

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.271.1:622.236.73

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-26-35



ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ РУДНО-РОССЫПНОГО УЧАСТКА ПРИАМУРЬЯ

Хрунина Н.П.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

Аннотация. **Актуальность и цель исследования.** Успешное развитие ядерной и термоядерной энергетики, электротехнической и электронной промышленности возможно только при условии поиска, анализа и освоения новых источников природного сырья. Таким перспективным источником могут стать забалансовые и техногенные золотоносные россыпные и рудные месторождения Дальневосточного региона, содержащие цирконий, титан, олово, вольфрам, серебро, теллур, лантан, церий, свинец, висмут, селен, марганец, иттрий, скандий, гадолиний, лютеций и др. Важным аспектом является разработка технических средств переработки с учетом минералогического и гранулометрического анализа техногенных пород. **Цель работы.** Обоснование гравитационной подготовки техногенных высокоглинистых пород рудно-россыпного узла с повышенным содержанием мелких и тонких частиц ценных компонентов посредством инновационных гидродинамических установок с учетом полученных экспериментальных данных минералогического, элементного, фазового и гранулометрического состава пород. **Результаты.** Осуществлен предварительный анализ высокоглинистой породы техногенных участков рудно-россыпного месторождения Приамурья. С помощью электронного микроскопа получены энергодисперсионные спектры, массовый и атомный состав части минералов. Методом атомно-эмиссионной спектроскопии установлено наличие содержания серебра, преобладание содержания элементов ванадия, марганца и др. В результате предварительной гравитационной обработки проб и плазмохимического воздействия выделены сферические образования оксидов железа FeO до 47%, меди, алюминия. Предложена технологическая схема переработки исследуемой глинистой породы с трудноразрушаемым минералом монтмориллонитом, включающая установку новой конструкции с гравитационным разделением минеральной массы в тонкослойных потоках после предварительного гидродинамического воздействия струей, взаимодействующей с кавитационными элементами. **Выводы.** Установлена перспективность развития исследований в области освоения забалансовых и техногенных золотоносных россыпных и рудных месторождений Дальневосточного региона. На основе предложенных инновационных технических средств обоснована гравитационная подготовка техногенных высокоглинистых пород с повышенным содержанием мелких и тонких частиц ценных компонентов для обеспечения эффективной плазмохимической, электролизной и сорбционной обработки.

Ключевые слова: техногенные высокоглинистые породы, механоактивация, тонкослойное разделение, плазмообработка

© Хрунина Н.П., 2025

Для цитирования

Хрунина Н.П. Один из подходов к комплексной переработке техногенного сырья рудно-россыпного участка Приамурья // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 26-35. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-26-35>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ONE OF THE APPROACHES TO COMPLEX PROCESSING OF MAN-MADE ORE-PLACER RAW MATERIALS OF THE AMUR REGION

Khrunina N.P.

Mining Institute, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Successful development of nuclear and thermonuclear energy, electrical and electronic industries is possible only if new sources of natural raw materials are searched, analyzed and developed. Such a promising source can be off-balance and man-made gold-bearing placer and ore deposits of the Far Eastern region containing zirconium, titanium, tin, tungsten, silver, tellurium, lanthanum, cerium, lead, bismuth, selenium, manganese, yttrium, scandium, gadolinium, lutetium, etc. An important aspect is the development of technical means of processing, taking into account the mineralogical and granulometric analysis of man-made rocks. **Objective.** It is required to substantiate gravity preparation of man-made high-clay rocks of an ore-placer site with a high content of small and fine particles of valuable components by means of innovative hydrodynamic systems, taking into account the experimental data obtained on the mineralogical, elemental, phase and granulometric composition of rocks. **Results.** A preliminary analysis of the high-clay rock of the man-made sites of the Priamur ore-placer deposit has been carried out. Energy dispersion spectra, mass and atomic composition of some minerals were obtained using an electron microscope. The presence of silver content and the predominance of the vanadium, manganese elements and etc. have been established by atomic emission spectroscopy. As a result of preliminary gravity processing of samples and plasma chemical exposure, spherical formations of iron oxides (FeO up to 47%), copper and aluminum were extracted. A technological scheme for processing the clay rock under study with the intractable mineral montmorillonite is proposed, including the installation of a new unit with gravitational separation of the mineral mass in thin-layer streams after preliminary hydrodynamic action by a jet interacting with cavitation elements. **Conclusions.** The prospects for the research development in the field of the development of off-balance and man-made gold-bearing placer and ore deposits in the Far Eastern region have been established. Based on the proposed innovative technical means, the gravitational preparation of man-made high-clay rocks with a high content of small and fine particles of valuable components is justified to ensure effective plasma chemical, electrolysis and sorption treatment.

Keywords: man-made high-clay rocks, mechanical activation, thinly layered separation, plasma processing

For citation

Khrunina N.P. One of the Approaches to Complex Processing of Man-Made Ore-Placer Raw Materials of the Amur Region. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 26-35. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-26-35>

Введение

Освоение на территории Дальнего Востока России техногенных россыпеобразований и рудно-россыпных узлов с ресурсным потенциалом сотни тонн не только золота, но и платины, вольфрамита, шеелита, касситерита, магнетита, ильменита, циркона, рутила, монацита, ксенотима, тантало-ниобата, хромита, киновари, может быть обеспечено посредством развития специальных поисковых исследований с выделением ассоциаций полезных минералов и ареалов их концентраций для попутной или самостоятельной добычи [1–3]. Перспективным направлением является анализ возможных новых источников природного сырья и разработка технологий вовлечения в переработку нетрадиционного техногенного и забалансового сырья, являющегося источником ценных компонентов [3–7]. Продолжаются минералогические

исследования шлихов хвостов доводки и шлихов промприборов россыпных месторождений Хабаровского и Приморского краев, Амурской области. Выделено более 80 золотороссыпных месторождений, содержащих кроме золота – цирконий, титан, олово, вольфрам, серебро, редкие и редкоземельные элементы. При высоком содержании золота некоторые месторождения Приморского края содержат теллур, лантан, церий, высокое содержание олова, свинца, висмута, серебра, селена, марганца, иттрия, скандия, теллура, встречаются гадолиний, лютеций. В шлихах Амурской области отмечено высокое содержание магнетита, титаномагнетита, ильменита, сфена, граната, циркона [1].

Изучение и освоение комплексных россыпей Дальнего Востока становится актуальной задачей в связи с попутной добычей многих дефицитных металлов. В природных золотоносных россыпях Даль-

него Востока представлены ванадинит, содержащий V_2O_5 до 19,3% и более, монацит, содержащий редкоземельные металлы от 50 до 68% (Ce, La, ...) PO_4 , (Ce, La, Th, Ca) $[PO_4, SiO_4, SO_4]$, фергюсонит (Y, Er, Ce...) $(Nb, Ta, Ti)O_4$, содержащий Y до 36,2%, Nb – до 37,7%, Ta – 7,5%, Y_2O_3 – 46%, ксенотим (YPO_4), содержащий Y_2O_3 – 63,1%, и торит ($ThSiO_4, U_3O_8$), содержащий в примесях Nb до 29,7% и Ta до 31,9%) [7]. Вследствие близости ионных радиусов ванадия, железа и титана ванадий не образует большого скопления собственных минералов, а его носителями являются многочисленные минералы титана (титаномагнетит, сфен, рутил, ильменит, галенит). Важнейшие ванадийсодержащие минералы – это патронит $V(S_2)_2$, ванадинит $Pb_5(VO_4)_3Cl$ и некоторые другие [8].

Во многих странах развитие данного направления осуществляется в огромных масштабах. Из комплексных россыпей в значительных количествах извлекаются концентраты минералов редкоземельных, танталониобиевых, вольфрамовых и ряда других редких элементов. Перспективными направлениями использования ванадия считаются ядерная и термоядерная энергетика, электротехника, производство электрохимических источников тока, полупроводниковых материалов. Соединения ванадия применяют как замедлитель нейтронов в ядерных реакторах [9, 10]. Церий и лантан добываются и перерабатываются промышленным способом из бастнезита, монацита и ксенотима. Из ксенотима извлекается иттрий. Из глинистых минералов в Китае посредством ионной адсорбции извлекаются тяжелые редкоземельные элементы тербий и диспрозий [11].

Развитие и дальнейшая модернизация стратегических высокотехнологичных отраслей России – авиастроение, космическая и атомная промышленность, радиоэлектроника и зеленая энергетика – потребует расширения минерально-сырьевой базы для обеспечения стратегическими металлами. Отмечается расширение востребованности таких металлов, как Re, V, Nb, Ta, Ti, In, Zr, Hf, Li, Cd и Ga, редкоземельных элементов [12]. Подчеркивается, что инновационная деятельность является одним из основных направлений развития минерально-сырьевой базы, важным фактором которого является разработка и применение современных прорывных технологий комплексной переработки минерального сырья. Расширение возможных новых источников природного сырья и разработка технологий вовлечения в переработку нетрадиционного техногенного и забалансового сырья в настоящее время является актуальной задачей. При этом получение высококачественной продукции возможно только при минимизации ущерба окружающей среде [13–15].

Освоение техногенных высокоглинистых месторождений южной части Хабаровского края требует поиска и создания более эффективных технологий на основе совершенствования процессов микродезинтеграции с выделением ценных компонентов гравита-

ционными методами [16–18] для последующего извлечения сорбцией или восстановлением в процессе термической обработки [19, 20]. Развитие исследований по изучению активизации гидродинамической микродезинтеграции и разделению полиминеральной составляющей в гидросмесьх идет с расширением внедрения данного направления в производство. Имеют место установки с использованием различных способов воздействия на перерабатываемый материал импульсной энергии физического типа [21, 22]. Известны способы для первичной переработки глинистого материала с использованием теплоносителей и вибровозбудителей – импульсных генераторов переменного тока и соленоидов – в процессе гравитационного разделения на фракции [23]. Данные установки обладают низкой надежностью, износостойкостью и эффективностью.

Рассматриваются аппараты автономного комплекса с безопасными стандартами обогащения для извлечения свободного золота, апробированы высокоэффективные опытные образцы горнообогатительного оборудования [24]. Для интенсификации вскрытия концентратов определена возможность энергетического воздействия и селективной дезинтеграции. Интересные исследования и актуальные результаты получены обработкой микроэлементов потоком ускоренных электронов, которые интенсифицируют процесс новообразования сплавов изометричных и игольчатых индивидов субмикронного размера, и СВЧ-плазмой [25–28]. Установлено, что механоактивация концентрата приводит к увеличению извлечения редкоземельных элементов и циркония на 35,0–44,9% [29, 30]. Переработка техногенного сырья посредством активационной микродезинтеграции является актуальной научно-технической проблемой, решение которой позволит расширить минерально-сырьевую базу месторождений, снизить удельную себестоимость переработки.

Целью исследования является обоснование гравитационной подготовки техногенных высокоглинистых пород рудно-россыпного узла с повышенным содержанием мелких и тонких частиц ценных компонентов посредством гидродинамических установок нового типа с учетом полученных экспериментальных данных элементного, фазового и гранулометрического состава пород.

Результаты исследования

Сотрудниками лаборатории геомеханики и лаборатории разработки россыпных месторождений ИГД ДВО РАН проведены исследования проб техногенного участка 2U месторождения в районе поселка Удинск. Осуществлялось изучение элементного, фазового и гранулометрического состава пород для обоснования рекомендаций по разработке участка. На **рис. 1** представлено изображение исследуемой пробы в исходном состоянии.



Рис. 1. Изображение исследуемой пробы техногенного участка

Fig. 1. Image of the test sample of a man-made site

Определение гранулометрического состава грунта выполняли по ГОСТ 12536-2014. Отобранная проба глинистого грунта высушивалась в сушильном шкафу и просеивалась сквозь сито с размером отверстий 1 мм. Из просеянной пробы методом квартования отобраны навески массой 30 г. Определено преимущественное содержание мелких, тонких частиц ценных компонентов и в сростках размером частиц менее 0,1 мм. Пробы месторождения имеют число пластичности от 0,096 (9,6%) до 0,146 (14,6%) и относятся к тяжелым суглинкам. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено

наличие основного глинистого минерала – монтмориллонита. Монтмориллонит относится к трудноразрушаемым минералам. На рис. 2 представлено изображение минеральных частиц с электронного микроскопа во вторичных электронах, энергодисперсионные спектры, массовый и атомный состав части минералов исследуемой пробы техногенного участка.

По результатам спектрального анализа методом атомно-эмиссионной спектроскопии на установке «Гранд» установлено наличие содержания серебра Ag, преобладание содержания элементов P(130), V(100), Mn(80) со средним содержанием в исходной пробе (г/т), в том числе – Cr(30), Li(25), Ni(18), Pb(13), W, Zn(13), Cu(25), Sn(10), Co(4), Bi, молибдена Mo(0,6), сурьмы Sb(40), мышьяка As(10) (см. таблицу).

Интерес для извлечения по результатам спектрального анализа представляют ванадий, марганец, хром и литий. Для предварительной гравитационной переработки техногенных пород с повышенным содержанием глинистой составляющей необходимо создание условий перехода их в фазу обогащения посредством интенсивного гравитационного воздействия и разделения фракций в тонкослойных потоках. Решение поставленной задачи возможно посредством установки гравитационного типа новой конструкции, осуществляющей процесс не только разделения, но и предварительной механоактивации до микроуровня.

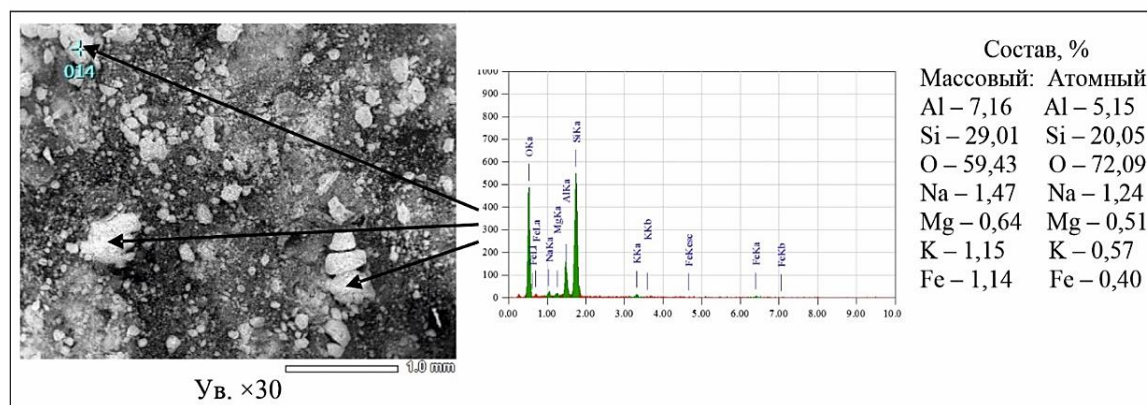


Рис. 2. Изображение исследуемой пробы техногенного участка во вторичных электронах, энергодисперсионные спектры, массовый и атомный состав минералов

Fig. 2. Image of the test sample of a man-made site in secondary electrons, energy dispersion spectra, mass and atomic composition of minerals

Таблица. Результаты спектрального анализа проб техногенного участка

Table. Results of spectral analysis of man-made site samples

Элемент	Ag	As	Cu	Bi	Co	Cr	Li	Mn	Mo	Ni	P	Pb	Sb	Sn	V	W	Zn
Предел обнаружения, г/т	0,03	10	1	1	1	10	10	10	0,1	10	100	1	10	1	1	10	10
Проба 1/2U	0,04	10	25	<1	4	30	25	80	0,6	18	130	13	40	10	100	<10	13

На **рис. 3** представлен общий вид технологической схемы переработки техногенных высокоглинистых песков, содержащих ценные компоненты, посредством разработанных автором установок. Комплекс технологических средств снабжен установкой для извлечения ценных минералов в тонкослойных потоках (Заявка на изобретение РФ № 2024107355 от 18.03.2024г.) и гидродинамическими дезинтеграторами, осуществляющими в условиях низких энергозатрат гравитационную микродезинтеграцию кавитационными элементами (**рис. 4**) [31, 32]. Интенсификация процесса переработки техногенных глинистых пород обеспечивается комбинацией активных гидродинамических воздействий и мягкой активизацией гидродинамических эффектов в условиях тонкослойного разделения на фракции в новой установке. После размыва и классификации гидросмесь с фракциями минеральных компонентов $-0,5$ мм перед подачей в центробежный концентратор подвергается микродезинтеграции. Гидросмесь с частицами размером $+0,5$ мм поступает в дезинтегратор с тонкослойным разделением, на входе которого посредством активных гидродинамических воздействий осуществляется первичное разрушение микросвязей минеральных

частиц под действием энергии давления струи, изменения скоростного режима и кавитации (см. **рис. 4**).

Скорость потока гидросмеси V определяется в зависимости от ее объемного расхода Q и диаметра выходного сечения сопла d по формуле

$$V = \frac{4Q}{3,14d^2}. \quad (1)$$

Изменение термодинамического потенциала системы dE зависит от конструктивных особенностей установки и коэффициента полезного действия η , энергии давления струи W , H/m^2 , турбулентности d_m , образующейся в результате взаимодействия потока с поверхностью, и изменения времени воздействия подводимой энергии dt [31]:

$$dE = \eta W d_m dt. \quad (2)$$

Гидросмесь разделяется на два потока и по наклонным направляющим 1 поступает в секции 2, 3 наклонных желобов дезинтегратора для разделения на фракции посредством гидродинамических эффектов в процессе тонкослойного разделения (см. **рис. 4**).



Рис. 3. Технологическая схема переработки техногенных высокоглинистых песков
 Fig. 3. Technological scheme for the processing man-made high-clay sands

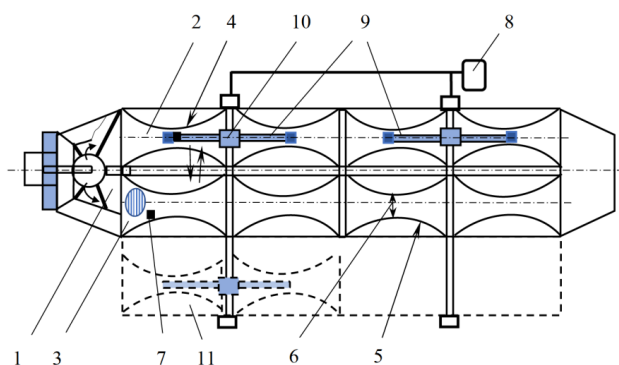


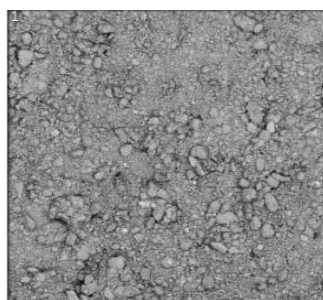
Рис. 4. Гидродинамический дезинтегратор
Fig. 4. Hydrodynamic disintegrator

Наклонные желоба снабжены дугообразными стенками 4, 5, которые формируют сужение пространства при перемещении тонкослойного потока, способствующее усилению активизации расслоения, образованного зазором 6. Происходит дополнительное разрушение связей мелких глинистых частиц с минеральными компонентами посредством периодического волнообразного и стесненного продвижения потока гидросмеси и осаждение более тяжелых частиц. Накопление тяжелой фракции в съемных уловителях фиксируется датчиками 7 автоматической системы управления 8. Подается команда на разгрузку, и штанги 9 механизма подъема 10 позиционируются над секциями гидродинамической активации. Посредством срабатывания захватов с элементами крепления осуществляется перемещение съемных уловителей мелких фракций ценного компонента в зону разгрузки 11. Съемные уловители могут быть выполнены из полиуретана, композитного материала или стеклопластика с элементами шероховатости

различной конфигурации в зависимости от крупности частиц в гидросмеси. Выделенные хвосты поступают в центробежный концентратор. После концентратора хвосты поступают на электролиз и дополнительную обработку разрядом СВЧ с последующей селективной сорбцией серебра Ag, ванадия V, марганца Mn и других ценных компонентов.

В лаборатории физико-химических основ технологии материалов ИМ ХФИЦ ДВО РАН были проведены исследования по обработке проб исследуемой техногенной высокоглинистой породы, участок – 3У, посредством СВЧ-плазмы на опытной установке. Проба предварительно подвергалась микродезинтеграции. Удельная мощность потока СВЧ-излучения достигала 10^4 – 10^5 Вт/см², частота электромагнитного поля составляла 2,44 ГГц, температура на выходе из сопла составляла 9-10 тыс. К. После плазмохимического синтеза многокомпонентной глинистой породы посредством сканирующего электронного микроскопа «VEGA 3 LMN», а также на рентгеновском дифрактометре «MiniFlex II Rigaku» с трубкой из Cu, мощность 0,45 кВт, минимальный шаг $2\theta = 0,01^\circ$, получены данные фазового и элементного анализа образцов. Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) перед и после обработки СВЧ представлены на рис. 5, 6.

На снимке изображения структур после обработки СВЧ выделяются сферические образования оксидов железа FeO до 47,10%, меди и алюминия. Полученные данные подтвердили возможность развития исследований с использованием данной технологии для техногенного сырья и необходимость совершенствования конструктивных параметров плазмохимических установок.



Элемент	Вес. %	Сигма Вес. %	Атом. %	Оксид	Вес. % оксида	Сигма вес. % оксида
O	47.81		63.28			
Na	0.78	0.04	0.72	Na ₂ O	1.05	0.05
Mg	0.59	0.03	0.51	MgO	0.97	0.05
Al	10.72	0.07	8.41	Al ₂ O ₃	20.26	0.13
Si	0.47	0.10	22.97	SiO ₂	65.19	0.22
K	2.10	0.04	1.14	K ₂ O	2.53	0.05
Ca	0.41	0.03	0.22	CaO	0.58	0.0
Ti	0.71	0.04	0.31	TiO ₂	1.18	0.07
Fe	6.41	0.09	2.43	FeO	8.25	0.12

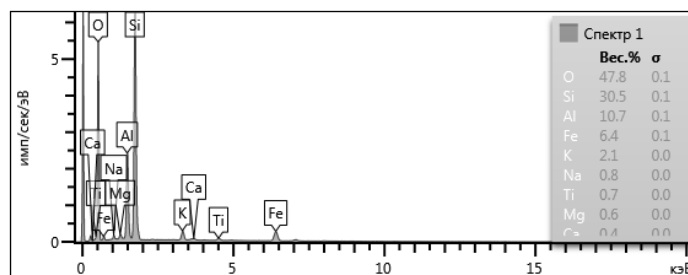
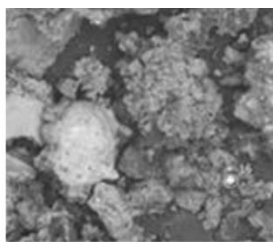


Рис. 5. СЭМ-изображение структур и спектрограмма пробы глины перед синтезом
Fig. 5. SEM image of structures and spectrogram of clay sample before synthesis



Элемент	Вес.%	Сигма Вес. %	Атом. %	Оксид	Вес.% оксида	Сигма вес. % оксида
O	31.30		56.16			
Al	11.20	0.20	11.92	Al ₂ O ₃	21.17	0.37
Si	6.19	0.14	6.32	SiO ₂	13.24	0.29
K	0.31	0.04	0.23	K ₂ O	0.38	0.05
Ti	0.26	0.05	0.16	TiO ₂	0.43	0.09
Fe	36.61	0.38	18.82	FeO	47.10	0.49
Cu	14.13	0.45	6.38	CuO	17.68	0.56

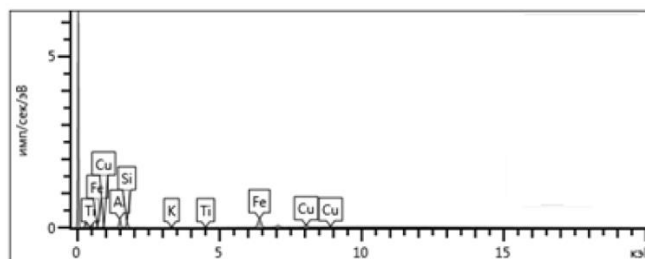


Рис. 6. СЭМ-изображение структур и спектрограмма пробы глины после синтеза
Fig. 6. SEM image of structures and spectrogram of clay sample after synthesis

Возможна комбинация извлечения благородных металлов из растворов и пульп с использованием специального реактора путем обжига и выщелачивания. При этом выщелачивание будет обеспечено снижением расхода растворов за счет существенной микродезинтеграции минерального сырья и активации.

По предварительным оценкам предлагаемая система переработки с активацией микродезинтеграции техногенного сырья с трудно разрушаемыми глинистыми составляющими, структурно связанными с микрочастицами ценных компонентов, повысит качественные характеристики извлечения посредством последующего электролиза, селективной сорбции или цианирования. Дальнейшие исследования в данном направлении будут способствовать развитию промышленного освоения техногенных и забалансовых месторождений региона.

Заключение

1. Проанализирована перспективность развития исследований в области освоения забалансовых и техногенных золотоносных россыпных и рудных месторождений Дальневосточного региона, содержащих кроме золота – цирконий, титан, олово, вольфрам, серебро, редкие и редкоземельные элементы. Некоторые месторождения содержат теллур, лантан, церий, высокое содержание свинца, висмута, селена, марганца, иттрия, скандия, гадолиния, лютеция, магнетита, титаномагнетита, ильменита, сфена, граната, циркона и др. Проведены исследования образцов высокоглинистой породы техногенных участков рудно-россыпного месторождения в районе поселка Удинск.

2. С помощью энергодисперсионного анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии установлено наличие содержания серебра Ag, преобладание содержания элементов (г/т) ванадия V(100), марганца Mn(80), а также Cr, Li, Ni, Pb, W, Zn, Cu, Sn, Co, Bi, Mo, Sb.

3. Предпринята попытка обосновать применение технологической схемы переработки исследуемой гли-

нистой породы с трудноразрушаемым минералом монтмориллонитом, включающая установку новой конструкции с гравитационным разделением минеральной массы в тонкослойных потоках после предварительного гидродинамического воздействия струей, взаимодействующей с кавитационными элементами.

4. В результате обработки проб в дуговой плазменной установке, производимой после механоактивации, выделены сферические образования оксидов железа, меди, титана, алюминия с содержанием оксида железа FeO до 47,10%.

5. После гидродинамического и кавитационного воздействия изменяется термодинамический потенциал минеральных частиц, активизируется реакционная способность при электролизной и плазмохимической обработках, повышается уровень селективной сорбции.

6. Необходимо расширение дальнейших исследований по изучению характеристик техногенного, забалансового сырья и совершенствованию процессов переработки.

Список источников

1. Ван-Ван-Е А.П. Ресурсная база природно-техногенных золотороссыпных месторождений. М.: Изд-во «Горная книга», Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2010. 268 с. ISBN 978-5-98672-222-1.
2. Дистанционное зондирование Земли в рамках исследований по оценке объема техногенного сырья и экологической ситуации при разработке россыпей / Литвинцев В.С., Усиков В.И., Озарян Ю.А., Алексеев В.С. // Георесурсы. 2021. Т. 23(4). С. 116-123. DOI: 10.18599/grs.2021.4.13
3. Multiscale recycling rare earth elements from real waste trichromatic phosphors containing glass / Hu Liu, Shiyin Li, Bo Wang, Kun Wang, Ruize Wu, Christian Ekberg, Alex A. Volinsky // Journal of Cleaner Production. 2019, vol. 238, article 117998. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117998

4. Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Александров А.В. Применение микроволновой обработки для снижения степени упорности углеродистых концентратов // ФТПРПИ. 2020 Т. 56. С. 148-154. DOI: 10.15372/ftprpi20200116
5. Increase in recovery efficiency of iron-containing components from ash and slag material (coal combustion waste) by magnetic separation / Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Chenlong D., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. // Minerals. 2024, vol. 14, no. 2, pp. 136. DOI: 10.3390/min14020136
6. Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России / Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64(6). С. 617-633. DOI: 10.31857/S0016777022060028
7. Хрунина Н.П., Стратечук О.В. Новые аспекты научных и технологических основ направленного изменения состояния и физико-механических свойств песчано-глинистых пород золотосодержащих россыпей. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2007. 138 с. ISBN 978-5-7389-0555-1
8. Чурилов А.Е., Мукаев Е.Г., Горбунова А.В. Ванадий-содержащие ресурсы и химические способы их переработки // Теория и технология металлургического производства. 2017. №3(22). С. 30-33.
9. Kear G., Shah A.A., Walsh F.C. Development of the all-vanadium redox flow battery for energy storage: a review of technological, financial and policy aspects // International Journal of Energy Research. 2012, vol. 36, no. 11, pp. 1105–1120. DOI: 10.1002/er.1863
10. Чижевский В.Б., Шавакулева О.П., Гмызина Н.В. Обогащение титаномагнетитовых руд Южного Урала // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 2. С.5 – 7.
11. URL: <https://www.ftmmachinery.com/blog/how-to-process-rare-earth-elements.html>
12. Чантурия В.А., Николаев А.И., Александрова Т.Н. Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // Геология рудных месторождений. 2023. № 65. С. 425-437. DOI: 10.1134/S1075701523050045
13. Xiong C., Chen X. and Liu X. Synthesis, characterization and application of ethylenediamine functionalized chelating resin for copper preconcentration in tea samples // Chem. Eng. J. 2012, vol. 203, pp. 115–122.
14. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами / Литвиненко В.С., Петров Е.И., Васильевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100
15. Opare E.O., Struhs E. and Mirkouei A. A comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation // Renewable Sustainable Energy Rev. 2021, vol. 143, no. 110917. DOI: 10.1016/J.RSER.2021.110917
16. Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Substantiation of the hydrodynamic disintegration of hydraulic fluid's mineral component of high-clay sand in precious metals placers // Georesources. 2018, vol. 20, no. 1, pp. 51-56. DOI: 10.18599/grs.2018.1.51-56
17. Khrunina N.P., Korneeva S.I. Improving mining methods of high-clay deposits of precious metals // Eurasian Mining. 2014. № 1. С. 15-17.
18. Хрунина Н.П. Совершенствование комплекса средств для переработки высокоглинистых золотосодержащих россыпей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. №2. С. 14–22. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22.
19. Direct evidence for ferromagnetic spin polarization in gold nanoparticles / Yamamoto Y., Miura T., Suzuki M., Kawamura N., Miyagawa H., Nakamura T., Kobayashi K., Teranishi T., Hori H. // Physical Review Letters. 2014, vol. 93, no. 11, 116801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.116801.
20. Дас Н., Девлина Д. Извлечение редкоземельных металлов методом биосорбции: обзор // Редкие земли. 2013. Т. 31. № 10. С. 933-943.
21. Чантурия В.А., Бунин И.З. Достижения в области технологий переработки полезных ископаемых с использованием импульсной энергии // Минералы. 2022. Т. 12. № 9. С. 1177.
22. Gueroult R., Rax J-M., Fisch N.J. Opportunities for plasma separation techniques in rare earth elements recycling // J. Clean Prod. 2018, vol. 182, pp. 1060–1069. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.066
23. Пат. 2262385 РФ. Шлюз для осаждения концентратов тяжелых минералов из пульпы и улавливающий коврик для него / В.Т. Кардаш, А.Э. Чертилин; опубл. 20.10.2005. Бюл. №29.
24. Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд полезных ископаемых / Матвеев А.И., Лебедев И.Ф., Винокуров В.Р., Львов Е.С. // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 613-622. DOI: 10.31897/PMI.2022.90.
25. Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals / Jha M.K., Kumari A., Panda R. et al. // Hydrometallurgy. 2016, vol. 165, part 1, pp. 2-26. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.01.003.
26. Ростовцев В.И. Разработка технологических схем и рекомендаций по переработке бокситов с повышенным содержанием железа и тонких частиц ценных компонентов // ФТПРПИ. 2023. № 6. С. 130-141. DOI: 10.15372/FTPRPI120230612/
27. Balakhonov D.I., Nikolenko S.V. Tungsten Borides Prepared from Tungsten-Containing Concentrate via Exposure to Microwave Plasma // Inorganic Materials. 2023, vol. 59, no. 6, pp. 576-582. DOI: 10.1134/s0020168523060031.
28. Пат. 2264869 РФ. Способ направленного изменения свойств горной породы посредством СВЧ-термомеханического, ультразвукового и гравитационно-аэродинамического воздействий / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев, А.В. Жуков, О.В. Стратечук; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН; опубл. 27.11.2005. Бюл. № 33.
29. Чантурия В.А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов извлечения циркона и

- РЗЭ при глубокой и комплексной переработке эвдиалитового концентрата // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 505-516. DOI: 10.31897/PMI.2022.31
30. Александрова Т.Н. Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 503-504.
31. Хрунина Н.П. Совершенствование конструкции аппарата для микродезинтеграции минеральных компонентов в гидросмесьях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 5-14. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-5-14
32. Хрунина Н.П. Моделирование гидродинамических эффектов при микродезинтеграции высокоглинистых минеральных компонентов в гидросмесьях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 26-34. DOI:10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34
- ### References
1. Van-Van-E A.P. *Resursnaya baza prirodno-tekhnogennykh zolotorossypanykh mestorozhdeniy* [Resource base of natural and technogenic gold placer deposits]. Moscow: Gornaya kniga publishing house, Moscow state mining university publ., 2010, 268 p. (In Russ.) ISBN 978-5-98672-222-1.
 2. Litvintsev V.S., Usikov V.I., Ozaryan Yu.A., Alekseev V.S. Remote sensing of the Earth within the framework of research on the assessment of the volume of technogenic raw materials and the ecological situation in the development of placers. *Georesursy* [Georesources], 2021;23(4):116-123. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.13>
 3. Hu Liu, Alex A. Volinsky, et al. Multiscale recycling rare earth elements from real waste trichromatic phosphors containing glass. *Journal of Cleaner Production*. 2019;238(117998). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117998>
 4. Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Aleksandrov A.V. The use of microwave treatment to reduce the degree of refractoriness of carbon concentrates. *FTPRPI* [Journal of Mining Science], 2020;56:148-154. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/ftprpi20200116>
 5. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Chenlong D., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Increase in recovery efficiency of iron-containing components from ash and slag material (coal combustion waste) by magnetic separation. *Minerals*. 2024;14(2):136. <https://doi.org/10.3390/min14020136>
 6. Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikentyev I.V., Lalomov A.V., Murashov K.Y. Fundamental problems of the development of the mineral resource base of high-tech industry and energy in Russia. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits], 2022;64(6):313-328. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0016777022060028>
 7. Khrunina N.P., Stratechuk O.V. Novye aspekty nauchnykh i tekhnologicheskikh osnov napravlenno go izmeneniya sostoyaniya i fiziko-mekhanicheskikh svoystv peschano-glinistykh porod zolotosoderzhashchih rossypey [New aspects of scientific and technological foundations of directed changes in the state and physical and mechanical properties of sandy-clay rocks of gold-containing placers]. Khabarovsk: Pacific National University Publishing House, 2007, 138 p. ISBN 978-5-7389-0555-1 (In Russ.)
 8. Churilov A.E., Mukaev E.G., Gorbunova A.V. Vanadium-containing resources and chemical methods of their processing. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production], 2017;3(22):30-33. (In Russ.)
 9. Kear G., Shah A.A., Walsh F.C. Development of the all-vanadium redox flow battery for energy storage: a review of technological, financial and policy aspects. *International Journal of Energy Research*. 2012;36(11):1105-1120. <https://doi.org/10.1002/er.1863>
 10. Chizhevsky V.B., Shavakuleva O.P., Gmyzina N.V. Enrichment of titanomagnetite ores of the Southern Urals. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012;(2):5-7. (In Russ.)
 11. Electronic resource. Available at: <https://www.ftmmachinery.com/blog/how-to-process-rare-earth-elements.html>
 12. Chanturia V.A., Nikolaev A.I., Aleksandrova T.N. Innovative ecologically safe processes for extracting rare and rare earth elements from ores of complex material composition. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits], 2023;(65):425-437. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1075701523050045>
 13. Xiong C., Chen X., and Liu X., Synthesis, characterization and application of ethylenediamine functionalized chelating resin for copper preconcentration in tea samples. *Chem. Eng. J*. 2012;203:115-122.
 14. Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the state role in the management of mineral resources. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2023;259:95-111. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
 15. Opere E.O., Struhs E., and Mirkouei A., A comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation. *Renewable Sustainable Energy Rev*. 2021;143(110917). <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110917>
 16. Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Substantiation of the hydrodynamic disintegration of hydraulic fluid's mineral component of high-clay sand in precious metals placers. *Georesources*. 2018;20(1):51-56. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.1.51-56>
 17. Khrunina N.P., Korneeva S.I. Improving mining methods of high-clay deposits of precious metals. *Eurasian Mining*. 2014;(1):15-17.
 18. Khrunina N.P. Improvement of the complex of means for the processing of high-clay gold-bearing sands of placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University],

- 2021;19(2):14-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22>.
19. Yamamoto Y., Miura T., Suzuki M., Kawamura N., Miyagawa H., Nakamura T., Kobayashi K., Teranishi T., Hori H.. Direct evidence for ferromagnetic spin polarization in gold nanoparticles. *Physical Review Letters*. 2014;93(11):116801 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.116801>.
 20. Nilanjana Das, Devlina Das. Extraction of rare earth metals through biosorption: An overview. *Redkie zemli [Journal of Rare Earths]*, 2013;31(10):933-943
 21. Chanturia V.A., Bunin I.Z. Achievements in the field of mineral processing technologies using pulsed energy. *Mineraly [Minerals]*, 2022;12(9):1177. (In Russ.)
 22. Gueroult R., Rax J.-M., Fisch N.J. Opportunities for plasma separation techniques in rare earth elements recycling. *J. Clean Prod.* 2018;182:1060–1069. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.066>
 23. Kardash V.T., Chertilin A.E. *Shlyuz dlya osazhdeniya koncentratov tyazhelykh mineralov iz pulpy iulavlivayushchiy kovrik dlya nego* [Sluice for precipitation of heavy mineral concentrates from pulp and catching carpet for it]. Patent RF, no. 2262385, 2005.
 24. Matveev A. I., Lebedev I. F., Vinokurov V. R., Lvov E. S. Scientific and experimental bases of dry enrichment of mineral ores. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 2022;256:613-622. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.90>.
 25. Jha M.K., Kumari A., Panda R. et al. Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals. *Hydrometallurgy*. 2016;165(1):2-26. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.003>.
 26. Rostovtsev V.I. Development of technological schemes and recommendations for the processing of bauxite with a high content of iron and fine particles of valuable components. *FTPRPI [Journal of Mining Science]*, 2023;6:130-141. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI120230612/>
 27. Balakhonov D.I., Nikolenko S.V. Tungsten borides prepared from tungsten-containing concentrate via exposure to microwave plasma. *Inorganic Materials*. 2023;59(6):576-582. <https://doi.org/10.1134/s0020168523060031>.
 28. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Zhukov A.V., Stratechuk O.V. Sposob napravlennoy izmeneniya svoystv gornoy porody posredstvom SVCH-termomekhanicheskogo, ultrazvukovogo i gravitacionno-aerodinamicheskogo vozdeystviy [Method of directed change of rock properties by microwave thermomechanical, ultrasonic and gravitational aerodynamic effects]. Patent RF, no. 2264869, 2005.
 29. Chanturia V.A. Scientific substantiation and development of innovative processes for the extraction of zircon and REE in deep and complex processing of eudialyte concentrate. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 2022;256:505-516. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.31>
 30. Aleksandrova T.N. Complex and deep processing of mineral raw materials of natural and man-made origin: state and prospects. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 2022;256:503-504. (In Russ.)
 31. Khrunina N.P. Improvement of the design of the apparatus for microdisintegration of mineral components in hydromixtures. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*, 2023;21(3):5-14. (In Russ.) doi: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-5-14
 32. Khrunina N.P. Modeling of hydrodynamic effects in microdisintegration of high-clay mineral components in hydromixtures. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*, 2022;20(3):26-34. (In Russ.) doi:10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34

Поступила 21.06.2024; принята к публикации 12.12.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 21/06/2024; revised 12/12/2024; published 28/03/2025

Хрунина Наталья Петровна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра
Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия.
Email: npetx@mail.ru. ORCID 0000-0001-8117-0922

Natalia P. Khrunina – PhD (Eng.), Lead Researcher,
Mining Institute, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.
Email: npetx@mail.ru. ORCID 0000-0001-8117-0922