




ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-158-169>

Перспективы селективно-опережающего извлечения рения из продуктивных растворов подземного выщелачивания урановых руд месторождения Добровольное

А. А. Руденко¹, И. Д. Трошкина²   , В. В. Данилейко¹, О. С. Барабанов³, Ф. Я. Вацура² ¹ АО «РУСБУРМАШ», г. Москва, Российская Федерация² Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева (РХТУ им. Д. И. Менделеева), г. Москва, Российская Федерация³ АО «АРМЗ», г. Москва, Российская Федерация tid@muctr.ru

Аннотация

Анализ геологоразведочных материалов и рыночной конъюнктуры показал, что попутное извлечение одного из самых редких стратегических элементов периодической системы – рения – не всегда эффективно при переработке всего объема продуктивных урансодержащих растворов. Основная цель исследований – разработка эффективного способа извлечения рения из продуктивных растворов при скважинном подземном выщелачивании урана. Задачами исследований являлись: оценка возможности селективно-опережающего извлечения рения из руд способом скважинного подземного выщелачивания и сопоставление технологических преимуществ нового предлагаемого способа с известными. В работе использован анализ геологической, минералого-геохимической информации предыдущих лет изучения месторождения Добровольное и анализ технологических аспектов попутной добычи рения в мировой практике. Предложена селективно-опережающая схема извлечения рения из продуктивных сернокислых урановых растворов подземного выщелачивания урановых руд месторождения Добровольное (Курганская область, Россия) с использованием мобильных установок. Технология имеет следующие отличия: зонирование эксплуатационных блоков при сооружении закачных и откачных скважин; обвязку откачных селективных скважин в отдельный коллектор; осуществление опережающей сорбции рения. Ее осуществление дает возможность получать рений из экономически выгодных участков месторождения урана. Мобильная установка включает следующие основные узлы: фильтр для очистки (доочистки) от взвесей, каскад сорбционных аппаратов (сорбционных фильтров или колонн), соединительную арматуру, контрольно-измерительные приборы. Сорбционные аппараты заполняются селективным на рений ионитом. В качестве селективного сорбента для первичного концентрирования рения из сернокислых растворов (рН 2) могут быть использованы слабоосновные азотсодержащие иониты, содержащие функциональные группы аминов различного типа. При необходимости дальнейшего концентрирования рения с целью унификации используемого оборудования можно применить материалы с подвижной фазой экстрагента (твэкс или импрегнаты), например, ТВЭКС-ДИДА, содержащий диизододециламин, или импрегнат-ТАА, содержащий триалкиламин. Десорбция рения с этих материалов осуществляется раствором аммиака, что позволяет получить из элюата черновой перренат аммония. Оценены экономические аспекты селективно-опережающей технологии рения. Реализация технологии селективно-опережающего извлечения дает возможность получать рений из экономически выгодных участков месторождения урана.

Ключевые слова

уран, скважинное выщелачивание, Курганская область, рений, серная кислота, схема извлечения, добычной блок, дифференциация, оптимизация, продуктивность, селективность

Для цитирования

Rudenko A. A., Troshkina I. D., Danileiko V. V., Barabanov O. S., Vatsura F. Ya. Prospects for selective-and-advanced recovery of rhenium from pregnant solutions of in-situ leaching of uranium ores at Dobrovolnoye deposit. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):158–169. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-158-169>



BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research article

Prospects for selective-and-advanced recovery of rhenium from pregnant solutions of in-situ leaching of uranium ores at Dobrovolnoye deposit

A. A. Rudenko¹, I. D. Troshkina²  , V. V. Danileyko¹, O. S. Barabanov³, F. Ya. Vatsura² ¹ JSC “RUSBURMASH”, Moscow, Russian Federation² Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation³ JSC ARMZ (Atomredmetzoloto Uranium Holding Co., the Rosatom’s mining division), Moscow, Russian Federation tid@muctr.ru

Abstract

Analysis of exploration materials and market conditions showed that by-product recovery of rhenium, one of the rarest strategic elements of the periodic system, was not always effective in processing the whole volume of pregnant uranium-bearing solutions. The main goal of the research was to develop an effective method for recovery rhenium from pregnant solutions in in-situ uranium leaching. The objectives of the research were as follows: evaluation of the possibility of selective-and-advanced recovery of rhenium from ores by in-situ leaching method and comparison of the technological advantages of the new proposed method with the known ones. The study involved the analysis of historical geological, mineralogical and geochemical information on the Dobrovolnoye deposit and analysis of technological aspects of by-product recovery of rhenium in the world practice. A selective-and-advanced scheme of rhenium recovery from pregnant uranium-bearing sulfate (sulfuric acid) solutions of the Dobrovolnoye deposit ISL (Russia) using mobile installations was proposed. The process has the following features: zoning of production blocks when constructing injection and extraction (pumping) wells; piping of selective extraction wells into a separate collecting pipe; implementation of advanced rhenium sorption. The process implementation makes it possible to obtain rhenium from economically viable areas of the uranium deposit. The mobile installation includes the following main units: a filter for purification (aftertreatment) to remove suspension, a chain of sorption apparatuses (sorption filters or columns), connecting fittings, control and measuring instruments. The sorption apparatuses are filled with rhenium-selective ionite (ion exchanger). As a selective sorbent for the primary concentration of rhenium from sulfate solutions (pH 2), weakly basic nitrogen-bearing ionites containing amine functional groups of various types can be used. If further concentration of rhenium is required, in order to unify the equipment used, materials with a mobile extractant phase (so-called TVEXs (solid extractants or Levestrel resins in English literature) and so-called “impregnated” or “impregnates”), such as TVEX-DIDA containing diisododecyl amine, or TAA-impregnate containing trialkylamine, can be used. Rhenium desorption from these materials is carried out by an ammonia solution, which allows producing rough ammonium perrhenate from the eluate. Economic aspects of the rhenium selective-and-advanced technology were evaluated. Implementation of the recovery selective-and-advanced technology allows obtaining rhenium from economically-viable areas of the uranium deposit.

Keywords

uranium, in-situ leaching, Kurgan region, rhenium, sulfuric acid, recovery scheme, production block, differentiation, optimization, productivity, selectivity

For citation

Rudenko A. A., Troshkina I. D., Danileyko V. V., Barabanov O. S., Vatsura F. Ya. Prospects for selective-and-advanced recovery of rhenium from pregnant solutions of in-situ leaching of uranium ores at Dobrovolnoye deposit. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):158–169. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-158-169>

Введение

Основным направлением в стратегии развития минерально-сырьевой базы (МСБ) уранодобывающей отрасли Российской Федерации на ближайшее десятилетие является прежде всего увеличение МСБ в районе действующих горнорудных предприятий – АО «Далур», АО «Хиагда» и ПАО «ППГХО», пригодной для освоения двумя геотехнологиями – скважинным подземным выщелачиванием и блочным подземным выщелачиванием [1].

Создание новых современных технологий разработки природных ресурсов определяется применением экологически безопасных способов, к которым от-

носится подземное выщелачивание, их комплексного освоения и максимально возможной глубиной переработки на продукты, востребованные народным хозяйством. Под комплексной переработкой сырья как основы создания малоотходных технологий понимают использование всех минеральных составляющих сырья путем превращения их в полезные продукты за счет совмещения нескольких производств внутри одного предприятия. Нередко при извлечении из сырья двух и более компонентов снижается нижний концентрационный предел рентабельной переработки.

Наряду с основной задачей комплексной переработки уранового сырья – попутным извлечением



его ценных компонентов, носящей экономический характер, не менее важны как необходимые составляющие – утилизация твердых отходов и регенерация реагентов из водных сбросов и газовых отходов.

Попутное извлечение самого урана в мире проводят из медных и золотых руд, а также фосфоритов. Доля урана при этом составляет ~9 % от всего добываемого.

Комплексные урановые руды подразделяются на две основные группы [2]:

1. Руды, в которых уран и попутные элементы входят в состав одного минерала (ванадий и уран – в карнотите, фосфор и уран – в апатите, ниобий и уран – в гатчеттолите, цирконий и уран – в малаконе). Полезные компоненты не могут быть разделены механическими методами обогащения и разделяются только при химической переработке руд.

2. Руды, в которых уран и попутные элементы представлены разными минеральными формами или носителями (руды, содержащие сульфиды и арсениды цветных металлов, самородное серебро, золото, висмут). При этом раздельное получение концентратов возможно методами механического обогащения.

Следующие элементы сопутствуют урану в рудах: золото, ванадий, молибден, редкоземельные элементы, иттрий, рений, медь, никель, кобальт, мышьяк, фосфор. Торий, скандий и селен присутствуют в меньшей степени. Следует отметить, что концентрация этих элементов в рудах часто слишком мала, чтобы обеспечить экономически выгодное разделение и извлечение, но, с другой стороны, она достаточно высока, чтобы повлиять на качество первичного концентрата урана – «желтого кека».

В связи с этим к задачам комплексной переработки уранового сырья примыкает и задача повышения качества основного товарного продукта уранового передела.

Рентабельность комплексной переработки определяется нижним концентрационным пределом, оценка которого для двухкомпонентных руд при разном содержании в них урана приведена в [3]. Необходимо отметить, что самое рентабельное в мире извлечение урана из руд со средним содержанием 0,06 % урана достигнуто при переработке комплексной руды медь-золото-серебросодержащего уранового месторождения Олимпик Дам в Австралии.

При наиболее перспективном методе выщелачивания урановых руд – скважинном подземном, образуются так называемые продуктивные растворы, которые наряду с целевым компонентом – ураном – содержат ряд попутных, среди которых рений и скандий выделяются высокой стоимостью и стратегической важностью. Нижний концентрационный порог рения в них составляет менее 0,02 мг/л [3].

Рений – один из наименее распространенных элементов периодической системы. Существование рения было предсказано в 1871 г. Д.И. Менделеевым, назвавшим его экомарганцем. Открыт элемент, как стабильный, последним в периодической системе, в 1925 г. в Германии. Температура плавления этого металла составляет 3180 °С, уступая лишь вольфраму.

При этом рений отличается пластичностью среди наиболее тугоплавких хрупких металлов (вольфрама, молибдена и др.). Сплавы на основе тугоплавких металлов обладают высокой механической прочностью, а также устойчивостью к термической деформации, ползучести и окислению. Среди них выделены суперсплавы – сплавы на основе металлов VIII группы (никеля, железа и кобальта) [4]. Наиболее жаропрочные литейные сложнелегированные сплавы на основе никеля, способные работать при температурах 1050–1100 °С в течение сотен и тысяч часов при высоких статических и динамических нагрузках, обычно составляют 40–50 % от общего веса авиационного двигателя и широко используются в рабочих и сопловых лопатках, дисках ротора турбины, деталях камеры сгорания [5, 6]. Эти суперсплавы содержат до 40 % от общей массы другие элементы, такие как рений, хром, кобальт, вольфрам, тантал, молибден, гафний, титан, алюминий. Сплавы пятого поколения содержат наряду с рением также рутений [7]. Рений – один из наиболее эффективных легирующих компонентов в монокристаллических сплавах: влияние на усиление жаропрочности обусловлено повышенной его растворимостью в никелевом γ -твердом растворе, увеличением периода кристаллической решетки и температуры солидуса, снижением коэффициентов диффузии легирующих элементов [7].

Развитие авиаракетнокосмической техники в мире определяется использованием рениевых жаропрочных монокристаллических суперсплавов на основе никеля. На долю сектора жаропрочных сплавов приходится более 80 % рения от его общего объема производства (~70 т, 2021)¹. Эта область применения рения доминирует с конца прошлого столетия [4]. Оставшаяся часть рения незаменима в составе платино-рениевых катализаторов для получения бензина высокого качества и в электронике [4].

Минерально-сырьевая база России по рению ограничена низкосортными молибденитовыми концентратами, которые могут быть получены из руд месторождений Сорское, Жирекенское, Лобаш и др., а также поставленными на баланс, но неперерабатываемыми фумарольными газами вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курилы, Сахалинская обл.).

Попутное извлечение рения из продуктивных растворов подземного выщелачивания урановых руд одного из месторождений (Добровольное) в районе действующего горнорудного предприятия АО «Далур» представляется своевременной научно-практической задачей.

Основная цель исследований – разработка эффективного способа извлечения рения из продуктивных растворов при скважинном подземном выщелачивании урана.

Задачами исследований являлись: оценка возможности селективно-опережающего извлечения рения из руд способом скважинного подземного выщелачивания и сопоставление технологических преимуществ нового предлагаемого способа с известными.

¹ USGS Mineral Commodity Yearbook 2021. <https://doi.org/10.3133/mcs2021>



В работе использован анализ геологической, минералого-геохимической информации предыдущих лет изучения месторождения Добровольное и анализ технологических аспектов попутной добычи рения в мировой практике.

Краткий анализ технологий попутного извлечения рения

Из-за ультранизкого кларка ($7 \cdot 10^{-4} \%$) рений в мировой практике получают лишь попутно при комплексной переработке молибденовых и медных руд. Основным сырьем для получения рения служат молибденовые концентраты медно-порфириновых месторождений, на долю которых приходится около 80 % мирового его производства (Чили, Перу, США, Канада). Среди других источников важное место занимают стратиформные месторождения меди, из которых добывается основное количество рения в странах СНГ. Медистые источники Джезказганского месторождения в Казахстане остаются крупнейшим источником этого металла в Азии. Собственные минералы рения редки (джезказганит – сульфид рения, рениит – сульфид рения) и практического значения не имеют [4].

Урановые руды как дополнительный сырьевой источник рения известны с 50-х годов прошлого столетия: в США из молибденово-урановых руд получили ~1 т рения [4]. На территории СНГ пластово-инфильтрационные экзогенные месторождения, разрабатываемые методом подземного выщелачивания, сосредоточены в крупнейшей в мире Притяньшаньской ураново-рудной провинции. Содержание рения в рудах этих месторождений колеблется от 0,02 до 2 г/т [8]. Наиболее высокие содержания рения установлены в Центральных Кызылкумах в рудах «учкудукского типа» (в среднем 0,6–2,0 г/т), гораздо меньше (0,2–0,5 г/т) в прилегающих Сырдарьинской и Чу-Сарысуйской провинциях [9]. Рений был впервые обнаружен в 1978 г. на месторождении Северный Канимех в растворах подземного выщелачивания урана. Было установлено, что он наиболее эффективно извлекается методом ПВ с использованием природных вод, насыщенных кислородом. При этом универсальной формой миграции в кислородсодержащих подземных водах является перренат-ион ReO_4^- , содержание которого достигает целых миллиграммов на литр, при обычных значениях порядка 0,0n мкг/л [8].

В России оценивали рениеносность урановых рудопроявлений Русской платформы [10]. Содержание рения в этих объектах незначительно.

Для извлечения попутных ценных элементов из продуктивных растворов подземного выщелачивания разработаны технологические схемы, основанные, как правило, на использовании сорбционного метода [11]. Так, например, извлечение ванадия возможно при применении комплексобразующего ионита ВПК и для его концентрирования – анионита ВП-1п, скандия – ионита марки АФИ-22.

При этом необходимо отметить, что наиболее высокая рентабельность – 540 % – наблюдается при извлечении рения [12]. Из продуктивных серноокислых растворов рений совместно с ураном сорбирует-

ся сильноосновным анионитом АМ-п. Селективную десорбцию рения осуществляют кислыми растворами, содержащими нитрат-ионы (NO_3^- – 80–90 г/л, HNO_3 – 4–4,5 %). Рений экстрагируют из элюатов ($C_{\text{Re}} = 10\text{--}15$ мг/л) раствором триалкиламина фракции $C_7\text{--}C_9$ в керосине с добавкой деканола в качестве модификатора. Содержание рения в экстракте достигает 8 г/л, что позволяет осуществить его реэкстракцию раствором аммиака в твердофазном варианте. Принципиальная схема попутного извлечения рения из серноокислых растворов подземного выщелачивания представлена на рис. 1 [11].

Для извлечения рения из оборотных растворов подземного выщелачивания, образующихся после сорбции урана (Республика Узбекистан), использовали композиционный экстрагирующий полимер КЭП-200 фирмы Пьюролайт [12, 13]. Последними исследованиями сорбции рения из модельных серноокислых (pH 1,54) и бикарбонатных (pH 7,1) растворов показана эффективность сильноосновного анионита В0-020 [15]. С 2008 по 2011 г. на двух действующих сорбционных установках Навоийского горно-металлургического комбината было получено ~3 т перрената аммония марки AP-0 [15, 16].

На территории Российской Федерации рений из растворов подземного выщелачивания урана в промышленном масштабе не извлекали.

Характеристика осваиваемого месторождения Добровольное

Освоение месторождений методом СПВ в Зауралье ведет уранодобывающее предприятие АО «Далур», расположенное в с. Уксянском Далматовского района Курганской области. Район хорошо освоен, его территория пересекается железнодорожными магистралями Свердловск–Курган–Петропавловск и Челябинск–Курган, а также густой сетью автодорог районного и государственного значения. Через район проходят трассы магистральных нефтепроводов.

Ураноносность территории Зауралья (рис. 2) определяется главным образом месторождениями и проявлениями урана в верхнеюрских-нижнемеловых палеорулах, врезанных в кристаллические породы доюрского фундамента. Промышленное значение имеют осваиваемые в настоящее время Миасский и Уйско-Тобольский рудные районы, которые включают три месторождения – Далматовское, Хохловское, Добровольное и большую группу рудопроявлений.

Палеодолины простираются на десятки километров при ширине 2–5 км. Месторождения представляют собой протяженные (до 20 км) лентообразные зоны ураноносных пород в палеодолинах. Источником урана и сопутствующих металлов, вероятно, явились породы доюрского фундамента, претерпевшие интенсивное химическое выветривание.

Ритмично чередующиеся в разрезе хорошо проницаемые гравийно-песчаные отложения с глинистыми водоупорами позволяют выделить в разрезе три водопроницаемых подгоризонта. При отсутствии водоупора между отложениями первого и второго ритмов нижний и средний водоносные горизонты объединяют

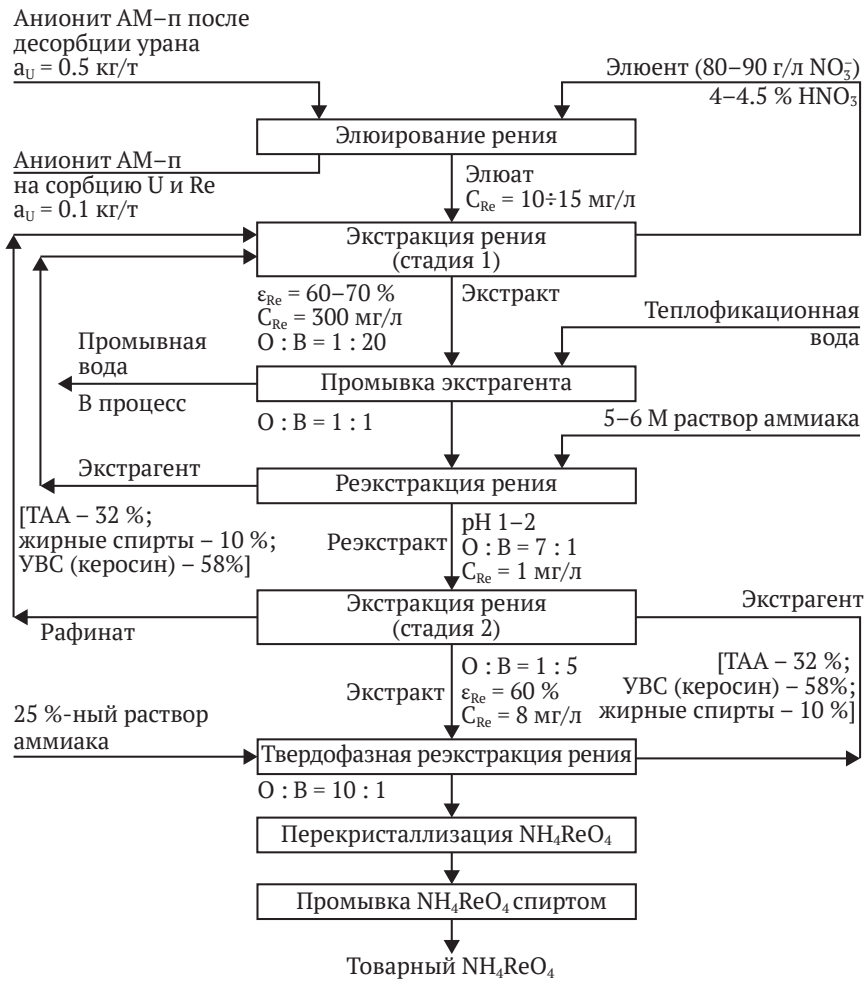


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема попутного извлечения рения из растворов подземного выщелачивания урана [11]

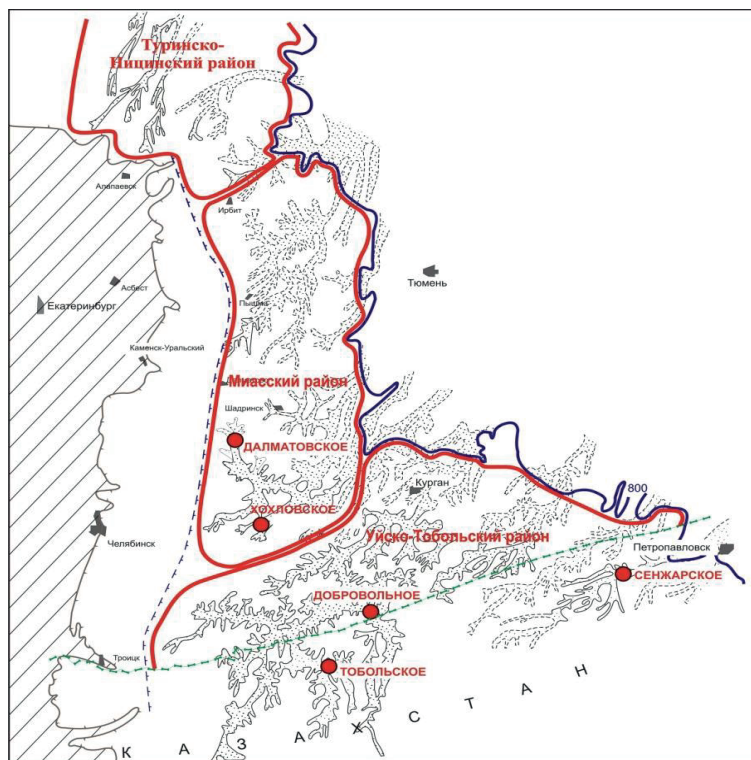


Рис. 2. Схема расположения месторождения Добровольное

в один. Верхний водоносный подгоризонт залегает на глубинах 435–517 м. Средняя мощность 13 м. Верхним водоупором ему служат глины коскольской красноцветной толщи, а подошвой – глинистые отложения мощностью 3–15 м. Коэффициент фильтрации изменяется от 0,8 до 23,5 м/сут. Водоносные подгоризонты залегают на глубинах 513–567 м. Средняя мощность 30 м, при колебаниях от 4,5 до 44 м. Верхним водоупором служат глинистые отложения второго ритма мощностью 3–20 м, а нижним – породы фундамента. Коэффициент фильтрации изменяется от 5,0 до 20,7 м/сут.

В химическом составе вод средне-верхнеуржурского рудовмещающего водоносного комплекса в пределах месторождения преобладают гидрокарбонаты, сульфаты и хлориды натрия. Воды соленые с минерализацией 11,1–13,0 г/дм³, pH 7,2–7,5. Содержание урана в воде до $7,8 \cdot 10^{-6}$ г/дм³, сероводорода до 1,5 мг/дм³, Eh от +60 до +120 мВ. Воды горизонта высоконапорные. Расчетная высота напора воды над дневной поверхностью 41–47 м.

Минеральный состав урановых руд месторождений Зауралья однообразен и характерен для экзогенных месторождений гидрогенного типа. Рудноносные песчаные отложения мощностью до 20 м имеют алюмосиликатный состав, %: SiO₂, 78,5; Al₂O₃, 12,5; CO₂, 0,2 (при максимальном содержании не выше 2,0); железо, 1–3; сульфидная сера, 0,1–1,6. Более 95 % урана находится в собственной минеральной форме в виде оксидов урана (настуран), представленных несколькими генерациями, и силикатов (коффинит). Соотношение настурана и коффинита в рудах – примерно равное. Коэффициент радиоактивного равновесия составляет ~1. По содержанию урана руды относятся к классу бедных и убогих, среднее содержание урана по месторождениям 0,03–0,05 %. Возраст оруденения, определенный уран-свинцовым методом, для всех месторождений около 140 млн лет.

Технологические свойства руд месторождений идентичны, руды пригодны для выщелачивания урана сернокислыми растворами.

Рений-редкоземельно-урановое месторождение Добровольное выявлено в 1986 г. Тургайской партией № 89. Госбалансом учтены: 339,0 т урана по категории С1; 7060,0 т урана по категории С2; 5656 т урана по категории Р1. Глубина залегания урановых руд составляет 480–700 м. Средние содержания урана по залежам 0,028–0,057 %. Ресурсы и запасы рения составляют Р1 – 5,59 т и С2 – 10,6 т².

Рений, кроме собственной минеральной формы (сульфиды рения), установлен в виде сорбционной примеси в настуране, пирите, марказите и глинистом веществе.

Содержание рения в рудах по классам составляет: до 1 г/т – 71 %, от 1 до 10 г/т – 29 %. Высокие содержания рения приурочены к подзонам бедных «серых» урановых руд и их «богатым» подзонам, 15–20 % ренийевых руд располагаются в подзоне «белесых» пород. Схематичный разрез и распределение рения по разведочному профилю представлены на рис. 3.

Селективно-опережающее извлечение рения из продуктивных сернокислых растворов подземного выщелачивания

В настоящее время известны многовариантные способы добычи полезных ископаемых скважинным подземным выщелачиванием, в частности урана. При этом после извлечения урана из продуктивных растворов извлекают пока только редкие элементы – рений и скандий. Рений в промышленных масштабах

² Лучинин И. Л. Отчет о результатах предварительной разведки Добровольного рений-редкоземельно-уранового месторождения. Тургайская партия № 89. Екатеринбург; 1994.

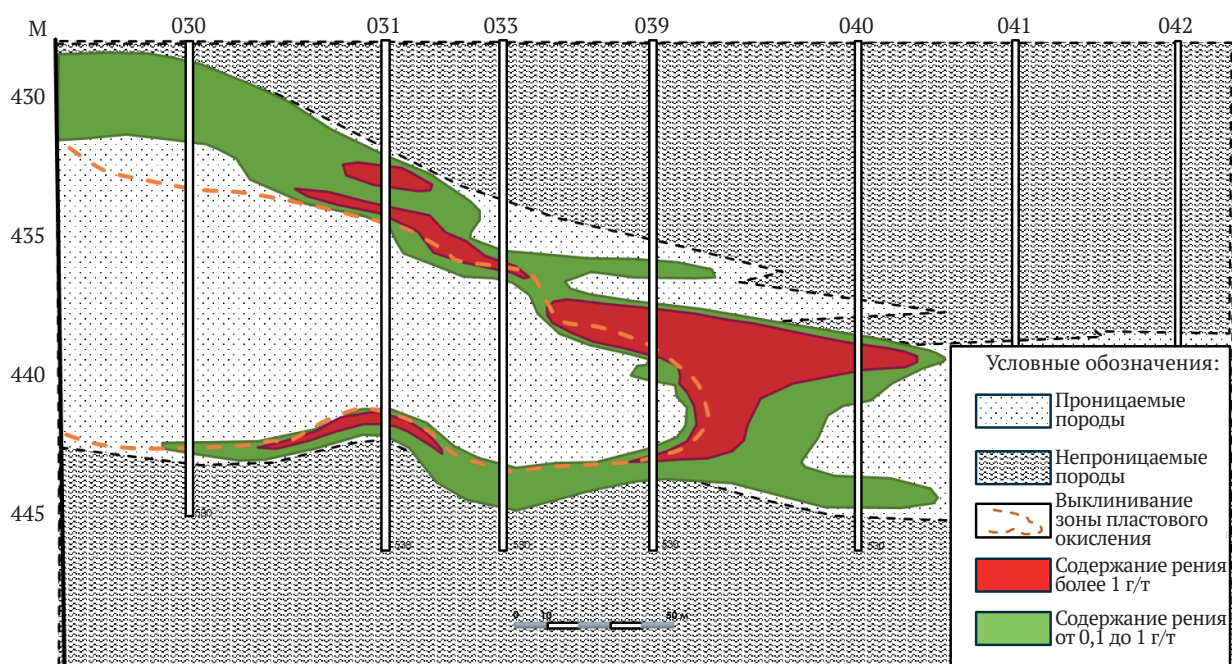


Рис. 3. Распределение рения по профилю 65+400 на месторождении Добровольное

получают в Узбекистане на Навоийском горно-металлургическом комбинате [13]. Другие способы, описанные в патентах России³, Казахстана⁴ и др., а также в статьях [13, 16–19] и монографии [11], предписывают извлекать рений из всего объема урансодержащих растворов.

Основными недостатками известных способов является то, что извлечение рения и других попутных компонентов из продуктивных урановых растворов предусматривается осуществляться после сорбции урана из продуктивных растворов – из так называемых «маточников сорбции». При этом перерабатывать необходимо равнозначные объемы растворов с низким содержанием сопутствующих компонентов в общем объеме растворов. Например, содержание рения в продуктивных урановых растворах составляет 0,3–0,8 мг/л (среднее 0,5 мг/л), что предопределяет необходимость сооружения дополнительных модулей по переработке растворов, соизмеримых с основным производством по переделу урана. Капитальные и эксплуатационные затраты такого производства выдерживают рентабельность попутной добычи только при достижении максимальных рыночных цен на металлы, что делает уязвимым попутное извлечение рения и других редких элементов по таким технологическим схемам.

Предварительно рассчитать среднюю за весь период выщелачивания концентрацию рения (C_m , г/дм³) в продуктивном растворе можно исходя из его извлекаемого количества и общего объема V , м³, продуктивного раствора по зависимости [20]:

$$C_m = 10^2 P_m \frac{\varepsilon}{V},$$

где P_m – общие запасы руды в секции, т; ε – степень извлечения металла, доли ед.; V – объем выщелачивающего раствора, м³.

При исходном содержании рения в рудах более 2 г/т концентрация рения в продуктивном растворе составляет более 1 мг/л (рис. 4).

В настоящей работе рассмотрена возможность изменения последовательности операций для попутного выделения рения из растворов путем применения селективно-опережающего извлечения⁵. Пример осуществления такого способа добычи приведен на рис. 5.

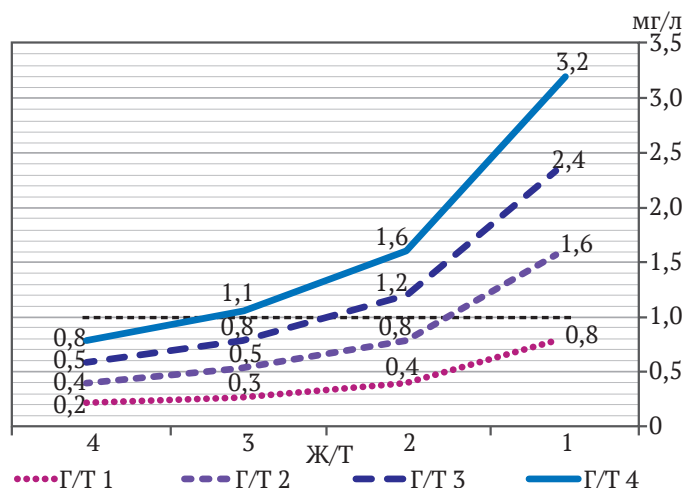


Рис. 4. Стехиометрическая зависимость концентрации рения в растворе от содержания в руде

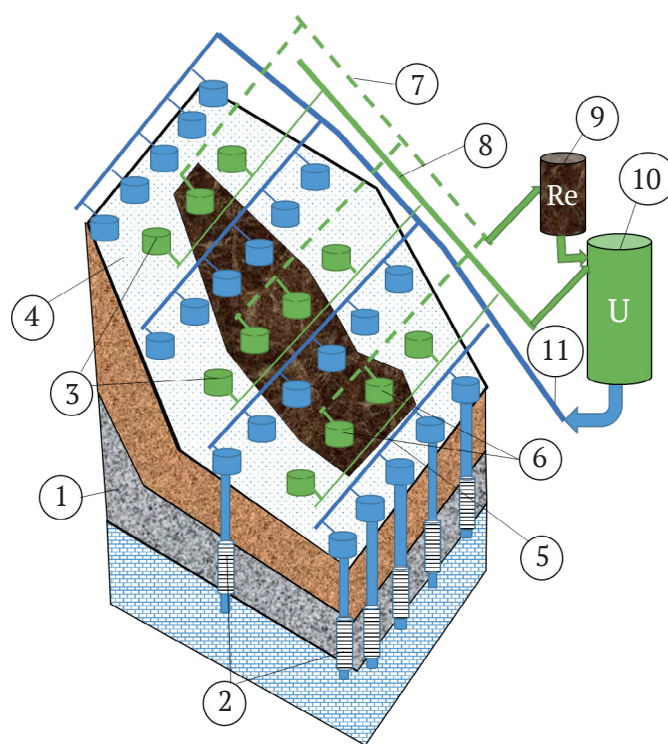


Рис. 5. Схема селективно-опережающего извлечения рения

Рудный эксплуатационный блок (1) разбуривают технологическими закачными (2) и откачными (3) скважинами, которые после сооружения опробуют выщелачивающим раствором методом «Push-Pull». По результатам анализов растворов на рений дифференцируют зоны (4) расположения откачных скважин с содержанием рения менее 1 мг/л и зоны (5) расположения откачных скважин (6) с содержанием рения в растворе более 1 мг/л. Откачные скважины с содержанием рения более 1 мг/л обвязывают в отдельный откачной коллектор (7) и направляют растворы на опережающую сорбцию (9) с последующим получением перрената аммония. После сорбции рения урансодержащие растворы поступают в общий коллектор (8) и проходят стандартные циклы по сорбции/десорб-

³ Толстов Е. А., Михин О. А., Першин М. Е. и др. Способ извлечения рения из растворов. Патент РФ № 2294392 от 24.05.2005 г.

⁴ Кожухметов С. К., Копбаева М. П., Панова Е. Н., и др. Способ переработки растворов подземного выщелачивания ренийсодержащих урановых руд. Патент РК № 22659 от 02.04.2012 г.; Кожухметов С. К., Копбаева М. П., Панова Е. Н., и др. Способ переработки растворов подземного выщелачивания ренийсодержащих урановых руд. Патент РК № 23507 от 02.04.2012 г.; Кожухметов С. К., Копбаева М. П., Панова Е. Н., и др. Способ переработки растворов подземного выщелачивания ренийсодержащих урановых руд. Патент РК № 26780 от 02.04.2012 г.

⁵ Руденко А. А., Трошкина И. Д., Данилейко В. В. Способ добычи полезных ископаемых подземным выщелачиванием. Положительное решение по заявке на изобретение № 2020129776 (приоритет от 08.09.2020 г.) от 28.09.2021.



ции урана на установке по переработке урансодержащих растворов (10) с получением готового продукта «желтого кека». «Маточники сорбции» доукрепляют серной кислотой и направляют по коллектору (11) на выщелачивание руд через закачные скважины (2).

В настоящее время идет проработка варианта мобильной версии сорбционной установки для условий скважинного подземного выщелачивания.

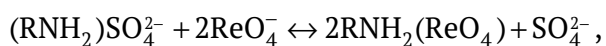
Оперативное извлечение попутных компонентов возможно в установке по селективно-опережающей переработке ренийсодержащих растворов, выполняемой в мобильном варианте. Она включает следующие основные узлы: фильтр для очистки (доочистки) от взвесей, каскад сорбционных аппаратов (сорбционных фильтров или колонн), соединительную арматуру, контрольно-измерительные приборы. Сорбционные аппараты заполняются селективным на извлекаемый компонент ионитом. Работа установки происходит в следующем режиме: продуктивный раствор, содержащий ценные попутные компоненты, после очистки от примесей на фильтре или в прудке с доочисткой на фильтре поступает на сорбцию в заполненный ионитом аппарат.

После полного насыщения ценным компонентом сорбционный аппарат отключается и перевозится в основной цех переработки урановых растворов или на близлежащее предприятие по переработке ренийсодержащих материалов для осуществления операций промывки, десорбции и последующего концентрирования компонента до получения, например, черного перрената аммония марки AP-1. Сорбционный аппарат с регенерированным ионитом возвращается для подключения в каскад аппаратов установки.

В зависимости от инфраструктуры полигона подземного выщелачивания возможно осуществление операций промывки, десорбции и последующего концентрирования до получения товарной соли на площади, занимаемой мобильной установкой, с расширением количества необходимых аппаратов.

В качестве селективного сорбента для первичного концентрирования рения из серноокислых растворов (pH 2) могут быть использованы слабоосновные азотсодержащие иониты, содержащие функциональные группы аминов различного типа, модифицированные активированные угли, волокнистые материалы различного состава⁶ [4, 21, 22–24]. Для извлечения из кислых растворов получены сорбенты на основе природного сырья – лигнина [25] и композиты с бамбуком [26].

Взаимодействие рения, находящегося в растворе в виде перренат-иона, с часто используемыми на практике слабоосновными анионитами, содержащими группы вторичного амина, происходит по механизму ионного обмена перренат-иона ReO_4^- на сульфат-ион (форму, в которой находится анионит). Реакция может протекать в соответствии с уравнением:



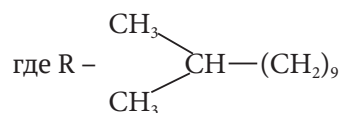
где R – углеводородный радикал.

⁶ Трошкина И. Д., Балановский Н. В., Ванин И. А. и др. Способ извлечения рения из урановых растворов. Патент РФ № 2627838 от 23.03.2016 г.

При необходимости дальнейшего концентрирования рения с целью унификации используемого оборудования можно применить материалы с подвижной фазой экстрагента (твэксы и импрегнаты) [35], сорбция на которых позволяет заменить пожароопасный экстракционный передел. Импрегнаты получают пропиткой носителя экстрагентом. Альтернативным способом создания материалов такого типа является введение экстрагента в матрицу в процессе её синтеза, осуществляемого, например, в режиме суспензионной сополимеризации стирола с дивинилбензолом в присутствии инициатора радикальной полимеризации. Материалы, полученные этим методом, названы твердыми экстрагентами (твэксами) (в англоязычной литературе – Levextrel-смолами). Несмотря на принципиально разные способы получения, импрегнаты и твэксы похожи по структуре и свойствам. В отличие от ионитов эти сорбционные материалы не набухают в водных растворах, сохраняют механическую прочность как во влажном, так и в воздушно-сухом состоянии, что делает возможным применение их в современном высокоэффективном оборудовании.

По плотности, насыпной массе, механической прочности импрегнаты и твэксы подобны сорбентам, механизм же извлечения ими компонентов аналогичен экстракционному. Емкостные и кинетические характеристики этих материалов определяются в основном пористой структурой, типом и состоянием экстрагента в матрице. Характерной особенностью твэксов и импрегнатов является отсутствие химической связи между экстрагентом и полимерной матрицей. Благодаря подвижности жидкой фазы эти материалы обладают улучшенными кинетическими характеристиками.

При их производстве используют экстрагенты различных классов. В АО ВНИИХТ получен ТВЭКС-ДИДА, содержащий диизододециламин. Взаимодействие перренат-иона с ним протекает в соответствии с реакцией:



Сорбционные характеристики этого материала и импрегнатов, содержащих амины, например, триалкиламин (импрегнат-ТАА), изученные в РХТУ им. Д.И. Менделеева, позволяют использовать их для концентрирования рения [28]. Десорбция рения с этих материалов осуществляется раствором аммиака, что способствует получению из элюата черного перрената аммония, очистка которого электродиализным методом приводит к повышению качества товарного продукта рения до марки AP-0 (ГОСТ 31411–2009 «Перренат аммония. Технические условия». Дата введения ГОСТа – 01.01.2011) [4, 14, 18].

Реализация процессов с использованием твэксов или импрегнатов позволяет исключить применение



токсичных, летучих и пожароопасных органических разбавителей, избежать трудностей, связанных с отделением труднорасщепляемых эмульсий («третьей фазы»), обеспечивает снижение загрязнения сточных вод органическими реагентами по сравнению с жидкостной экстракцией. Технологии с использованием импрегнатов и твэков значительно менее энергоемки в сравнении с традиционными сорбционными благодаря высокой степени концентрирования металлов.

Экономические аспекты метода селективно-опережающего извлечения рения из продуктивных растворов подземного выщелачивания урана

Экономическая эффективность метода селективно-опережающего извлечения рения обусловлена следующим:

- при оценке окупаемости затрат на получение рения вычлняются расходы на добычу и подготовку руды к переработке и т.д.;
- снижается нагрузка на сорбент, предназначенный для извлечения основного компонента – урана;
- улучшается качество товарного продукта урана;
- уменьшаются объемы перерабатываемых растворов по рению;
- сокращаются капитальные затраты на строительство перерабатывающей установки на рений;
- снижаются операционные затраты и сопутствующие расходы;
- повышается экономическая привлекательность месторождения.

Выводы

1. Для расширения минерально-сырьевой базы предложен метод селективно-опережающего извлечения одного из ценных попутных компонентов комплексных полиметаллических урановых руд месторождения Добровольное (АО «Далур», Россия) – рения, важнейшего металла суперсплавов для авиаракетно-космической отрасли народного хозяйства.

2. Впервые предложенная технология имеет следующие отличия:

- зонирование эксплуатационных блоков при сооружении закачных и откачных скважин;
- обвязку откачных селективных скважин в отдельный коллектор;
- осуществление опережающей сорбции рения.

3. Осуществление технологии селективно-опережающего извлечения дает возможность получать рений из экономически выгодных участков месторождения урана. При этом в качестве оборудования для ее осуществления может быть использована мобильная установка, основным узлом которой является сорбционный аппарат, заполненный селективным на рений ионитом из группы слабоосновных азотсодержащих ионитов с функциональными группами аминов различного типа. При необходимости дальнейшего концентрирования рения с целью унификации используемого оборудования можно применить материалы с подвижной фазой экстрагента, например, ТВЭКС-ДИДА, содержащий диизододециламин, или импрегнат-ТАА, содержащий триалкиламин. Десорбция рения с этих материалов осуществляется раствором аммиака, что способствует получению из элюата черногого перрената аммония.

Список литературы

1. Акимова И. Д., Бабкин А. С., Иванов А. Г. и др.; Солодов И.Н. (ред.) Геотехнология урана (российский опыт). М.: АРМЗ; 2017. 541 с.
2. Кисляков Я. М., Машковцев Г. А., Мигута А. К. и др. Уран. Справочник. М.: ЗАО «Геоинформ-марк»; 1997. 70 с.
3. Лебедев В. М. Ядерный топливный цикл: Технологии, безопасность, экономика. М.: Энергоатомиздат; 2005. 316 с.
4. Палант А. А., Трошкина И. Д., Чекмарев А. М., Костылев А. И. Технология рения. М.: ООО «Галлея-Принт»; 2015. 329 с.
5. Каблов Е. Н., Бондаренко Ю. А., Колодяжный М. Ю., Сулова В. А., Нарский А. Р. Перспективы создания высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц и естественных композитов. *Вопросы материаловедения*. 2020;(4):64–78. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-104-4-64-78>
6. Петрушин Н. В., Оспенникова О. Г., Елютин Е. С. Рений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газотурбинных двигателей. *Авиационные материалы и технологии*. 2014;(S5):5–16.
7. Каблов Е. Н., Карпов Ю. А., Титов В. И., Карфидова Е. Н., Кудрявцева Г. С., Гундобин Н. В. Определение рения и рутения в наноструктурированных жаропрочных никелевых сплавах для авиационно-космической техники. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2014;80(1):6–12. URL: <http://old-zldm.ru/upload/iblock/820/1028686120148001006.pdf>
8. Лузановский А. Г., Турамурадов И. Б., Туресебеков А. Х. Перспективные особенности добычи рения и осмия из золото-урановых руд и горючих сланцев Кызылкумов. *Горный вестник Узбекистана*. 2007;(1):31–33. URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2007-yanvar-mart.pdf>
9. Каримов Х. К., Бобоноров Н. С. и др. Учкудукский тип урановых месторождений Республики Узбекистан. Ташкент: «ФАН»; 1996. 336 с.
10. Левченко Е. Н., Быховский Л. З., Спиридонов И. Г., Ключарев Д. С. Особенности учета запасов редких металлов. *Разведка и охрана недр*. 2019;(1):45–51.



11. Лаверов Н. П., Абдульманов И. Г., Бровин К. Г. и др. Подземное выщелачивание полиэлементных руд. М.: Изд-во Акад. горн. Наук; 1998. 446 с.
12. Ортиков И. С., Небера В. П. Извлечение рения из растворов выщелачивания урана в Кызылкумской провинции. *Цветные металлы*. 2010;(3):78–83.
13. Волков В. П., Мещеряков Н. М., Никитин Н. В., Михайленко М. А. Промышленный опыт сорбционного извлечения рения из оборотных растворов подземного выщелачивания урана. *Цветные металлы*. 2012;(7):64–67.
14. Шарафутдинов У. З., Курбанов М. А., Аликулов Ш. Ш., Ганиева Д. С. Исследование сорбционных свойств анионитов при совместной сорбции урана и рения в процессе подземного выщелачивания урана. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(3-1):136–146. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_31_0_136
15. Волков В. П., Михин О. А., Першин М. Е. Промышленный опыт извлечения рения из урансодержащих растворов ПВ с получением чистых солей перрената аммония. В: *Актуальные проблемы урановой промышленности. V Междунар. науч.-практ. конф. Сб. науч. работ*. Алматы: ТОО «Vivapromotion»; 2008. С. 353.
16. Volkov V. P., Mescheryakov N. M. Sorptive recovery of rhenium from circulating solutions of uranium in situ leaching operation at Navoi GMK, Uzbekistan. In: *7th Int. Symp. on Technetium and Rhenium – Science and Utilization (ISTR-2011)*. 04–08 July 2011. Moscow: Publishing House Granitsa; 2011. P. 107.
17. Санакулов К. С., Петухов О. Ф., Курбанов М. А. Исследование и разработка комбинированной технологической схемы извлечения рения из руд при подземном выщелачивании. *Горный журнал*. 2018;(9):69–73. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.09.10>
18. Загородняя А. Н., Абишева З. С., Пономарева Е. И., Боброва В. В. Комбинированная сорбционно-экстракционно-электродиализная технология получения перрената аммония из урансодержащих растворов. *Цветные металлы*. 2010;(8):59–62.
19. Zagorodnyaya A. N., Abisheva Z. S., Sharipova A. S., Sadykanova S. E., Bochevskaya Ye. G., Atanova O. V. Sorption of rhenium and uranium by strong base anion exchange resin from solutions with different anion composition. *Hydrometallurgy*. 2013;(131–132):127–132. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.11.003>
20. Белецкий В. И., Богатков Л. К., Волков Н. И. и др.; Скороваров Д.И. (ред.) Справочник по геотехнологии урана. М.: Энергоатомиздат; 1997. 672 с.
21. Нестеров Ю. В. Иониты и ионный обмен. Сорбционная технология при добыче урана и других металлов методов подземного выщелачивания. М.: ООО «Юникорн-Издат»; 2007. С. 204.
22. Блохин А. А., Михайленко М. А. Процессы ионообменной сорбции в гидрометаллургии рения. *Цветные металлы*. 2019;(10):18–27. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.03>
23. Fathi M. B., Rezai B., Alamdari E. K. Competitive adsorption characteristics of rhenium in single and binary (Re-Mo) systems using Purolite A170. *International Journal of Mineral Processing*. 2018;169:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.10.003>
24. Wang Y., Wang C. Recent advances of rhenium separation and enrichment in China: Industrial processes and laboratory trials. *Chinese Chemical Letters*. 2018;29(3):345–352. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2018.01.001>
25. Chopabayeva N. Sorption and desorption of rhenium ions by lignin sorbents. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019;54(3):585–594. URL: https://dl.uctm.edu/journal/node/j2019-3/17_18-56_p_585-594.pdf
26. Hui Hu, Longli Sun, Bangqiang Jiang, Huixiong Wu, Qingming Huang, Xiaohui Chen. Low concentration Re(VII) recovery from acidic solution by Cu-biochar composite prepared from bamboo (*Acidosasa longiligula*) shoot shell. *Minerals Engineering*. 2018;124:123–136. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.021>
27. Трошкина И. Д., Обручникова Я. А., Пестов С. М. Сорбция металлов материалами с подвижной фазой экстрагентов. *Российский химический журнал*. 2017;61(4):54–65. (Пер. вер.: Troshkina I. D., Obruchnikova Y.A., Pestov S.M. Metal sorption by materials with a mobile phase of extractants. *Russian Journal of General Chemistry*. 2019;89:2721–2732. <https://doi.org/10.1134/S107036321912048X>)
28. Troshkina I. D., Balanovskyi N. V., Obruchnikova Ya. A., Vatsura F. Ya., Vanin I. A., Zhukova O. A., Ratchina K. A. Recovery of rhenium by amine-contained sorbents. In: *10th International Symposium on Technetium and Rhenium – Science and Utilization (ISTR-2018)*. 03–06 October 2018. Moscow: Publishing House Granitsa; 2018. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31744.07686>

References

1. Akimova I. D., Babkin A. S., Ivanov A. G. et al.; Solodov I. N. (ed.). *Uranium geotechnology (Russian experience)*. Moscow: ARMZ; 2017. 541 p. (In Russ.)
2. Kislyakov Ya. M., Mashkovtsev G. A., Miguta A. K. et al. *Uranium*. Handbook. Moscow: CJSC Geoinformmark Publ.; 1997. 70 p. (In Russ.)
3. Lebedev V. M. Nuclear fuel cycle: Technologies, Safety, Economy. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2005. 316 p. (In Russ.)



4. Palant A. A., Troshkina I. D., Chekmarev A. M., Kostylev A. I. Technology of Rhenium. Moscow: Galleya-Print LLC Publ.; 2015. 329 p. (In Russ.)
5. Kablov E. N., Bondarenko Yu. A., Kolodyazhny M. Yu., Surova V. A., Narsky A. R. Prospects for the creation of high-temperature heatresistant alloys based on refractory matrices and natural composites. *Voprosy Materialovedeniya*. 2020;(4):64–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-104-4-64-78>
6. Petrushin N. V., Ospennikova O. G., Elyutin E. S. Rhenium in single crystal nickel-based superalloys for gas turbine engine blades. *Aviatsionnye Materialy and Tekhnologii*. (In Russ.). 2014;(S5):5–16.
7. Kablov E. N., Karpov Yu. A., Titov V. I., Karfidova E. N., Kudryavtseva G. S., Gundobin N. V. Determination of Rhenium and Ruthenium in Nanostructured Heat-Resistant Nickel Alloys for Aerospace Equipment. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika*. 2014;80(1):6–12. (In Russ.). URL: <http://old-zldm.ru/upload/iblock/820/1028686120148001006.pdf>
8. Luzanovsky A. G., Turamuradov I. B., Turesebekov A. Kh. Prospective features of rhenium and osmium extraction from gold-uranium ores and oil shale of Kyzyl Kum. *Gorniy Vestnik Uzbekistana*. 2007;(1):31–33. (In Russ.). URL: <http://gorniyvestnik.uz/assets/uploads/pdf/2007-yanvar-mart.pdf>
9. Karimov Kh. K., Bobonorov N. S. et al. *Uchkuduk type uranium deposits of the Republic of Uzbekistan*. Tashkent: FAN Publ., 1996. 336 p. (In Russ.).
10. Levchenko E. N., Bykhovskiy L. Z., Spiridonov I. G., Klyucharev D. S. Features of accounting rare metal reserves. *Razvedka i Okhrana Nedr*. 2019;(1):45–51. (In Russ.)
11. Laverov N. P., Abdulmanov I. G., Brovin K. G. et al. Underground leaching of polyelement ores. Moscow: Publishing house of Academy of Mining Sciences; 1998. 446 p. (In Russ.)
12. Ortikov I. S., Nebera V. P. Extraction of rhenium from uranium leach solutions in Kyzylkum province. *Tsvetnye Metally*. 2010;(3):78–83. (In Russ.).
13. Volkov V. P., Meshcheryakov N. M., Nikitin N. V., Mikhaylenko M. A. Industrial experience of sorptive extraction of rhenium from the circulating leach solutions of uranium. *Tsvetnye Metally*. 2012;(7):64–67. (In Russ.).
14. Sharafutdinov U. Z., Kurbanov M. A., Alikulov Sh. Sh., Ganieva D. S. Adsorption properties of anion-exchange resins in joint uranium and rhenium sorption during in-situ uranium leaching. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(3-1):136–146. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_31_0_136
15. Volkov V. P., Mikhin O. A., Pershin M. E. Commercial experience of rhenium extraction from ISL uranium-containing solutions with producing pure salts of ammonium perrhenate. In: *Actual problems of uranium industry. Proceedings of the V International Scientific-Practical Conference*. Almaty: Viva-Promotion LLP Publ.; 2008. P. 353
16. Volkov V. P., Mescheryakov N. M. Sorptive recovery of rhenium from circulating solutions of uranium in situ leaching operation at Navoi GMK, Uzbekistan. In: *7th Int. Symp. on Technetium and Rhenium – Science and Utilization (ISTR-2011)*. 04–08 July 2011. Moscow: Publishing House Granitsa; 2011. P. 107.
17. Sanakulov K. S., Petukhov O. F., Kurbanov M. A. Investigation and development of hybrid extraction of rhenium during in-situ ore leaching. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(9):69–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.09.10>
18. Zagorodnaya A. N., Abisheva Z. S., Ponomareva E. I., Bobrova V. V. Combined sorption-extraction-electrodialysis process for producing ammonium perrhenate from uranium-containing solutions. *Tsvetnye Metally*. 2010;(8):59–62. (In Russ.)
19. Zagorodnyaya A. N., Abisheva Z. S., Sharipova A. S., Sadykanova S. E., Bochevskaya Ye. G., Atanova O. V. Sorption of rhenium and uranium by strong base anion exchange resin from solutions with different anion composition. *Hydrometallurgy*. 2013;(131–132):127–132. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.11.003>
20. Beletsky V. I., Bogatkov L. K., Volkov N. I. et al.; Skorovarov D. I. (ed.). *Handbook of Uranium Geotechnology*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1997. 672 p.
21. Nesterov Yu. V. Ionites and Ion Exchange. Sorption Technology in Uranium and Other Metals Mining by In-situ Leaching Methods. Moscow: Unicorn Izdat LLC Publ.; 2007. P. 204
22. Blokhin A. A., Mikhaylenko M. A. Ion-exchange sorption in the hydrometallurgy of rhenium: a review. *Tsvetnye Metally*. 2019;(10):18–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.03>
23. Fathi M. B., Rezai B., Alamdari E. K. Competitive adsorption characteristics of rhenium in single and binary (Re-Mo) systems using Purolite A170. *International Journal of Mineral Processing*. 2018;169:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.10.003>
24. Wang Y., Wang C. Recent advances of rhenium separation and enrichment in China: Industrial processes and laboratory trials. *Chinese Chemical Letters*. 2018;29(3):345–352. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2018.01.001>
25. Chopabayeva N. Sorption and desorption of rhenium ions by lignin sorbents. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019;54(3):585–594. URL: https://dl.uctm.edu/journal/node/j2019-3/17_18-56_p_585-594.pdf



26. Hui Hu, Longli Sun, Bangqiang Jiang, Huixiong Wu, Qingming Huang, Xiaohui Chen. Low concentration Re(VII) recovery from acidic solution by Cu-biochar composite prepared from bamboo (*Acidosasa longiligula*) shoot shell. *Minerals Engineering*. 2018;124:123–136. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.021>

27. Troshkina I. D., Obruchnikova Y. A., Pestov S. M. Metal sorption by materials with a mobile phase of extractants. *Russian Journal of General Chemistry*. 2019;89:2721–2732. <https://doi.org/10.1134/S107036321912048X> (Orig. ver.: Troshkina I. D., Obruchnikova Y. A., Pestov S. M. Metal sorption by materials with a mobile phase of extractants. *Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal*. 2017;61(4):54–65. (In Russ.))

28. Troshkina I. D., Balanovskiy N. V., Obruchnikova Ya. A., Vatsura F. Ya., Vanin I. A., Zhukova O. A., Ratchina K. A. Recovery of rhenium by amine-contained sorbents. In: *10th International Symposium on Technetium and Rhenium – Science and Utilization (ISTR-2018)*. 03–06 October 2018. Moscow: Publishing House Granitsa; 2018. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31744.07686>

Информация об авторах

Алексей Анатольевич Руденко – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель начальника отдела анализа и экспертиз, АО «РУСБУРМАШ», г. Москва, Российская Федерация; e-mail Rudall2007@yandex.ru

Ирина Дмитриевна Трошкина – доктор технических наук, профессор, кафедра «Технология редких элементов и наноматериалов на их основе», Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5523-0247](https://orcid.org/0000-0002-5523-0247), Scopus ID [6603490618](https://scopus.com/authorid/6603490618); e-mail tid@muctr.ru

Владимир Васильевич Данилейко – доктор технических наук, директор по специальным проектам, АО «РУСБУРМАШ», г. Москва, Российская Федерация; e-mail danilekovv@gmail.com

Олег Станиславович Барабанов – кандидат экономических наук, первый заместитель генерального директора, АО «Атомредметзолото», г. Москва, Российская Федерация; e-mail OleStBarabanov@armz.ru

Федор Ярославович Вацура – аспирант, кафедра «Технология редких элементов и наноматериалов на их основе», Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; Scopus ID [57200650509](https://scopus.com/authorid/57200650509); e-mail fedotik_r2s@mail.ru

Information about the authors

Alexey A. Rudenko – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Deputy Head of the Analysis and Expertise Department, JSC “RUSBURMASH”, Moscow, Russian Federation; e-mail Rudall2007@yandex.ru

Irina D. Troshkina – Dr. Sci (Eng.), Professor, Department of Technology of Rare Elements and Nanomaterials Based on Them, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5523-0247](https://orcid.org/0000-0002-5523-0247), Scopus ID [6603490618](https://scopus.com/authorid/6603490618); e-mail tid@muctr.ru

Vladimir V. Danilevko – Dr. Sci (Eng.), Director for Special Projects, JSC “RUSBURMASH”, Moscow, Russian Federation; e-mail danilekovv@gmail.com

Oleg S. Barabanov – Cand. Sci. (Econ.), First Deputy General Director, JSC ARMZ (Atomredmetzoloto Uranium Holding Co., the Rosatom’s mining division), Moscow, Russian Federation; e-mail OleStBarabanov@armz.ru

Fedor Ya. Vatsura – PhD student, Department of Technology of Rare Elements and Nanomaterials Based on Them, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; Scopus ID [57200650509](https://scopus.com/authorid/57200650509); e-mail fedotik_r2s@mail.ru

Поступила в редакцию 28.07.2021

Поступила после рецензирования 22.08.2021

Принята к публикации 15.09.2021

Received 28.07.2021

Revised 22.08.2021

Accepted 15.09.2021