

К вопросу целесообразности комплексного освоения минеральных ресурсов Уральского региона¹

Валерий Данилович КАНТЕМИРОВ^{1*}

Роман Сергеевич ТИТОВ^{**}

Андрей Михайлович ЯКОВЛЕВ^{***}

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. В статье рассмотрены вопросы, связанные с комплексным освоением минеральных ресурсов Уральского региона. Комплексное освоение месторождений полезных ископаемых является приоритетным направлением совершенствования горного дела, включающим максимально возможное извлечение основного ценного компонента полезного ископаемого, а также изыскание технико-технологических решений по извлечению попутных ценных компонентов и пригодных для производства рыночных продуктов из вмещающих горных пород.

Цель работы – оценка целесообразности комплексного освоения минерального сырья и переработки отходов горно-обогатительного производства для получения продукции товарного качества.

Методология. Попутные компоненты в перерабатываемом минеральном сырье могут иметь промышленное значение лишь в случае, если степень их концентрации в продуктах обогащения, металлургического или химического передела, а также технология последующей переработки данных продуктов обеспечивают экономически эффективное извлечение этих компонентов.

Результаты. Разработаны технологические схемы возможного гидрометаллургического производства на основе хвостов мокрой магнитной сепарации титаномагнетитовой руды концентрата оксида скандия. Приведены результаты изучения химического состава минерального материала с отвалов золоторудного производства г. Пласт на предмет их переработки и извлечения ценных компонентов. Представлены результаты оценки физико-механических свойств ряда вскрышных горных пород АО «Ураласбест» (перидотита, диорита, габбро и серпентинита) на предмет соответствия требованиям нормативных документов для производства щебня.

Выводы. Реализация предложенных мероприятий создаст условия для более рационального использования недр и земельных угодий, обеспечит увеличение объемов валовой продукции и расширит номенклатуру товарной на действующих горных предприятиях без существенного расширения производственных площадей, позволит сократить площади земельного отвода и затраты на складирование горных пород, увеличит загрузку горнодобывающего и обогатительного оборудования.

Ключевые слова: комплексное освоение, минеральные ресурсы, хвосты магнитной сепарации, техногенные образования, физико-механические свойства горных пород, щебень, экономическая эффективность.


Введение

Комплексное освоение минеральных ресурсов означает, что участок недр, содержащий несколько видов минерального сырья, должен осваиваться с учетом всей их совокупности либо одновременно, либо последовательно, либо одного из них, но при обязательном сохранении для последующего использования других сопутствующих ресурсов, в том числе благодаря возможному совершенствованию технологий их извлечения [1, 2].

При этом необходимо добиваться максимально возможного извлечения основного ценного компонента полезного ископаемого (ПИ), включая повторное его извлечение из продуктов обогащения на новом этапе развития технологий, а также, по возможности, извлечение попутных ценных компонентов и пригодных для производства рыночных продуктов вмещающих горных пород.

¹Тема 1. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1.

✉ ukrkant@mail.ru; ukr@igduran.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6486-2740>

**ukrigd15@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3569-2743>

***quality@igduran.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8285-6387>

К основным ценным компонентам рудных ПИ относятся заключенные в них металлы или их соединения, определяющие промышленную значимость и кондиции месторождения, т. е. возможность его рентабельной отработки без учета стоимости прочих (попутных) компонентов.

К попутным компонентам относятся заключенные в полезных ископаемых минералы, металлы и другие химические элементы и их соединения, которые, как правило, не имеют определяющего значения для промышленной оценки месторождения, но при переработке основных полезных ископаемых могут быть рентабельно извлечены и использованы. Понятие «попутный компонент» при современном интенсивном развитии технологий достаточно условное и во многом зависит от меняющейся во времени рыночной конъюнктуры на металлы, что особенно характерно для многих месторождений редких и цветных металлов.

Методология проведения исследований. Попутные ПИ и компоненты в зависимости от форм нахождения, связи с основными для данного месторождения полезными ископаемыми можно разделить на следующие группы [3]:

– *I группа* – попутные ПИ, образующие самостоятельные пласты, залежи или рудные тела в породах, вмещаю-

щих основные ПИ; к этой же группе относятся вскрышные породы, по составу и свойствам пригодные для производства строительных материалов;

– *II группа* – попутные компоненты (минералы), не образующие самостоятельных залежей, но которые при обогащении могут быть выделены в самостоятельные концентраты или промпродукты в количествах, допускающих их последующее извлечение на экономически рациональной основе;

– *III группа* – различного рода примеси в минералах основных и попутных компонентов II группы (изоморфные, механические, микровключения собственных минералов и др.). Преобладающую часть попутных компонентов III группы составляют так называемые рассеянные элементы, широко распространенные в различных твердых полезных ископаемых при весьма низких содержаниях.

На месторождениях, намечаемых к разработке открытым способом, в настоящее время производится оценка возможности использования пород вскрыши (I группа). Возможность их использования устанавливается по результатам оценки показателей, регламентируемых государственными стандартами или техническими условиями для соответствующих видов сырья.

При необходимости запасы попутных компонентов II и III группы подсчитываются отдельно в контурах

Таблица 1. Распределения содержания Sc в минералах титаномагнетитовой руды
Table 1. Distributions of Sc content in minerals of titanomagnetite ore

Минерал	Содержание минерала, %	Среднее содержание Sc, г/т
Клинопироксен (диопсид)	75,40	119,0
Амфиболы (роговая обманка)	9,50	110,8
Ильменит	0,90	99,5
Серпентин, хлорит	0,24	16,1
Титаномагнетит	12,20	15,2
Оливин	0,25	5,1
Плагиоклаз (полевошпат)	1,51	1,6
<i>Итого</i>	100,00	Среднее Sc 105,5 г/т

Таблица 2. Содержание наиболее перспективных ценных компонентов в продуктах магнитной сепарации титаномагнетитовой руды (результаты лаборатории УКР ИГД УрО РАН)

Table 2. The content of the most promising valuable components in the products of magnetic separation of titanomagnetite ore (results of the laboratory of the UKR IM UB RAS)

Элемент	Руда		Концентрат		Хвосты обогащения (ХВ)	
	Среднее содержание, %	Элемент	Среднее содержание, %	Элемент	ХВ ММС-I	ХВ ММС-II
Среднее содержание, г/т						
Sc	> 0,012 (> 120 г/т)	Sc	< 0,0017 (< 17 г/т)	Sc	113	124
Fe _{общ}	15,51	Fe _{общ}	61,12	Fe _{общ}	62 800 (6,28 %)	64 800 (6,48 %)
FeO	12,34	FeO	26,500	V	313,000	299,000
Fe ₂ O ₃	10,12	Fe ₂ O ₃	40,850	Cr	34,300	29,700
V ₂ O ₅	0,13	V ₂ O ₅	0,600	Mn	1126,000	1245,000
TiO ₂	1,28	TiO ₂	2,800	Co	50,400	52,200
Al ₂ O ₃	5,52	Al ₂ O ₃	2,660	Ni	47,000	38,100
Cr ₂ O ₃	0,02	MgO	2,840	Cu	23,900	41,000
MnO	0,17	CaO	1,500	Zn	29,600	49,200
MgO	13,70	SiO ₂	4,190	W	< 0,080	< 0,080
S	0,04	S	0,011	Ga	9,820	9,700

балансовых и забалансовых запасов содержащих их полезных ископаемых. Отнесение запасов попутных компонентов к той или иной категории определяется степенью их изученности, характером распределения, формами нахождения и технологией извлечения.

Попутные компоненты могут иметь промышленное значение лишь в случае, если степень их концентрации в продуктах обогащения, металлургического или химического передела, а также технология последующей переработки данных продуктов обеспечивают экономически эффективное извлечение этих компонентов. При геолого-экономической оценке месторождения решается вопрос об экономической целесообразности разработки и использования наряду с основным также попутных полезных ископаемых и извлечения при переработке минерального сырья или концентратов наряду с основным и попутными полезными компонентами.

Результаты исследований и их анализ. В регионе Урала достаточно широко распространены комплексные рудные месторождения – медно-цинковые, титаномагнетитовые и др. Руда является простой или комплексной, если из нее извлекают соответственно один или несколько полезных компонентов. В комплексных рудах часто содержатся примеси редких металлов, например, в титаномагнетитовых – V, Sc, Nb и др. [4–7].

Наличие в достаточном для извлечения количестве примесей редких элементов повышает ценность руд. Например, одним из перспективных источников получения скандия Sc при довольно стабильном содержании (0,01–0,02 % Sc₂O₃) являются железорудные магматические месторождения Урала [6–9]. В магматических породах Sc концентрируется главным образом в силикатных минералах, где наибольшие содержания характерны для пироксенов (до 130–195 г/т) и габброидов (до 49 г/т) [10].

Скандий и его соединения в настоящее время применяют в производстве легких сплавов, электронной технике, светотехнике, производстве специальной керамики. Сплавы на его основе используются как конструкционный материал для ракет- и самолетостроения, авиационной техники, так как, обладая значительно более высокой температурой плавления, чем алюминий, имеют ту же плотность.

Исследованиями лаборатории УКР ИГД УрО РАН титаномагнетитовой руды установлено, что более 95 % Sc₂O₃, содержащегося в руде, концентрируется в ее силикатных минералах (диопсиде CaMgSi₂O₆ и роговой обманке) и ильмените (FeTiO₃), в среднем 0,013 % Sc₂O₃. На долю диопсида приходится около 90 % содержащегося в титаномагнетитовых рудах скандия, который изоморфно входит в состав минерала (табл. 1).

Из текущих хвостов мокрой магнитной сепарации (ММС), получаемых при обогащении титаномагнетитовых руд и содержащих в больших объемах минерал диопсид, может быть извлечен такой ценный компонент, как скандий Sc (табл. 2) [11–14].

На базе одного из ГОКов, разрабатывающих титаномагнетитовую руду, предлагается организовать опытно-промышленное гидрометаллургическое производство для получения из текущих хвостов ММС (выход 73,4 % оксида скандия марки ОС-99 (с содержанием Sc₂O₃ 99%),

Таблица 3. Расчетные показатели среднего выхода продуктов обогащения титаномагнетитовой руды и извлечения в них Sc
Table 3. Calculated indicators of the average yield of enrichment products of titanomagnetite ore and the extraction of Sc in them

Наименование продуктов обогащения	Средний выход продукта, %	Среднее извлечение Sc в продукт, %
Концентрат	16,4	0,60
Хвосты СМС	10,2	21,12
Хвосты I ММС	49,6	35,78
Хвосты II ММС	18,6	34,98
Хвосты III ММС	3,6	7,41
Хвосты IV ММС	1,6	0,11
Всего по хвостам	83,6	99,40

который является товарным продуктом с рыночной стоимостью ~ 4,5 долл./г. Расчетные показатели среднего выхода продуктов обогащения титаномагнетитовой руды и извлечения в них Sc приведены в табл. 3.

В связи со схожестью физических свойств Sc с рядом редкоземельных элементов получение его чистых соединений относится к многостадийным технологиям повышенной сложности. На первой стадии переработки предусматривается получение черного скандиевого концентрата (ЧСК) с содержанием Sc₂O₃ 2,5–8 %.

На следующих стадиях переработки производится концентрат чистых соединений Sc₂O₃ с содержанием до 99 %. Наиболее эффективными методами извлечения Sc из хвостов обогащения со степенью извлечения компонента 85–90 % являются схемы, включающие процесс ионного обмена и (или) экстракции с использованием на стадии первичного концентрирования Sc фосфорсодержащих реагентов (ионообменных смол или экстрагентов) [15–19].

Лабораторией УКР ИГД разработана технологическая схема получения черного скандиевого концентрата методами гидрометаллургии из хвостов II стадии ММС (рис. 1).

Схема представлена пятью основными технологическими блоками в составе следующих операций: I – предварительная подготовка (активация) исходного материала; II – сернокислотное выщелачивание Sc; III – сорбционное извлечение Sc из кислого раствора; IV – десорбция Sc из насыщенного им ионита; V – осаждение гидроксида скандия с получением черного скандиевого концентрата (ЧСК).

Продолжительность одного технологического цикла получения ЧСК в соответствии с разработанной технологической схемой составляет 90,2 ч. или ~ 4 сут. Объем ЧСК за 1 цикл будет зависеть от производительности опытно-промышленной установки.

Содержание Sc в исходном материале, промежуточных продуктах гидрометаллургической переработки (растворах сернокислотного выщелачивания и десорбции Sc), а также в черном скандиевом концентрате представлены в табл. 4.

ЧСК является промпродуктом для получения товарного скандиевого концентрата ОС-99 с содержанием Sc₂O₃ 99 %.

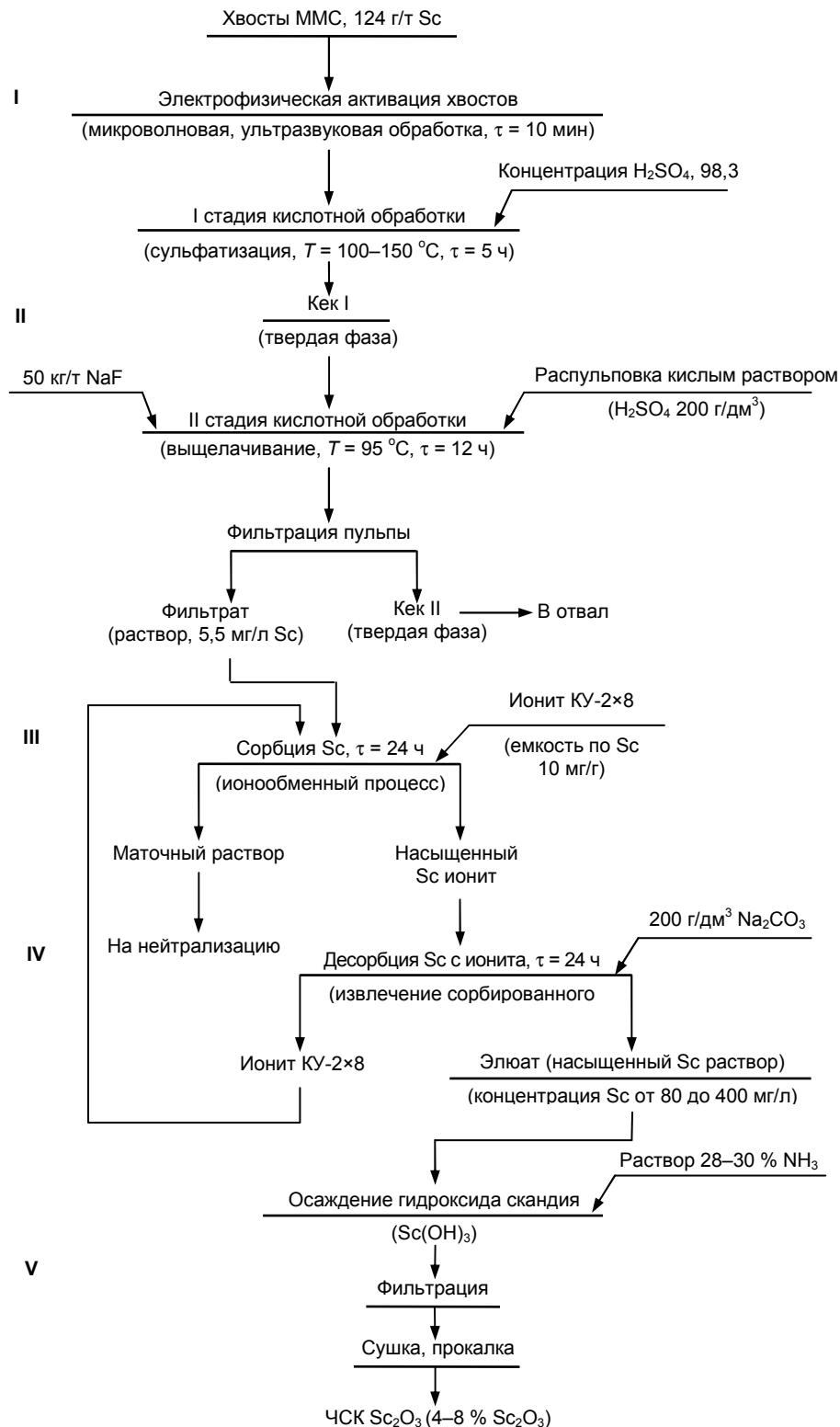


Рисунок 1. Принципиальная технологическая схема извлечения скандия из хвостов II стадии MMC

Figure 1. Process flow diagram of scandium recovery from MMC Stage II tailings

Лабораторией УКР ИГД УрО РАН выполнена предварительная технико-экономическая оценка возможности производства оксида Sc_2O_3 марки ОС-99,0 из полученного ЧСК (рис. 1, табл. 4). При этом использовались результаты патентного поиска, обзора научно-технической литературы, данные о предприятиях-аналогах (например,

АО «Далур» – Крымский ТИТАН). Предварительная технологическая схема получения оксида скандия марки ОС-99 представлена на рис. 2.

Экономические расчеты выполнены с использованием профессионального программного комплекса ПК «Гранд-Смета 2020». В табл. 5 представлены результаты

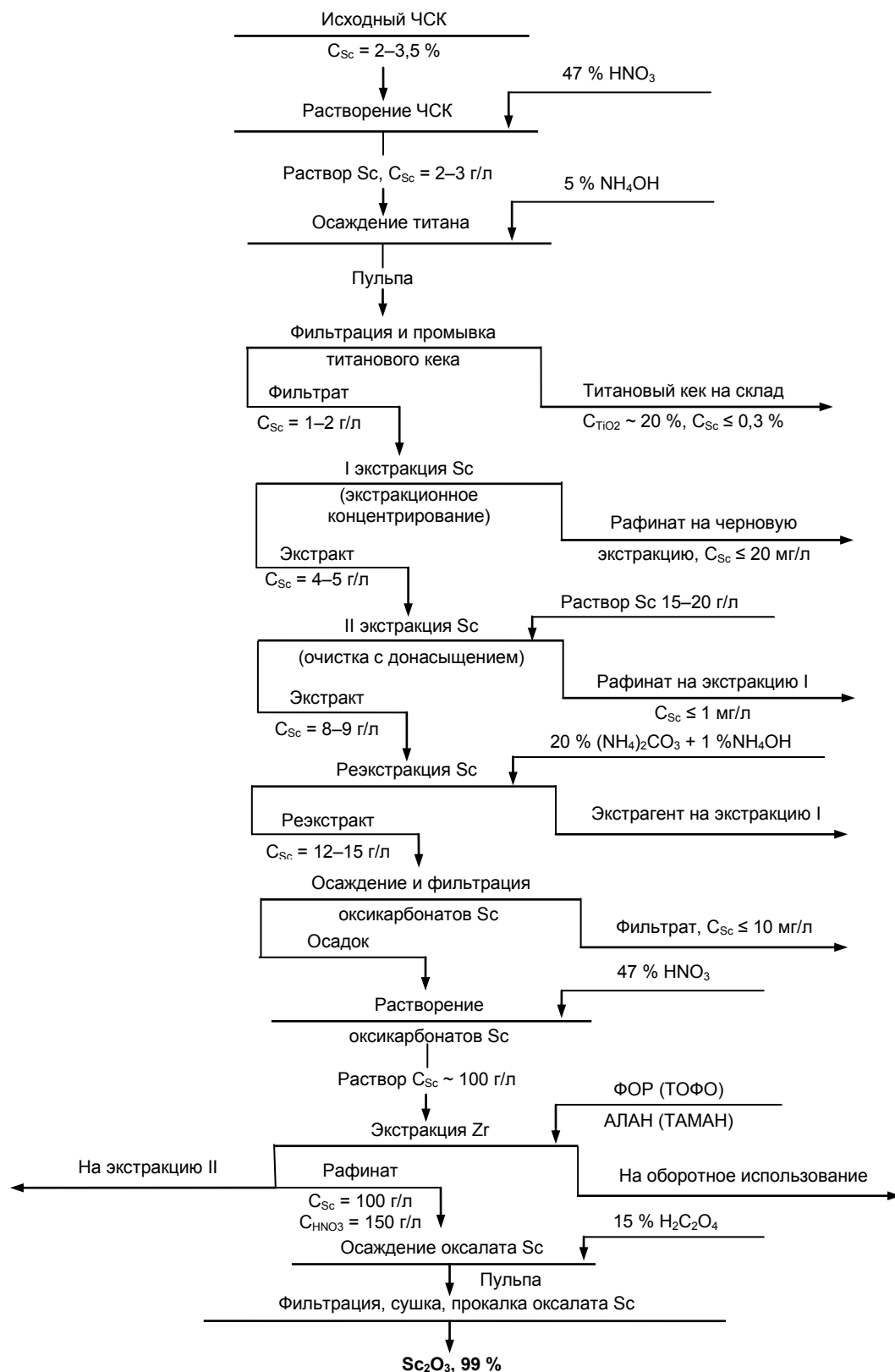


Рисунок 2. Принципиальная технологическая схема получения из ЧСК оксида скандия марки OC-99
 Figure 2. Process flow diagram for obtaining OC-99 brand scandium oxide from PCS

Отмечено, что при многолетнем формировании структуры отвалов, сопровождающимся наличием осадков, сезонных колебаний температуры и влажности, происходит седиментация, или осаждение частиц золоторудного песка к подошвенной части насыпных объектов за счет гравитаци-

онной силы. В конечном итоге это приводит к концентрации золота и серебра в нижней подошвенной части отвалов, что в совокупности с установленными лабораторией УКР содержаниями ценных компонентов позволило выделить участки первоочередного освоения техногенного образования.

Таблица 6. Результаты анализа химического состава золотосодержащего минерального материала, отобранного с разных участков золотоотвалов г. Пласт (атомно-абсорбционный метод)

Table 6. The results of the analysis of the chemical composition of the gold-bearing mineral material taken from different areas of the gold dumps in the city of Plast (atomic absorption method)

Номер пробы	Объект исследований	Содержание, г/т	
		Золото Au	Серебро Ag
<i>Дальне-Николаевский участок (0,481 км²)</i>			
1	Объект № 1 (низ отвала)	0,28	0,83
2	Объект № 1 (середина отвала)	0,44	1,01
3	Объект № 1 (верх отвала 2 м)	0,25	0,20
4	Объект № 1 (пойма)	0,88	1,52
<i>Участок ФЗЦО им. Артема (0,204 км²)</i>			
5	Объект № 2 (верх отвала 10 м)	1,05	1,49
6	Объект № 2 (середина отвала)	0,53	2,79
7	Объект № 2 (пойма)	1,01	0,78
<i>Михайловский участок (0,155 км²)</i>			
8	Объект № 3 (верх отвала 3 м)	0,57	0,50
9	Объект № 3 (верх отвала 10 м)	0,76	0,66
10	Объект № 3 (пойма)	0,85	0,48

Таблица 7. Усредненные значения содержаний элементов в опытных пробах золотосодержащего минерального материала, отобранных с разных участков золотоотвалов г. Пласт (рентгенофлуоресцентный метод)

Table 7. Average values of element contents in experimental samples of gold-bearing mineral material taken from different areas of the Plast gold dumps (X-ray fluorescence method)

Элемент, ед. изм.	Среднее значение	Минимальное содержание в пробе	Максимальное содержание в пробе
Au, г/т	0,662	0,250	1,050
Ag, г/т	1,026	0,200	2,790
Ba, %	0,040	0,018	0,204
Nb, %	0,015	0,007	0,023
Zr, %	0,006	0,002	0,009
Sr, %	0,012	0,002	0,020
Rb, %	0,004	0,001	0,005
Bi, %	0,004	0,002	0,007
Ti, %	0,286	0,210	0,350
Se, %	0,001	0,001	0,001
Pb, %	0,006	0,002	0,015
W, %	0,024	0,014	0,030
Zn, %	0,010	0,003	0,022
Cu, %	0,008	0,006	0,012
Fe, %	3,049	0,038	4,387
Mn, %	0,066	0,025	0,110
Cr, %	0,049	0,037	0,065
As, %	0,065	0,001	0,216

Предварительной оценкой техногенного минерального материала отвалов г. Пласт они были отнесены к золото-серебряному типу, по степени окисления к сульфидному подтипу; по наличию осложняющих технологию обработки компонентов – мышьяковистый тип; по характеристике крупности золота – материал представлен мелкой и тонкодисперсной фракцией. Таким образом, предварительно было установлено, что основной способ обработки материала хвостов будет заключаться в селективной флотации с цианированием (выщелачиванием). Установленное повышенное содержание мышьяка в исходном продукте будет снижено на стадии флотации, при которой степень извлечения минералов концентраторов мышьяка достигает 90 % при pH > 9. При этом введение в

пульпу специальных добавок, к примеру, сульфата натрия Na₂SO₄ и алюминия Al₂(SO₄)₃, повышает селективность извлечения мышьяковистых минералов и повышает качество концентратов.

Использование вскрышных пород действующих горнодобывающих предприятий для производства строительных материалов может стать важным источником расширения минерально-сырьевой базы Урала при минимальных дополнительных капитальных вложениях.

В настоящее время ряд предприятий Уральского региона используют освободившиеся вследствие сокращения основного производства горнодобывающие и дробильно-обогащительные мощности для производства из пород вскрыши щебня крупных фракций, используемых



Рисунок 3. Образцы вскрышных горных пород карьера АО «Ураласбест», подготовленные для испытаний
Figure 3. Samples of overburden rocks of the quarry of AO Uralasbest, prepared for testing

в основном для устройства местных автодорог. Ряд предприятий наладили выпуск значительных промышленных объемов щебня, которые реализуются на рынке в пределах региона. Промышленное производство кубического щебня из пород скальной вскрыши горнодобывающих предприятий Урала может стать одним из наиболее реальных направлений повышения эффективности открытых горных работ и одновременно комплексного освоения недр.

Граниты, доломиты, габбро и известняки являются одними из наиболее перспективных для промышленного использования вмещающих пород рудных карьеров Урала [24]. По своим физико-механическим свойствам значительная часть вскрышных пород этой группы соответствуют требованиям ГОСТ 8267–93, ГОСТ 31436–2011, ГОСТ 25607–2009 и могут быть использованы для производства строительных материалов. Щебень из этих скальных пород пригоден для производства армированного и неармированного бетона (ГОСТ 32495–2013), устройства балластного слоя внутризаводских железнодорожных путей (ГОСТ 7392–2014), строительства автомобильных дорог (ГОСТ 32703–2014), искусственных оснований под фундаменты и др.

Лаборатория УКР ИГД УрО РАН выполнила комплекс исследований четырех разновидностей вскрышных горных пород ОАО «Ураласбест» (перидотит, диорит, габбро и серпентинит, рис. 3) на соответствие их требованиям ГОСТ 31436–2011 как сырья для производства щебня. Основные результаты лабораторных испытаний горных пород представлены в табл. 8 [25].

По результатам исследований (табл. 8) 3 из 4 оцениваемых горных пород (диорит, габбро и перидотит) по физико-техническим свойствам были отнесены к породам, пригодным для производства из них щебня. Серпентинит оценен как неоднородная слабая порода, которую не рекомендуется использовать для производства товарного продукта.

Для определения области применения щебня был выполнен химический анализ материала пород, где нормативные значения содержания вредных компонентов и примесей устанавливались в соответствии с ГОСТ 8267–93 и п. 3.5.2 ГОСТ 26633–2012. Результаты исследований химического состава щебня из смеси исследуемых пород (диорит, перидотит и габбро) фракции 20–40 мм представлены в табл. 9.

Таблица 8. Результаты лабораторных исследований вскрышных горных пород карьера АО «Ураласбест» на пригодность их для производства щебня

Table 8. Results of laboratory studies of overburden rocks of the quarry of AO Uralasbest for their suitability for the production of crushed stone

Контролируемый параметр	Результаты испытаний (средние значения)			
	Диорит	Габбро	Серпентинит	Перидотит
Предел прочности при сжатии [*] , МПа	112,0	96,6	43,1	156,7
Неоднородность пород по прочности на сжатие [*] , %	70,6	8,5	15,4	53,0
Предел прочности при сжатии ^{**} , МПа	160,7	147,7	74,3	109,1
Неоднородность пород по прочности на сжатие ^[2] , %	28,9	27,6	16,2	19,4
Марка породы по пределу прочности при сжатии	M1000	M800	M400	M1400
Марка породы по прочности (дробимости)	1400	1400	1200	1400
Снижение прочности при сжатии, %	He установлена***	He установлена***	41,9	He установлена***
Средняя плотность породы ^{**} , кг/см ³	2,6	2,88	2,55	2,76
Истинная плотность породы, кг/м ³	2,79	3,05	2,64	2,82
Пористость породы, %	6,5	5,8	3,2	2,1
Водопоглощение породы, %	0,15	0,24	0,36	0,07
Истираемость породы, г/см ²	0,092	0,113	0,557	0,534
Морозостойкость горной породы (базовый метод, метод попеременного замораживания и оттаивания):				
25 циклов, МПа	123,5	127,9	61,2	126,2
неоднородность пород при 25 циклах, %	40,5	57,9	44,8	40,2
потеря прочности при сжатии после 25 циклов, %	Нет	Нет	Нет	19,85
35 циклов, МПа	189,4	123,0	57,8	134,6
неоднородность пород при 35 циклах, %	33,1	37,3	23,5	31,4
Морозостойкость в растворе Na ₂ SO ₄ (15 циклов) ^{****} , %			0,84	
Истираемость породы ^{****} , %			19,5	
Марка породы по истираемости			И-1	
Дробимость породы ^{****} , %			6,3	
Марка породы по морозостойкости			F400	

Примечание: *в водонасыщенном состоянии; **в сухом состоянии; ***из-за высокой неоднородности породы; ****определяется для смеси из четырех разновидностей горных пород.

Таблица 9. Результаты исследований химического состава щебня из смеси 3 разновидностей горной породы фракции 20–40 мм

Table 9. Results of studies of the chemical composition of crushed stone from a mix-ture of 3 varieties of rock with a fraction of 20–40 mm

Проба породы щебня	Содержание, %								
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Cr ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO
Диорит	69,70	0,36	14,16	0,89	3,51	Нет	0,05	2,58	1,44
Перидотит	38,52	< 0,05	0,79	4,74	2,93	Нет	0,09	1,50	39,57
Габбро	44,62	0,10	13,56	0,94	3,60	Нет	0,08	14,04	18,70

Проба породы щебня	Содержание, %								
	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	S	Cl	П. п. п.	H ₂ O ⁻	Сумма
Диорит	0,30	5,30	0,08	Нет	Нет	Нет	1,00	0,16	99,53
Перидотит	0,01	0,01	< 0,05	Нет	Нет	Нет	11,61	0,22	99,99
Габбро	0,02	0,23	< 0,05	Нет	Нет	Нет	3,88	0,18	99,95

По результатам химического анализа установлено, что содержание вредных компонентов в исследуемых пробах не превышает их нормативного значения и характеризует щебень, изготовленный из 3 разновидностей горных пород (диорит, габбро и перидотит) как материал, пригодный для использования в строительстве.

АО «Ураласбест» из вскрышных пород производит щебень разных фракций в объеме более 4 млн м³/год, что ежегодно позволяет сохранить примерно до 130 тыс. м² земельных площадей планируемых к отчуждению под отвальное хозяйство, снизить транспортные расходы на

перемещение вскрыши в отвалы за счет сокращения карьерных железнодорожных перевозок на 18 млн т · км/год и получить дополнительный доход за счет реализации щебня в размере примерно 5 млрд руб./год.

Среди вмещающих горных пород особый интерес представляют породы габбро-базальтовой группы, пригодные для получения минерального волокна и изделий на его основе, соответствующих всем требованиям стандартов. Объем отечественного рынка изделий из минеральной ваты находится на уровне более 500 млн долл./год, прогнозируемая емкость рынка может превысить 1,5 млрд долл. Если в настоящее время общая потребность в средствах теплоизоляции

составляет около 15–20 млн м³, то по некоторым прогнозам к 2030 г. общая потребность в утеплителях составит более 50 млн м³. АО «Ураласбест» располагает значительными запасами пород габбро. На базе вскрышных пород габбро Центрального участка карьера организовано экспериментальное производство минеральной ваты. Лабораторией УКР ИГД УрО РАН были выполнены работы по оконтуриванию залежи габбро в пределах карьера АО «Ураласбест» с использованием методов электроразведки [24], что позволило предприятию усовершенствовать планирование горных работ для отработки указанного добычного участка.

Выводы

Комплексное использование минерально-сырьевых ресурсов позволяет значительно повысить качественные технико-экономические показатели работы горнодобывающих предприятий.

Реализация мероприятий по увеличению загрузки горнодобывающего и обогатительного оборудования скальной породой с последующей их комплексной переработкой обеспечивает:

- более рациональное использование недр и земельных угодий;
- высокий уровень концентрации и комбинирования производства за счет создания совмещенных и сопряженных предприятий по переработке попутно добываемых полезных ископаемых;
- значительное увеличение объемов валовой продук-

ции и номенклатуры товарной на действующих горных предприятиях без существенного расширения производственных площадей;

- высокую эффективность капитальных вложений в расширение горных предприятий при незначительных удельных капитальных затратах на попутную продукцию (меньше в 2–2,5 раза, чем на соответствующих специализированных предприятиях);

- существенное снижение себестоимости попутной товарной продукции по сравнению со специализированными предприятиями; значительное уменьшение фондоемкости и увеличение фондоотдачи горных предприятий;
- сокращение площадей, отводимых под отвалы, и затрат на складирование скальных пород и содержание отвального хозяйства, снижение транспортных расходов.

При разработке техногенных месторождений по сравнению с комплексным освоением природных объектов сократятся затраты на горнодобывочные работы и инфраструктуру вследствие исключения работ по удалению вскрышных пород и интенсивному буровзрывному рыхлению массива, а также с учетом того, что техногенные объекты зачастую расположены в хорошо освоенных районах.

Высокие затраты на извлечение ценных компонентов из техногенного минерального сырья вследствие использования сложных экспериментальных и дорогих технологий могут быть в перспективе компенсированы ростом спроса и цен на цветные и благородные металлы, что будет способствовать эффективному освоению техногенных образований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кантемиров В. Д. Технологические особенности освоения новых сырьевых баз // ГИАБ. 2014. № 6. С. 369–373.
2. Шеломенцев А. Г., Беляев В. Н., Дорошенко С. В., Бурый О. В. Минерально-сырьевой комплекс как основа социально-экономического развития Урала // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2012. № 3(11). С. 115–122.
3. Методические рекомендации по комплексному изучению месторождений и подсчету запасов попутных полезных ископаемых и компонентов: рекомендованы к использованию протоколом МПР России от 03.04.2007 №11-17/0044-пр / ФГУ «ГКЗ». М.: ГКЗ Минприроды РФ, 2007. 15 с.
4. Быховский Л. З., Левченко Е. Н., Онтоева Т. Д., Пикалова В. С., Рогожин А. А. Перспективы обеспечения потребностей высокотехнологичных производств России редкометалльным минеральным сырьем // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 106–115.
5. Быховский Л. З., Тигунов Л. П. Стратегическое минеральное сырье: пути решения проблемы дефицита // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2015. № 5. С. 43–49.
6. Быховский Л. З., Пахомов Ф. П., Турлова М. А. Минерально-сырьевая база и перспективы комплексного использования титаномагнетитовых и ильменитовых магматогенных месторождений России // ГИАБ. 2008. № 1. С. 209–215.
7. Борисенко Л. Ф., Еремин Н. Я., Усков Е. Д. Роль скандия в повышении комплексного использования титаномагнетитовых руд // Горная промышленность. 1997. № 1. С. 51–55.
8. Янин Е. П. Скандий в окружающей среде (распространенность, техногенные источники, вторичные ресурсы) // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2007. № 8. С. 70–90.
9. Архипова И. А., Левченко Е. Н., Волкова Н. М., Усова Т. Ю. Модель развития промышленности и рынка РЗМ в России // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 13–18.
10. Ануфриева С. И., Быховский Л. З., Лихникевич Е. Г., Пермьякова Н. А. Природные и техногенные источники получения функциональных материалов на основе редких земель и скандия // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 2-1. С. 118–121.
11. Быховский Л. З., Потанин С. Д., Котельников Е. И. О перспективах и очередности освоения минерально-сырьевого потенциала редкоземельного и скандиевого сырья России // Разведка и охрана недр. 2016. № 8. С. 3–8.
12. Трошкина И. Д., Вацура Ф. Я., Жукова О. А., Тарганов И. Е., Руденко А. А. Извлечение скандия из нетрадиционного железорудного сырья // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. XXXIII. № 1(211). С. 68–70.
13. Botelho Junior A. B., Espinosa D. C. R., Vaughan J., Tenório J. A. S. Recovery of scandium from various sources: A critical review of the state of the art and future prospects // Minerals Engineering. 2021. Vol. 172. P. 68–70. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107148>
14. Bobba S. [et al.]. Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. 98 p. <http://dx.doi.org/10.2873/58081>
15. Соколова Ю. В., Пироженко К. Ю. Сорбция скандия из сернокислых растворов с использованием фосфорсодержащих ионитов промышленных марок // Сорбционные и хроматографические процессы. 2015. Т. 15. Вып. 4. С. 563–570.
16. Bao Sh., Hawker W., Vaughan J. Scandium loading on chelating and solvent impregnated resin from sulfate solution // Solvent extraction and ion exchange. 2018. Vol. 36. No. 1. P. 100–113. <http://dx.doi.org/10.1080/07366299.2017.1412917>
17. Hajmohamadi H., Jafari A. H., Nasab M. S. Adsorption of scandium and yttrium from aqueous solutions by purolite C100Na resin: Equilibrium and kinetic modeling // Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering. 2021. Vol. 40. No. 4. P. 1132–1147. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2020.40295>
18. Mikeli E., Marinos D., Toli A., Pilichou A., Balomenos E., Pnias D. Use of ion-exchange resins to adsorb scandium from titanium industry's chloride acidic solution at ambient temperature // Metals. 2022. Vol. 12. No. 5. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/met12050864>
19. Zhang Ya., Zhao H., Sun M., Zhang Yi., Meng X., Zhang L., Lv X., Davaasambuu S., Qiu G. Scandium extraction from silicates by hydrometallurgical process at normal pressure and temperature // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9. Issue 1. P. 709–717. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.012>

20. Zhang L., Zhang T.-A., Lv G., Zhang W., Li T., Cao X. Separation and extraction of scandium from titanium dioxide waste acid // JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. 2021. Vol. 73. Issue 5. P. 1301–1309. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-021-04629-7>
21. Skaf M., Ortega-López V., Fuente-Alonso J. A., Santamaría A., Manso J. M. Ladle furnace slag in asphalt mixes // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 122. P. 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.085>
22. Туманов В. В., Крюков А. Ю., Савельев Д. С., Колесников А. В., Десятов А. В. Химическое выделение скандия и РЗЭ из отходов алюминиевых производств // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. XXX. № 9. С. 87–89.
23. Шатохин И. М., Кузьмин А. Л., Смирнов Л. А., Леонтьев Л. И., Бигеев В. А., Манашев И. Р. Новый способ переработки техногенных отходов металлургического производства // Металлург. 2017. № 7. С. 19–24.
24. Тимохин А. В., Титов Р. С., Яковлев А. М., Козлова М. В. Исследование возможности электротриии для сортовой геометризации залежи пород группы габбро в сырьевых нормах минераловатного производства (из архивов оксидметрической разведки Урала) // Проблемы недропользования. 2020. № 2(25). С. 160–165. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.02.160>
25. Кантемиров В. Д., Титов Р. С., Яковлев А. М., Козлова М. В. Исследование горных пород карьера ОАО «Ураласбест» на соответствие требованиям для производства из них строительных материалов // Маркшейдерия и недропользование. 2019. № 3(101). С. 42–47.

Статья поступила в редакцию 29 марта 2023 года

On the question of the feasibility of the integrated development of mineral resources of the Ural region

Valeriy Danilovich KANTEMIROV*

Roman Sergeevich TITOV**

Andrey Mikhailovich YAKOVLEV***

Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. The article deals with issues related to the integrated development of the mineral resources of the Ural region. The integrated development of mineral deposits is a priority area for improving mining, including the maximum possible extraction of the main valuable component of the mineral, as well as the search for technical and technological solutions for the extraction of associated valuable components and marketable products suitable for the production of host rocks.

The purpose of the work is to assess the feasibility of the integrated development of mineral raw materials and the processing of mining and processing waste to obtain commercial quality products.

Methodology. Associated components in processed mineral raw materials can be of industrial importance only if the degree of their concentration in the products of enrichment, metallurgical or chemical processing, as well as the technology for the subsequent processing of these products, ensure the cost-effective extraction of these components.

Results. Technological schemes of possible hydrometallurgical production based on tailings of wet magnetic separation of titanomagnetite ore of scandium oxide concentrate have been developed. The results of the study of the chemical composition of the mineral material from the dumps of the gold mining production in the city of Plast for their processing and extraction of valuable components are presented. The results of the evaluation of the physical and mechanical properties of a number of overburden rocks of AO Uralasbest (peridotite, diorite, gabbro and serpentinite) for compliance with the requirements of regulatory documents for the production of crushed stone are presented.

Conclusions. The implementation of the proposed measures will create conditions for a more rational use of subsoil and land, ensure an increase in gross output and expand the range of commodity at existing mining enterprises without a significant expansion of production areas, will reduce the area of land allotment and the cost of storing rocks, increase the load on the mining and processing equipment.

Keywords: integrated development, mineral resources, magnetic separation tailings, man-made formations, physical and mechanical properties of rocks, crushed stone, economic efficiency.

REFERENCES

1. Kantemirov V. D. 2014, Technological features of the development of new resource bases. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 6, pp. 369–373. (In Russ.)
2. Shelomentsev A. G., Belyaev V. N., Doroshenko S. V., Bury O. V. 2012, The mineral resource complex as the basis for the social and economic development of the Urals. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* [Proceedings of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], no. 3 (11), pp. 115–122. (In Russ.)
3. Guidelines for the comprehensive study of deposits and the calculation of reserves of associated minerals and components: recommended for use by the protocol of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 03.04.2007 No. 11-17 / 0044-pr. Moscow, 2007, 15 p. (In Russ.)
4. Bykhovskiy L. Z., Levchenko E. N., Ontoeva T. D., Pikalova V. C., Rogozhin A. A. 2016, Prospects for meeting the needs of high-tech industries in Russia with rare-metal mineral raw materials. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 9, pp. 106–115. (In Russ.)
5. Bykhovskiy L. Z., Tigonov L. P. 2015, Strategic Mineral Raw Materials: Ways to Solve the Deficit Problem. *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* [Mineral resources of Russia. Economics and Management.], no. 5, pp. 43–49. (In Russ.)
6. Bykhovskiy L. Z., Pakhomov F. P., Turlova M. A. 2008, Mineral resource base and prospects for the integrated use of titanomagnetite and ilmenite magmatogenic deposits in Russia. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 1, pp. 209–215. (In Russ.)
7. Borisenko L. F., Eremin N. Ya., Uskov E. D. 1997, The role of scandium in increasing the integrated use of titanomagnetite ores. *Gornaya promyshlennost'* [Mining], no. 1, pp. 51–55. (In Russ.)
8. Yanin E. P. 2007, Scandium in the environment (prevalence, man-made sources, secondary resources). *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnikh resursov* [Problems of the environment and natural resources], no. 8, pp. 70–90. (In Russ.)

✉ ukrkant@mail.ru; ukr@igduran.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6486-2740>

**ukrigd15@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3569-2743>

***quality@igduran.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8285-6387>

9. Arkhipova I. A., Levchenko E. N., Volkova N. M., Usova T. Yu. 2014, Model of development of industry and REM market in Russia. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 9, pp. 13–18. (In Russ.)
10. Anufrieva S. I., Bykhovskiy L. Z., Likhnikovich E. G., Permyakova N. A. 2018, Natural and technogenic sources for obtaining functional materials based on rare earths and scandium. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], vol. 9, no. 2-1, pp. 118–121. (In Russ.)
11. Bykhovskiy L. Z., Potanin S. D., Kotelnikov E. I. 2016, On the prospects and order of development of the mineral resource potential of rare earth and scandium raw materials in Russia. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 8, pp. 3–8. (In Russ.)
12. Troshkina I. D., Vatsura F. Ya., Zhukova O. A., Targanov I. E., Rudenko A. A. 2019, Extraction of scandium from non-traditional iron ore raw materials. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], vol. XXXIII, no. 1 (211), pp. 68–70. (In Russ.)
13. Botelho Junior A. B., Espinosa D. C. R., Vaughan J., Tenório J. A. S. 2021, Recovery of scandium from various sources: A critical review of the state of the art and future prospects. *Minerals Engineering*, vol. 172, pp. 68–70. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107148>
14. Bobba S. [et al.]. 2020, Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 98 p. <http://dx.doi.org/10.2873/58081>
15. Sokolova Yu. V., Pirozhenko K. Yu. 2015, Sorption of scandium from sulfuric acid solutions using phosphorus-containing ion exchangers of industrial grades. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy* [Sorption and chromatographic processes], vol. 15, issue 4, pp. 563–570. (In Russ.)
16. Bao Sh., Hawker W., Vaughan J. 2018, Scandium loading on chelating and solvent impregnated resin from sulfate solution. *Solvent extraction and ion exchange*, vol. 36, no. 1, pp. 100–113. <http://dx.doi.org/10.1080/07366299.2017.1412917>
17. Hajmohamadi H., Jafari A. H., Nasab M. S. 2021, Adsorption of scandium and yttrium from aqueous solutions by purolite C100Na resin: Equilibrium and kinetic modeling. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering*, vol. 40, no. 4, pp. 1132–1147. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2020.40295>
18. Mikeli E., Marinos D., Toli A., Pilichou A., Balomenos E., Pnias D. 2022, Use of ion-exchange resins to adsorb scandium from titanium industry's chloride acidic solution at ambient temperature. *Metals*, vol. 12, no. 5, pp. 1–13. <https://doi.org/10.3390/met12050864>
19. Zhang Ya., Zhao H., Sun M., Zhang Yi., Meng X., Zhang L., Lv X., Davaasambuu S., Qiu G. 2020, Scandium extraction from silicates by hydrometallurgical process at normal pressure and temperature. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, issue 1, pp. 709–717. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.012>
20. Zhang L., Zhang T.-A., Lv G., Zhang W., Li T., Cao X. 2021, Separation and extraction of scandium from titanium dioxide waste acid. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 73, issue 5, pp. 1301–1309. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-021-04629-7>
21. Skaf M., Ortega-López V., Fuente-Alonso J. A., Santamaría A., Manso J. M. 2016, Ladle furnace slag in asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.085>
22. Tumanov V. V., Kryukov A. Yu., Savelyev D. S., Kolesnikov A. V., Desyatov A. V. 2016, Chemical isolation of scandium and rare earth elements from wastes of aluminum production. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], vol. XXX, no. 9, pp. 87–89. (In Russ.)
23. Shatokhin I. M., Kuzmin A. L., Smirnov L. A., Leontiev L. I., Bigeev V. A., Manashev I. R. 2017, A new way of processing man-made waste of metallurgical production. *Metallurg* [Metallurgist], no. 7, pp. 19–24. (In Russ.)
24. Timokhin A. V., Titov R. S., Yakovlev A. M., Kozlova M. V. 2020, Investigation of the possibility of electrometry for varietal geometrization of a deposit of rocks of the gabbro group in the raw material norms of mineral-cotton production (from the archives of the oxidometric survey of the Urals). *Problemy nedropol'zovaniya* [Subsoil use problems], no. 2 (25), pp. 160–165. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2020.02.160>
25. Kantemirov V. D., Titov R. S., Yakovlev A. M., Kozlova M. V. 2019, Study of rocks from the quarry of AO Uralasbest for compliance with the requirements for the production of building materials from them. *Marksheyderiya i nedropol'zovaniye* [Mine surveying and subsoil use], no. 3 (101), pp. 42–47. (In Russ.)

The article was received on March 29, 2023