в результате взаимодействия с вмещающими терригенными отложениями в течение нескольких лет происходит нейтрализация кислоты и возрастание рН остаточных технологических растворов (рис. 6). В результате образуются нерастворимые гидроксиды урана, железа, алюминия и их концентрации в остаточных растворах снижаются (рис. 7). За 20 лет общая минерализация

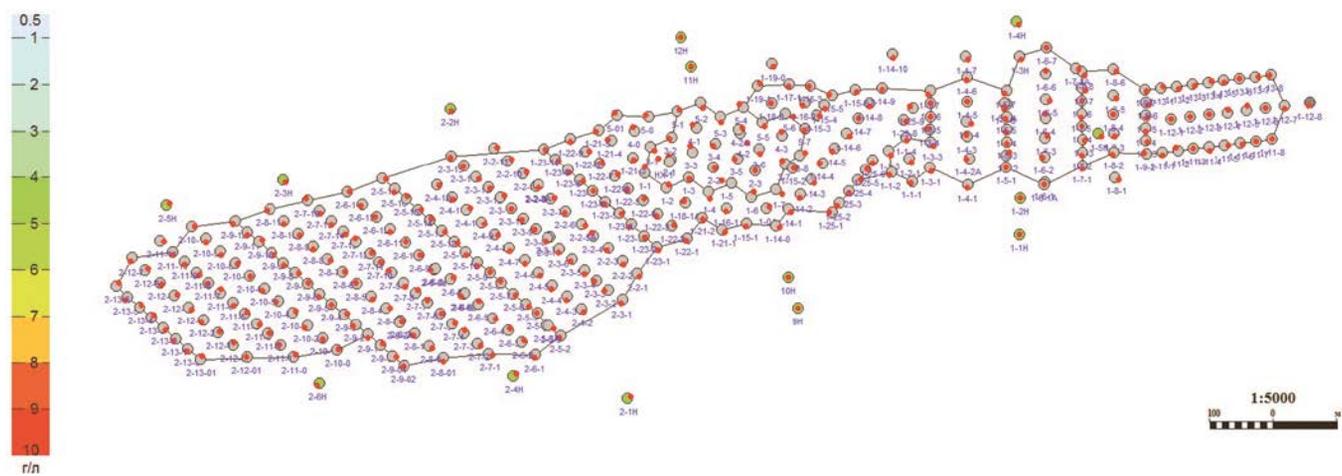


Рис. 6. Концентрация серной кислоты в продуктивном горизонте спустя 20 лет после завершения процесса СПВ, г/л

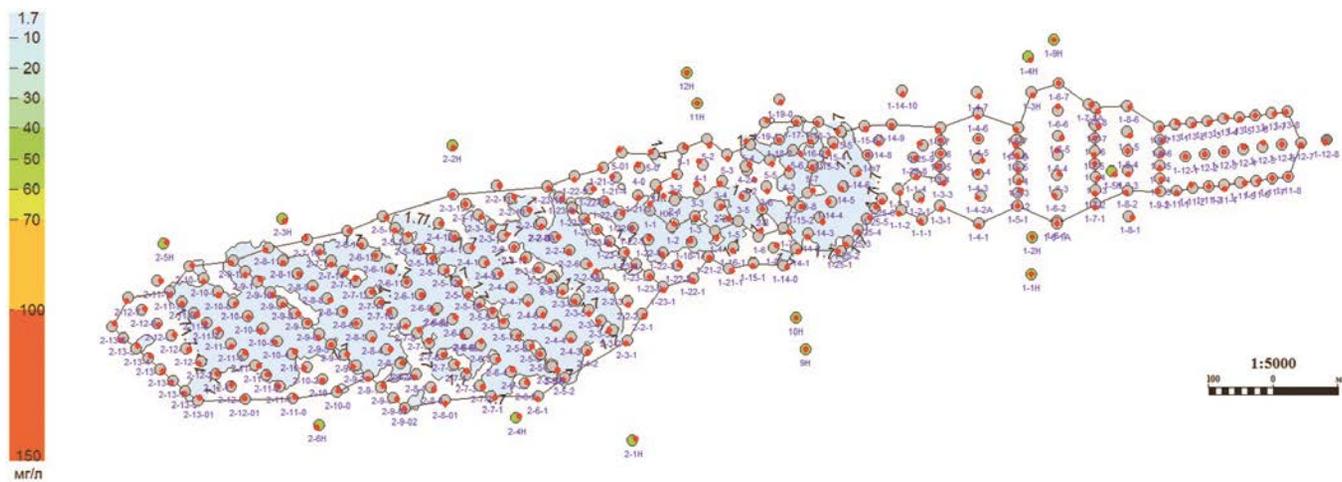


Рис. 7. Концентрация урана в продуктивном горизонте спустя 20 лет после завершения процесса СПВ, мг/л

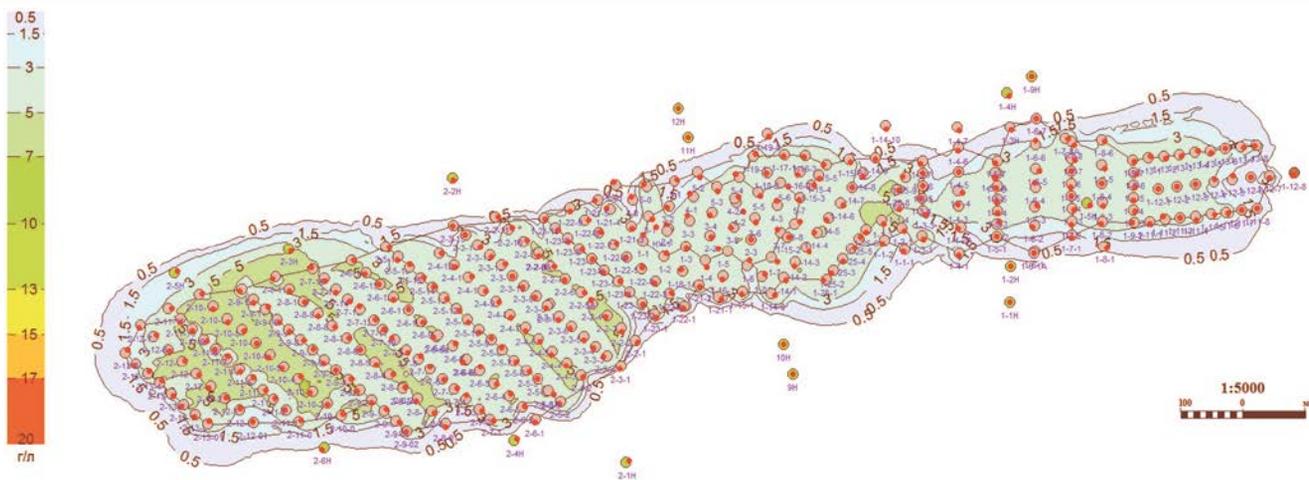


Рис. 8. Концентрация сульфат-иона в продуктивном горизонте спустя 20 лет после завершения процесса СПВ, г/л

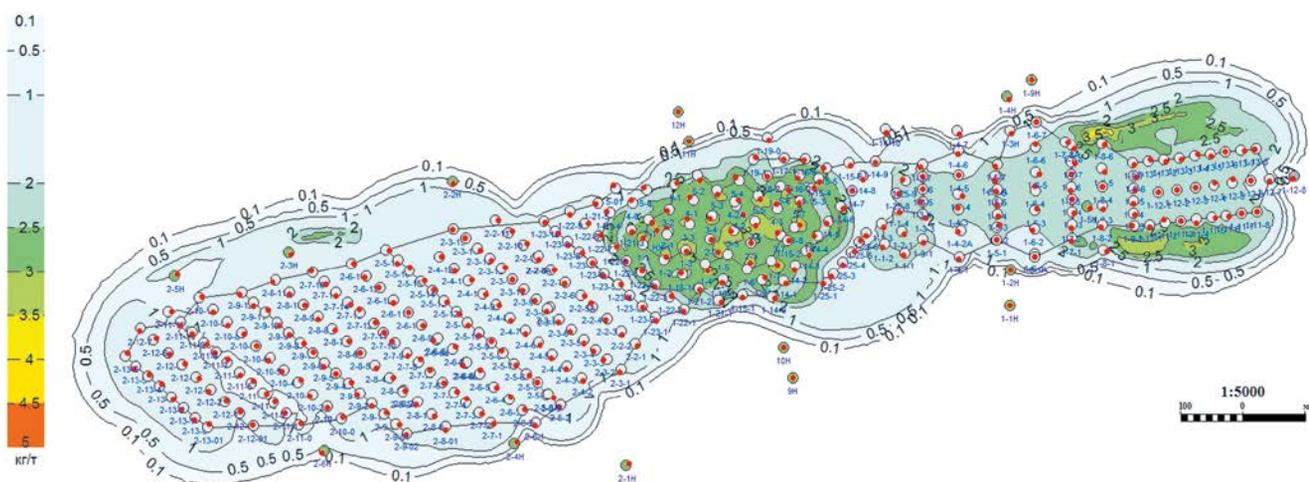


Рис. 9. Содержание гипса в продуктивном горизонте спустя 20 лет после завершения процесса СПВ, кг/т

остаточных технологических растворов уменьшается с 30–40 до 7–10 г/л (рис. 8). Одновременно с этим происходит образование нерастворимых сульфатсодержащих минералов (гипс, алунит, ярозит и др.) (рис.9).

После завершения эксплуатации линза остаточных растворов остается в пределах эксплуатационного блока в результате очень низкой скорости движения регионального потока подземных вод в продуктивном горизонте Хохловского месторождения урана.

#### Заключение

Результаты моделирования показывают, что при СПВ урана область загрязнения подземных вод локальна и находится преимущественно в границах эксплуатационных блоков. Основным индикатором загрязнения является сульфат-ион, поскольку он обладает высокой миграционной способностью, его концентрация в технологических растворах при сернокислотном СПВ намного выше, чем в незакисленных подземных водах продуктивного горизонта, а также значительно превышает концентрации других компонентов технологического раствора. По его

распространению в подземных водах можно судить о масштабах загрязнения продуктивного горизонта. После завершения добычи происходит автоочистка продуктивного горизонта. Снижение концентрации загрязняющих веществ происходит в результате взаимодействия остаточных технологических растворов с породообразующими минералами, новообразования минералов и разбавления пластовыми водами. Скорость процесса автоочистки зависит от минералогического состава рудовмещающих пород продуктивного горизонта и интенсивности водообмена. В случае низкой скорости движения подземных вод процесс автоочистки происходит внутри области, незначительно выходящей за границы технологических блоков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белецкий, В.И. Справочник по геотехнологии урана / В.И. Белецкий, Л.К. Богатков, Н.И. Волков и др. — М.: Энергatomиздат, 1997. — 672 с.
2. Геотехнология урана (русский опыт) / Под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. — М.: «КДУ», «Университетская книга», 2017. — 576 с.

3. *Истомин, А.Д.* Применение геологической геоинформационной системы при проведении ГРП на инфильтрационном месторождении урана / А.Д. Истомин, А.В. Ладейщиков, М.Д. Носков, А.А.Чеглоков // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 8. — С. 6–11.
4. *Истомин А.Д.* Система информационной поддержки управления добычей урана методом скважинного подземного выщелачивания / А.Д. Истомин, А.С. Бабкин, М.Д. Носков, А.А. Чеглоков // Автоматизация в промышленности. — 2011. — № 1. — С. 5–9.
5. *Свидетельство №2016610552.* Моделирование геоэкологического состояния месторождений АО «Далур», разрабатываемых способом подземного выщелачивания: программа для ЭВМ / Бабкин А.С., Истомин А.Д., Кеслер А.Г., Носков М.Д., Теровская Т.С., Чеглоков А.А. (RU); правообладатель АО «Далур». № 2015661283; заявл. 23.11.15; опубл. 14.01.2016.
6. *Солодов, И.Н.* Влияние геоструктурных и геохимических факторов на распространение техногенных сернокислых рассолов в во-

доносном горизонте, вмещающем урановую залежь месторождения Букинай (Кызылкумы) / И.Н. Солодов, Б.Т. Кочкин // Геология рудных месторождений. — 1996. — Т. 38. — № 1. — С. 87–102.

7. *Теровская, Т.С.* Математическое моделирование миграции загрязняющих компонентов, образующихся при сернокислотном скважинном выщелачивании урана / Т.С. Теровская, М.Д. Носков, А.Г. Кеслер // Известия ВУЗов. Физика. — 2014. — №2/2. — С. 83–90.

© Коллектив авторов, 2021

*Теровская Татьяна Сергеевна* // tsterovskaya@mail.ru  
*Кеслер Аркадий Григорьевич* // arcanag@mail.ru  
*Лаптев Юрий Иванович* // info@dalur.ru  
*Носков Михаил Дмитриевич* // md\_noskov@mail.ru  
*Солодов Игорь Николаевич* // insolodov@armz.ru

## ХРОНИКА



## ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПУТЕВОДИТЕЛЬ

Группа выпускников МГРИ работает над созданием Путеводителя по местам геологических экскурсий под эгидой Школьного Факультета МГРИ, одной из старейших юношеских геологических организаций России. Путеводитель будет выпускаться в виде серии томов, каждый из которых посвящен отдельному региону, и в течение нескольких лет покроет территорию всей современной России и ближнего зарубежья.

В настоящее время ко Дню Геолога готовится к печати 1-й том, посвященный Кольскому полуострову и Карелии. Авторами статей 1-го тома являются: канд. геол.-мин. наук, доцент геологического факультета МГУ Борис Борисович Шкурский, канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник ИГЕМ РАН Николай Станиславович Серебряков, руководитель управления геологии твердых полезных ископаемых Роснедр Алексей Вячеславович Руднев, минералог и коллекционер, создатель нескольких минералогических музеев Николай Игоревич Фришман.

Также в текущем году выйдет 2-й том, где будут описаны интересные геологические объекты на севере Русской плиты и краже Ветренный Пояс (Архангельская, Вологодская, Костромская, Кировская области).

В Путеводителе дается краткое геологическое описание территории, наиболее интересных и доступных для посещения объектов, таких как действующие и заброшенные рудники, карьеры, отвалы, естественные обнажения, местные геологические музеи; указаны места возможных стоянок, сведения о необходимом снаряжении, адреса гостиниц; описаны с возможной полнотой минералогические и палеонтологические находки и другие особенности, могущие представлять

интерес не только для юных геологов, но и для уже состоявшихся специалистов.

Книга имеет компактный формат, а также снабжена цветными картами и иллюстрациями.

Проект некоммерческий, осуществляется силами волонтеров на основании уникальных авторских материалов, путевых заметок и открытых источников.

Одна из главных целей проекта — развивать интерес юношества к поиску и открытиям природных богатств на территории нашей огромной и прекрасной страны, да и планеты Земля в целом. Книга будет интересна также практикующим геологам, коллекционерам и любознательным путешественникам. Издание будет распространяться бесплатно при спонсорской помощи по геологическим кружкам школ России, а также поступит в свободную продажу для обеспечения расходов на типографию и поддержку Школьного Факультета МГРИ.

Предварительный заказ на 1-й том (Кольский п-ов и Карелия) и 2-й том (Русский Север) Геологического путеводителя можно оставить в компании «Камневеды», которая является главным спонсором издания, по телефону +7 (495) 984-83-87, или отправив письмо на адрес [info@kamnevedy.ru](mailto:info@kamnevedy.ru).

Мы приглашаем к сотрудничеству геологические кружки, музеи, частные компании, геологов и коллекционеров, готовых внести посильный вклад в создание Геологического путеводителя по России, а также спонсоров, желающих послужить этому благородному делу. С предложениями можно обратиться к главному редактору проекта Ериклинцеву Владимиру Владимировичу по адресу [geoguide.mgri@gmail.com](mailto:geoguide.mgri@gmail.com).