

напорных и высоконапорных артезианских водах, но и в низконапорных.

Установлены требования к способу и средствам проведения наклонных стволов с плавной сбойкой встык, место размещения компоновки каскада гидроструйного аппарата, ориентированного на элементы залегания водоносных пластов.

При выборе средств проводки стволов, особый интерес представляет конструкция колонкового набора с возобновляемым забойным источником энергии разрушения горных пород.

Предпочтительные материалы для изготовления техники бурения скважин, элементов гидроструйного аппарата — легкосплавные трубы, высокопрочные композиционные материалы, стойкие к знакопеременным нагрузкам и агрессивной водной среде.

Циркуляционная система разработки залежей подземных вод инъекционно принудительным самоизливом по объему водоотдачи может заменить 3–5 вертикальных скважин, пробуренных по традиционной методике.

В перспективе система может стать средством перевода сельского хозяйства страны на орошаемое земледелие, достижением огромной экономии водных ресурсов, решением проблем сохранения недр и водной безопасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Башкатов, Д.Н. Справочник по бурению скважин на воду / Д.Н. Башкатов. — М.: Недра, 1979. — С. 478–482.
2. Галингер, Э.В. Идеальный гидротаран / Э.В. Галингер // II Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. — 2011. — №11(103). — С. 69–71.
3. Горбунов, А.К. Эжекция и инъекция реагентов в технологиях подготовки / А.К. Горбунов, О.П. Петросян, Д.В. Рябленков // Сб. статей Междунар. научно-практ. конф.: Прорывные научные исследования как двигатель науки. — Уфа: Изд-во ООО «Аэтерна», 2018. — С. 40–42.

4. Дерусов, В.П. Обратная промывка при бурении геологоразведочных скважин / В.П. Дерусов. — М.: Недра, 1984. — С. 101–105.
5. Дроздов, А.Н. Влияние минерализации рабочей жидкости на характеристики жидкостно-газовых эжекторов / А.Н. Дроздов, Н.А. Дроздов, Я.А. Горбылева, Е.И. Горелкина // Бурение и нефть. — 2019. — № 7 и 8. — С. 42–45.
6. Исмагилов, А.Р. О повышении эффективности эжектора с жидкой струей / А.Р. Исмагилов, Е.К. Спиридонов, О.В. Белкина // Источник Пром-Инжиниринг: Тр. III Междунар. научно-техн. конф. — Челябинск, 2017. — С. 13–17.
7. Ксенз, А.Я. К расчету водовоздушного эжектора для серийного опрыскивателя / А.Я. Ксенз, С.И. Камбулов, В.В. Колесник, С.Д. Ритный. — Владикавказ, 2016. — Т. 53. — № 1. — С. 90–97.
8. Людеке, Х.Й. Гидроудар: причины, анализ и способы предотвращения / Х.Й. Людеке, Б. Котэ, К. Паули // Водоснабжение и санитарная техника. — 2015. — № 8. — С. 62–69.
9. Diwan, P. Design and Fabrication of Hydraulic Ram with Methods of Improving Efficiency / P. Diwan, A. Patel, L. Sahu // in International Journal of Current Engineering and Scientific Research. — 2016. — vol. 3. — № 4. — pp 5–13.
10. Besaghi, G. Ejectors on the cutting edge: The past, the present and the perspective / Giorgio Besaghi // Energy Elsevier. — 2019. — vol.170(C). — pp. 908–1003.
11. Guo, X. Optimal Design and Performance Analysis of Hydraulic Ram Pump System / X. Guo, J. Li, K. Yang, H. Fu, T. Wang, Y. Guo, Q. Xia and Wei Huang // Proceeding of Institution of Mechanical Engineering, 2018, Part A: J Power and Energy 0(0), pp. 1–15.
12. Da. Grygo. Effect of the Height of the Delivery Water on Performance of Water Ram / Da. Grygo // Technical Sciences. — 2016. — 19 (2). — pp. 139–149.
13. Mendebaev, T.N. Development of a resource-saving, small-sized downhole hydraulic machine for well drilling / T.N. Mendebaev, N.Zh. Smashov, H.K. Ismailov, B.K. Izakov // Eastern-European journal of enterprise technologies. — 2019. — 6/1 (102). — pp. 70–75. Процентиль — 51.
14. Mendebaev, T.N. Water jet destruction of rocks in well drilling by diamond tools with independent flushing ports / T.N. Mendebaev, N.Zh. Smashov, M.Zh. Kuvatova. // Eurasian mining. — 2019. — 2(32). — pp. 41–43. Процентиль — 63.
15. Vang, K.L. Design and Hydraulic Performance of a Novel Hydraulic ram / K.L.Vang, et al. // 11th International Conference on Hydroinformatics, New York, City, 8 January, 2014, paper no 108.

© Мендебаев Т.Н., Смашов Н.Ж., Нурханова Ж.К., 2021

Мендебаев Токтамыс Нусипхулович // nvc\_almas@mail.ru  
Смашов Нурлан Жаксисекович // nvc\_almas@mail.ru  
Нурханова Жания Камбарбек // zhaniya.nurkhanova@bk.ru

## УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 504.06

Шадрунова И.В., Петрова А.И. (ФГБУН ИПКОН РАН)

### ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

В статье представлен обзор экологических проблем, связанных с переработкой редкоземельных руд. Рассмотрено развитие рынка РЗМ в связи с расширением использования в различных областях. Показана расчетная удельная стоимость РЗМ для ряда реализуемых в мире проектов. Представлена классификация видов воздействия на окружающую среду при разработке месторождений РЗМ и примеры таких воздействий. Выявлено распределение содержания

радиоактивных элементов и РЗМ в рудах разных месторождений. **Ключевые слова:** редкоземельные элементы (металлы), месторождения, технологические схемы, воздействие на окружающую среду, радиоактивные элементы.

Shadrunova I.V., Petrova A.I. (FGBUN IPKON RAS)

### ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE PROCESSING OF RARE EARTH RAW MATERIALS

The article provides an overview of the environmental problems associated with the processing of rare earth ores. The development of the REM market in connection with the expansion of use in various fields is considered. The estimated specific cost of REM for a number of projects implemented in the world is shown. A classification of types of environmental impacts during the development of REM deposits and examples of such impacts are

presented. The distribution of the content of radioactive elements and rare earth metals in the ores of different deposits has been revealed. **Keywords:** rare earth elements (metals), deposits, technological schemes, environmental impact, radioactive elements.

Как известно, существует несколько видов классификации редкоземельных элементов. В частности, в геохимической классификации и в так называемой рыночной классификации выделяют только «легкую» (LREE) и «тяжелую» (HREE) группы. При этом в геохимии ряд HREE — от Tb до Y, а в исследованиях рынков он шире, поскольку включает также Eu и Gd. Классификация, принятая в металлургии — с выделением «средней» (MREE) группы — Sm, Eu, Gd, представляется нам наиболее показательной.

Динамика производства РЗМ в мире, взятая за довольно длительный период (70 лет), дает наглядное представление об этапах развития рынка. Выделяются несколько периодов, в течение которых на рынке преобладали разные страны и различные сырьевые источники.

В 1950-х годах уровень производства составлял не более 6–8 тыс. т, РЗМ получали исключительно при добыче россыпей из монацита. В 1960–1980-х годах основное количество сырья добывалось в США на месторождении Mountain Pass, где основным минералом является бастнезит. С середины 1980-х годов, когда началась добыча на месторождении Bayan Obo, лидерство перешло к Китаю.

В последние годы объемы добычи РЗМ в мире существенно выросли и в 2019 г. составили около 192 тыс. т (в пересчете на оксиды). Доля Китая несколько снизилась (с 90 до 70 %) за счет разработки ряда новых месторождений, в частности, Mount Weld в Австралии.

По объему производства среди отдельных редкоземельных металлов выделяются церий (по оценке

в 2019 г. выпущено в мире свыше 60 тыс. т), лантан (43 тыс. т) и неодим (31 тыс. т) [1].

При этом уровень цен на РЗМ напрямую не коррелирует с объемом производства. Если наиболее распространенные — церий и лантан отличаются сейчас низкой стоимостью (2–3 долл./кг), то цена неодима, являющегося основным компонентом для производства редкоземельных магнитов, выше, чем у церия и лантана в 15–20 раз.

Из представленных РЗМ наибольшей стоимостью отличается тербий (494 долл./кг в 2019 г.) и диспрозий (256 долл./кг в 2019 г.), мировое производство которых не превышает нескольких тыс. т (рис. 1).

Характерным является разнонаправленный характер использования различных редкоземельных металлов в промышленности. Например, церий потребляется в основном в производстве полирующих порошков, добавок в стекла, автокатализаторах и металлургии. Для лантана характерно применение главным образом в катализаторах крекинга и батареях, и в меньшей степени в металлургии. Неодим, празеодим и самарий в основном используются для выпуска магнитов, а иттрий — для производства высокотехнологичной керамики.

Основными видами продукции на основе РЗМ являются в настоящее время катализаторы (крекинга и автокатализаторы-нейтрализаторы) и редкоземельные магниты (неодим-железо-бор и самарий-кобальт). На их долю приходится около 50 % всей редкоземельной продукции в мире.

Переработка руд редкоземельных металлов с получением готовой товарной продукции характеризуется наличием достаточно большого количества стадий технологического процесса. Она включает обогащение руд с получением редкоземельного концентрата (в некоторых случаях эта стадия отсутствует, в частности, при переработке ионно-абсорбционных глин в Китае);

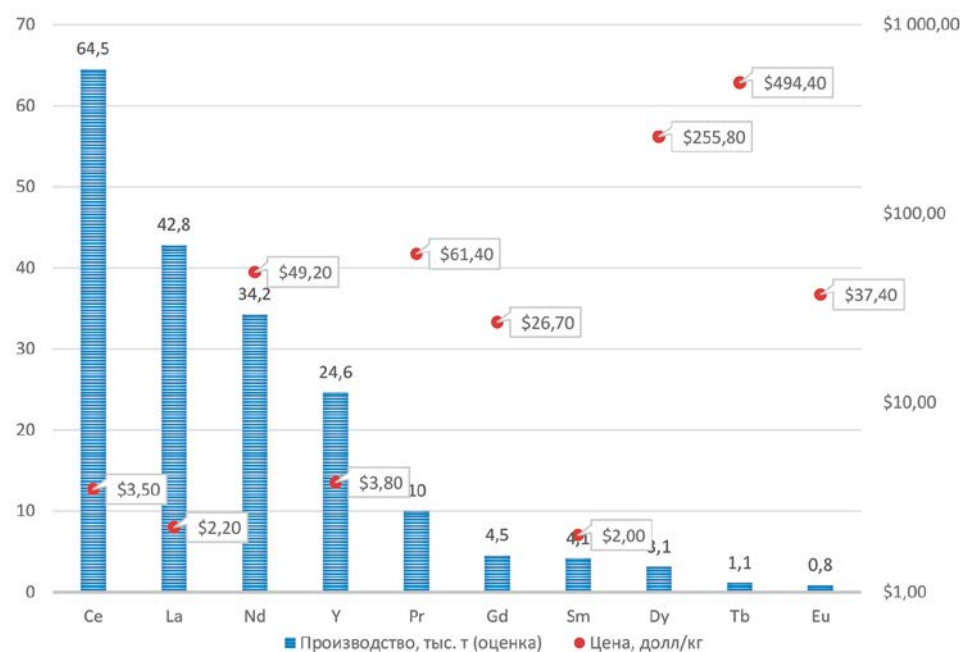


Рис. 1. Объемы производства и цены на отдельные оксиды РЗМ (2019 г.)

гидрометаллургическая (и часто термическая) переработка концентрата, разделение РЗМ на индивидуальные соединения с помощью экстракционных процессов; получение товарной продукции (чаще всего оксидов РЗМ, а также металлов и сплавов).

В схемах переработки часто присутствует цикл получения сопутствующей продукции, а также операции по выведению в отдельные продукты радиоактивных элементов. При этом в технологическом процессе используется значительный объем энергии, воды и реагентов, он характеризуется наличием технологических газообразных выбросов и образованием жидких отходов.

## Классификация видов воздействия на окружающую среду при разработке месторождений РЗМ

Вид воздействия	Технологический процесс	Примеры
Пыль, содержащая радиоактивные элементы	Добыча, дробление, измельчение	Китай — выпуск 1 т произведенного РЗМ сопровождается выделением 13 кг пыли; средняя доза от Th-содержащей пыли для работников, вовлеченных в стадию дробления руды — 1,71 Бк
Газообразные выбросы	Химическая переработка концентратов	Китай — выпуск 1 т оксидов РЗМ на месторождении Вауап Обо влечет за собой образование 63 тыс. м <sup>3</sup> вредных газов, содержащих S и F; после электролиза в расплаве фторидов в отходящих газах содержится до 45 г HF/кг оксидов РЗМ; при электролитическом производстве редкоземельных металлов выделяется от 30–74 г CF <sub>4</sub> и 3–12 г C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> на 1 т условного РЗМ
Жидкие химические отходы	Химическая переработка концентратов	Китай — выпуск 1 т оксидов РЗМ на месторождении Вауап Обо влечет за собой образование 200 м <sup>3</sup> подкисленных сточных вод
Радиоактивные отходы от переработки РЗМ сырья	Химическая переработка концентратов	Китай — выпуск 1 т оксидов РЗМ на месторождении Вауап Обо влечет за собой образование 1–4 т радиоактивных отходов, связанных с Th; Россия — при переработке 1 т лопаритового концентрата образуется 0,3 т жидких радиоактивных отходов

В таблице представлена классификация видов воздействия на окружающую среду при разработке месторождений РЗМ и примеры таких воздействий (главным образом характерных для китайской редкоземельной промышленности).

В данном случае основными проблемами переработки редкоземельного сырья являются значительный объем использования химических веществ (кислоты, щелочи, растворители); выделение в процессе электролиза фторсодержащих газов; содержание Th и U в рудах, необходимость их выделения при переработке и последующего хранения; наличие в технологическом процессе пыли, которая содержит радиоактивные вещества.

Изучение воздействия на природную среду технологической цепочки на китайских предприятиях показало, что выпуск 1 т оксидов РЗМ на месторождении Вауап Обо влечет за собой образование 63 тыс. м<sup>3</sup> вредных газов, содержащих S и F; 200 м<sup>3</sup> подкисленных сточных вод и 1–4 т радиоактивных отходов, связанных с Th. По оценке Китайского общества редкоземельных металлов производство 1 т произведенного РЗМ сопровождается выделением 8,5 кг фтора и 13 кг пыли [2].

В связи с засильем китайских РЗМ на рынке, с одной стороны, и высоким спросом на редкие земли, с другой, в мире активно развиваются проекты новых месторож-

дений РЗМ (в Австралии, Канаде, странах Африки), их насчитывается уже свыше 25.

Эти проекты довольно значительно отличаются минеральным составом сырья, содержанием РЗМ в руде и в концентрате, методами обогащения и гидрометаллургической переработки. Следует отметить, что действующие предприятия по переработке редкоземельного сырья в Китае, Австралии и США, перерабатывают руды с более высокими содержаниями РЗМ, чем подавляющее большинство проектов (не считая ионно-абсорбционного сырья Китая).

Заложенные в проекты технологические схемы переработки редкоземельного сырья в основном включают главным процессом обогащения — флотацию, чаще всего в сочетании с магнитной сепарацией [3]. Есть несколько проектов, где предполагается использование в голове процесса рентгенорадиометрическую сепарацию (PPC).

В ряде проектов не планируется для переработки руд использовать методы механического обогащения (Dubbo, Round Top). Для них характерно невысокое содержание РЗМ в руде и сложный минеральный состав (наличие комплекса минералов-концентратов РЗМ и других ценных компонентов), тонкая вкрапленность. Руды этих месторождений характеризуются повышенным уровнем дорогостоящей «тяжелой» группы РЗМ, что должно компенсировать высокие затраты на гидрометаллургическую переработку сырья.

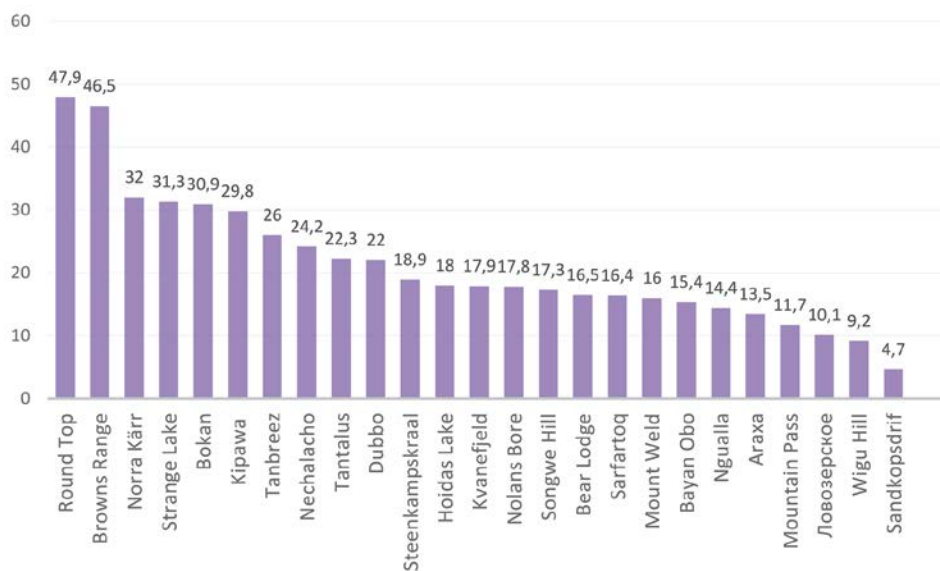


Рис. 2. Стоимость 1 кг РЗМ в месторождениях мира, долл. США

Проведен анализ стоимости 1 кг РЗМ разных по составу месторождений РЗМ. Выявлена высокая степень влияния «тяжелых» РЗМ, содержащихся в рудах, на интегрированную стоимость. В частности, стоимость 1 кг РЗМ («корзины») для месторождений Round Top и Browns Range в ценах 2019 г. составляет свыше 40 долл./кг РЗМ, что определяется «ураганными» содержаниями в рудах диспрозия, тербия и эрбия [4]. Так, например, в руде Round Top (США) относительное содержание  $Dy_2O_3$  и  $Er_2O_3$  — свыше 5 %. Высокая стоимость взвешенной «корзины» РЗМ предопределяет высокую вероятность реализации проектов даже в условиях стагнирующих цен на РЗМ.

Наоборот, высокие доли лантана и церия, характеризующиеся ценой на уровне 2–4 долл./кг, являются причиной низкого уровня общей стоимости 1 кг РЗМ действующих месторождений — как Ловозерского в России, так и месторождения Mountain Pass в США (рис. 2). Суммарная доля церия и лантана в них находится на уровне 82–85 %.

Анализ экономических показателей проектов по разработке месторождений редкоземельного сырья показал, что подавляющий объем затрат приходится на циклы переработки концентрата химическими методами (выщелачивание, экстракция, восстановление). Доля этих затрат составила для разных проектов от 40 до 66 %.

В частности, для месторождения Canakli (Турция), характеризующегося сложным минеральным составом, крайне низким содержанием РЗМ в руде и, поэтому, наличием в технологической схеме прямой гидрометаллургической переработки без использования методов механического обогащения, расчетная доля химических процессов в общих затратах составляет 65,8 %.

Одной из важных особенностей редкоземельного сырья является наличие достаточно высоких содержаний радиоактивных элементов (урана и тория). Наиболее высоким уровнем присутствия тория характеризуется монацит (до 27 % в минерале). Для бастнезита, который

в большей мере находится в месторождениях РЗМ, характерно более низкое содержание тория, почти в 10 раз ниже, чем в монаците [5].

Из минералов, содержащих в своем составе РЗМ, наибольшим содержанием урана отличается ксенотим (до 6 %). Этот минерал, в частности, является основным в рудах уже упомянутого месторождения Browns Range, которые характеризуются высокой удельной стоимостью по РЗМ, поскольку отличаются наличием в основном HREE.

Также относительно высокими содержаниями радиоактивных элементов (до 8 %  $ThO_2$  и до 2,4 %  $U_3O_8$ ) характеризуется фергусонит, встречающийся на ме-

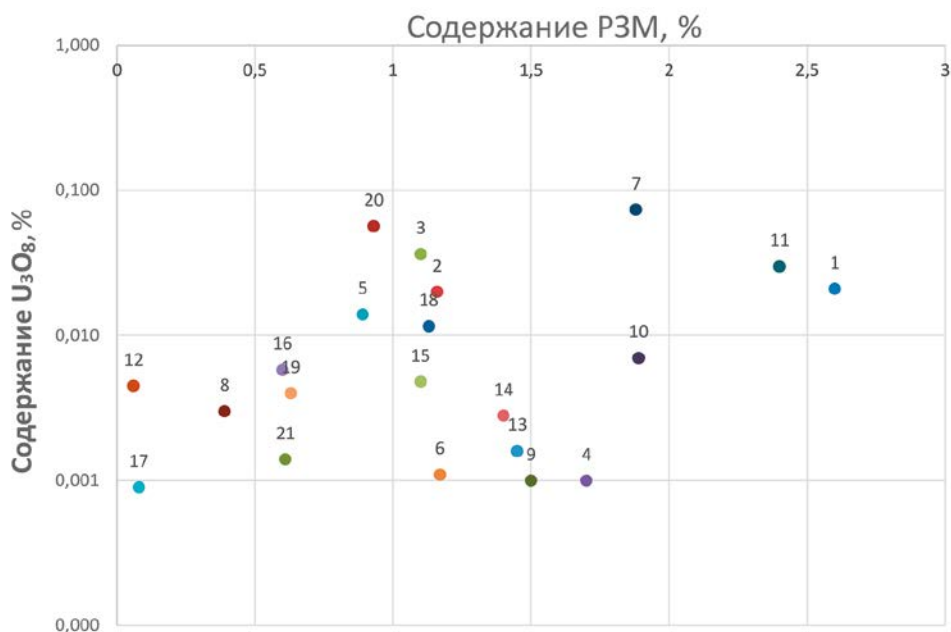


Рис. 3. Распределение содержаний оксидов РЗМ и оксида урана для месторождений, планируемых к разработке в мире



Рис. 4. Распределение содержаний оксидов РЗМ и оксида тория для месторождений, планируемых к разработке в мире

сторожениях Nechalacho (Канада) и Dubbo (Австралия).

На рис. 3 и 4 приведено распределение содержания оксидов РЗМ и тория, оксидов РЗМ и урана для месторождений, планируемых к разработке в мире. Проведенный анализ показал, что данные месторождения характеризуются широким диапазоном содержаний U в рудах — от 1 г/т до 0,4 %, Th — от 7 г/т до 3 %. При этом коэффициент корреляции U/РЗМ и Th/РЗМ составил соответственно 0,33 и 0,48.

Высокие содержания Th в основном связаны с присутствием в рудах монацита. Повышенным уровнем содержания радиоактивных элементов характеризуются руды месторождений РЗМ — Steenkampskraal (ЮАР), NolansBore (Австралия), Агаха (Бразилия), Longonjo (Ангола), Kvanefjeld (Гренландия), StrangeLake (Канада). Их разработка будет характеризоваться высоким уровнем затрат на выделение радиоактивных элементов в отдельные продукты и их безопасное хранение.

Проведен анализ, заложенных в проектах по разработке месторождений, методов и путей выделения радиоактивных элементов из технологического процесса получения РЗМ. В большинстве проектов предполагается селективное осаждение тория в гидрометаллургическом цикле и выведение его из процесса в виде железо-ториевого осадка. Вместе с тем, для ряда проектов (в частности, Nolans Bore, Kvanefjeld, Round Top) отдельно заложено производство товарной урановой продукции (кек, оксид урана).

В классификации воздействий на окружающую среду при разработке месторождений РЗМ одним из

наиболее значимых факторов является присутствие в руде и последующее выделение в технологическом процессе радиоактивных элементов. Распределение содержания радиоактивных элементов в рудах разных месторождений РЗМ определяется составом сырья, который почти во всех случаях носит многокомпонентный характер. Определяющую роль в формировании извлекаемой ценности руды играют дорогостоящие РЗМ (диспрозий, эрбий). Высокий уровень извлекаемой ценности позволяет компенсировать значительные затраты на гидрометаллургическую переработку редкоземельного сырья. Для понимания эффективности реализации проектов различных месторождений РЗМ необходим комплексный подход, включающий одновременное изучение взаимосвязанных экологических и экономических факторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор рынка редкоземельных элементов (металлов) в мире. 2-е издание. — М.: ООО «Исследовательская группа «Инфомайн», 2020. URL: <http://www.infomine.ru/research/38/622> (платный доступ) (дата обращения 01.11.2020).
2. Поляков, Е.Г. *Металлургия редкоземельных металлов* / Е.Г. Поляков, А.В. Нечаев, А.В. Смирнов. — М., 2018. — 732 с.
3. Юшина, Т.И. Обзор рынка РЗМ и технологий переработки редкоземельного сырья / Т.И. Юшина, И.М. Петров, С.И. Гришаев, С.А. Черный // *Горный журнал*. — 2015. — № 2. — С. 59–64, № 3. — С. 76–81.
4. *Development of a Rare Earth Element Resource*. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Dissertation von Patrick Friedrichs. 2017. — 187 p.
5. *Thorium resources as co- and by-products of rare earth deposits*, International Atomic Energy Agency. — Vienna, 2019. — 70 p.

© Шадрунова И.В., Петрова А.И., 2021

Шадрунова Ирина Владимировна  
Петрова Александра Игоревна // [aleks.pet.93@mail.ru](mailto:aleks.pet.93@mail.ru)

## ОХРАНА НЕДР И ЭКОЛОГИЯ

УДК 550.4.02

Кузнецова О.Г., Лаврусевич А.А., Криночкина О.К.  
(«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ))

### ПРОБЛЕМА НОРМИРОВАНИЯ ВАЛОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРЕДЕЛАХ ЗАПАДНОГО СКЛОНА СУРА-СВЯЖСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ И МАРИЙСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

Приведены исследования по валовым формам некоторых металлов в почвах западного склона Сура-Свияжского междуречья Приволжской возвышенности и Марийской низменности. Получены их сравнительные данные относительно ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК) (ориентировочно-допустимый показатель). Поставлена проблема нормирования поллютантов. Пред-

лагается слаборазрушенные техногенной деятельностью человека ландшафты рассматривать в сравнении с фоновыми данными. В качестве маркеров начальной деградации использовались данные содержания тяжелых металлов: меди, свинца, цинка, никеля. Зарегистрирована повышенная концентрация меди в почвах слаборазрушенных ландшафтов гумусово-аккумулятивного горизонта, в два раза превышающая ОДК. Концентрация цинка превышала ОДК во всех пробах «эталонных» и слаборазрушенных ландшафтов в 1,5–2,5 раза. Повышенные концентрации цинка вероятнее всего связаны с загрязнением сопредельных территорий коммунально-бытовыми отходами. Концентрация никеля превышала ОДК в 4,5–6 раз. Основной из источников поступления никеля в почвы — выхлопные газы автотранспорта. Таким образом, слаборазрушенные ландшафты характеризовались превышением ОДК для меди, цинка и никеля. **Ключевые слова:** тяжелые металлы, Сура-Свияжское междуречье Приволжской возвышенности, ОДК, ПДК, фоновые данные.