
АНАЛИЗ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Научная статья
УДК 550.4:553+553.41
DOI: 10.7868/S3034530825040113

Разработка методов пробоподготовки шлихов титаноносных россыпей для извлечения полезных компонентов (Сихотэ-Алинь, Приморье)

В.П. Молчанов✉, А.А. Юдаков

Владимир Петрович Молчанов

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия
vpmol@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7206-356X>

Александр Алексеевич Юдаков

доктор технических наук, главный научный сотрудник
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
etcih@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4261-6615>

Аннотация. Выполнены исследования по отработке технологического процесса пробоподготовки кондиционных титаноносных песков из россыпей ультрабазитов Сихотэ-Алинского орогенного пояса к металлургическому переделу. Изучены вещественный состав, терморфные свойства основных и попутных минералов. Определен реестр полезных компонентов (титан, золото, платина, редкие и редкоземельные элементы и др.), представляющих промышленный интерес. Применение разработанной методики пробоподготовки позволило довести золотоильменитовое сырье до промышленных требований с соблюдением ресурсосберегающих принципов и без нанесения урона окружающей среде.

Ключевые слова: стратегические металлы, золотоильменитовые россыпи, обогащение, гравитация, электромагнитная сепарация, ультрабазиты, Сихотэ-Алинский орогенный пояс, Приморье

Для цитирования: Молчанов В.П., Юдаков А.А. Разработка методов пробоподготовки шлихов титаноносных россыпей для извлечения полезных компонентов (Сихотэ-Алинь, Приморье) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 4. С. 138–145. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825040113>

Финансирование. Исследование технологии пробоподготовки шлихов для извлечения стратегических металлов выполнено за счет государственного задания Института химии ДВО РАН, тема № 0205-2023-0002. Изучение минералогии и геохимии шлиховых проб выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00093.

Original article

Development of methods for sample preparation of titanium-bearing placer slurry for extraction of useful components (Sikhote-Alin, Primorye)

V.P. Molchanov, A.A. Yudakov

Vladimir P. Molchanov

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher
Far Eastern Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
vpmol@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7206-356X>

Alexander A. Yudakov

Doctor of Sciences in Technique, Chief Researcher
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
etcih@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4261-6615>

Abstract. Research has been carried out on the development of the technological process of sample preparation of conditioned titanium-bearing sands from placers of ultrabasites of the Sikhote-Alin orogenic belt for metallurgical processing. The material composition and thermomorphic properties of the main and associated minerals have been studied. A register of useful components (titanium, gold, platinum, rare and rare earth elements, etc.) of industrial interest has been determined. The application of the developed sample preparation methodology made it possible to bring gold-ilmenite raw materials up to industrial requirements in compliance with resource-saving principles and without causing damage to the environment.

Keywords: strategic metals, gold-ilmenite placers, enrichment, gravity, electromagnetic separation, ultrabasites, Sikhote-Alin orogenic belt, Primorye

For citation: Molchanov V.P., Yudakov A.A. Development of methods for sample preparation of titanium-bearing placer slurry for extraction of useful components (Sikhote-Alin, Primorye). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(4):138-145. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825040113>

Funding. The study of the technology of sample preparation of concentrates for the extraction of strategic metals was carried out at the expense of the state assignment of the Institute of Chemistry of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, topic N 0205-2023-0002. The study of the mineralogy and geochemistry of concentrate samples was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation N 23-17-00093.

Введение

С развитием наукоемких технологий области применения и объемы потребления стратегических металлов в нашей стране постоянно расширяются. В связи с этим совершенно очевидна необходимость развития ресурсного потенциала критически важных полезных ископаемых, в том числе и за счет открытия новых и переоценки малоизученных объектов. Издавна к стратегическим металлам относят твердые виды полезных ископаемых, существенные для национальной безопасности. Так, золото обеспечивает финансовую безопасность государства. В последние годы другие металлы приобрели критическую важность для многих промышленных отраслей. Перейдя из категории экзотических металлов

в стратегические ресурсы, они оказались крайне востребованными технологиями будущего: редкоземельные элементы для производства мобильных телефонов, компьютеров, а титан – для применения в медицине, авиастроении, космической технике и т.д. В конце прошлого века в зарубежной литературе появились понятия «критические металлы» и «критическое минеральное сырье», прочно утвердившиеся в экономике ведущих промышленно развитых стран. Они включают твердые полезные ископаемые, практически незаменимые для развития наукоемких технологий, но крайне рискованные в своем получении потребителем. Многие из этих критических металлов (титан, золото, металлы платиновой группы, тантал, гафний, ванадий, цирконий и др.) присутствуют в комплексных рудах и россыпях ультрабазитов Сихотэ-Алинского орогенного пояса [1], указывая на необходимость проведения дополнительных минералого-геохимических и технологических исследований. Одним из примеров таких потенциально перспективных объектов может послужить Ариадненский массив ультраосновных пород и сопровождающий его широкий круг рудо-, россыпепроявлений стратегических и критически важных полезных компонентов [2]. Изучение особенностей их концентрирования, вещественного состава, гранулометрии, типоморфных свойств основных и попутных россыпеобразующих минералов, в первую очередь ильменита и золота, позволит не только локализовать участки их максимального распространения, но и оценить возможности промышленного извлечения этих полезных компонентов.

Нашей целью явилось проведение минералогических и технологических исследований по отработке методов пробоподготовки шлихового материала золото-, титаноносных россыпей ультрабазитов Сихотэ-Алиня для их последующего вовлечения в промышленный оборот.

Объект и методы исследований

Ариадненский массив ультрабазитов располагается в центральной части Приморья – среднем течении р. Малиновка (бассейн водосбора р. Б. Уссурка, правого притока р. Уссури, в свою очередь впадающей в р. Амур). Ариадненский рудно-россыпной узел, совпадающий с контурами массива, включает одноименное месторождение ильменита и несколько промышленно значимых титаноносных россыпей [3].

Рудные тела Ариадненского месторождения представляют собой залежи сложной морфологии северо-восточного простираения протяженностью до 2200 м при ширине до 400 м и прослеженные по падению до 400 м. Среднее содержание TiO_2 в них составляет 6,16%, V_2O_5 – 0,086%, Fe_2O_3 – 13,28%, Sc – 0,0045%. С глубиной в руде отмечается увеличение концентрации Cu и Ni, достигающих соответственно 0,1 и 0,3%.

Протяженность наиболее полно изученной аллювиальной россыпи долины р. Тодохова и ее правого притока руч. Потапова составляет соответственно 4,8 км и 1,2 км при ширине до 520 м и 280 м, средней мощности продуктивного пласта 7,4 м и содержанием ильменита до 375,5 кг/м³. Балансовые запасы TiO_2 категории $C_1 + C_2$ по состоянию на 01.01.2025 г. составляют 702 тыс. т, а прогнозные ресурсы достигают 500 тыс. т. В процессе проведения авторами работ по этим объектам получен обширный каменный материал, позволяющий значительно расширить представления о природе стратегического минерального сырья ариадненских россыпей. Оценка возможностей извлечения основных промышленных и попутных компонентов в россыпях ранее не проводилась, что и определило направление наших исследований.

Для достижения поставленной цели потребовалось выполнить комплекс минералогических и технологических исследований. В пределах аллювиальных россыпей Ариадненского массива р. Падь Тодохова и кл. Потапова, отобрано три пробы металлоносных песков общим весом 900 кг, которые и послужили предметом исследований. Для выявления полного спектра полезных компонентов применялись методы рентгенофазового (дифрактометр D-8 ADVANCE, с использованием программы поиска EVA с банком порошковых данных PDF-2) и рентгенофлуоресцентного (спектрометр Shimadzu EDX 800 HS) анализов. Определение золота в пробах осуществляли методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) на разработанной в Институте химии ДВО РАН компактной установке с радионуклидным источником возбуждений на основе Cf-252 [4].

Минералогические исследования осуществлялись с применением электронно-зондового микроанализатора Jeol Superprobe JXA 8100 с системой INCA Energy 350 Oxford Instruments и электронного сканирующего микроскопа EVO-500XVP с системой INCA Energy 350 Oxford Instruments. Образцы для электронно-зондового микроанализа готовили в виде полированных шайб с запрессованными в них эпоксидной смолой минеральными зернами. Полученные искусственные монтировки предварительно изучались в отраженном свете оптического микроскопа. Далее на поверхности образцов в вакууме на установке CC 7650 (Quarum Technologies Ltd., Великобритания) напыляли проводящий слой углерода толщиной до 20 нм для последующих аналитических исследований.

Технологические исследования выполнены по традиционной для обогащения ильменит-содержащих песков схеме с предварительным гравитационным обогащением и последующей электромагнитной сепарацией. При этом использовались серийные концентрационные столы и электромагнитные сепараторы мокрого типа.

Методика исследований

Определение стратегии промышленного освоения металлоносных рудных и россыпных образований Сихотэ-Алиня предполагает получение необходимой информации о минеральном состоянии как для объекта в целом (породы, технологические продукты), так и различных его составляющих, в том числе для главных и попутных компонентов. Отсюда следует, что успешное продвижение в этом направлении будет зависеть от технологии обогащения. Подобные минералого-технологические исследования в настоящее время успешно используются специалистами различных стран мира для решения широкого круга геологических и прикладных задач [5].

Комплексная минералого-геохимическая технология включает следующие операции:

- 1) обогащение исходной пробы на гравитационной установке;
- 2) разделение полученной тяжелой фракции на несколько классов по крупности зерен ситованием;
- 3) выделение магнитных концентратов каждой размерной фракции;
- 4) отбор некоторых характерных зерен из крупных классов;
- 5) изготовление однослойных полированных шлифов для всех размерных фракций концентратов;
- 6) минералогические исследования полированных шлифов концентратов и отобранных характерных зерен;
- 7) обобщение полученной информации применительно к задачам исследования.

Принципиальная схема исследований ариадненских металлоносных песков включала следующие операции:

- квартование исходного материала для отбора аликвота с целью определения его среднего химического состава;
- минералогический анализ исходных песков;
- выделение концентрата из первичного шлихового материала с применением методов гравитации;
- разделение концентрата ситованием на 7 размерных классов (в порядке уменьшения, мм): 1) >6, 2) 2–6, 3) 1–2, 4) 0,5–1, 5) 0,2–0,5, 6) 0,1–0,2, 7) –0,1;
- в каждом классе крупности проведена электромагнитная сепарация;
- для каждого класса крупности определены содержания титана;
- из минералов магнитной и немагнитной фракции концентратов изготовлены однослойные полированные шлифы, которые изучены с применением оптической микроскопии, электронной микроскопии и микрозондового анализа.

Результаты исследований и их обсуждение

Предметом исследований была крупнообъемная проба продуктивных песков (до 2 т) россыпи р. Падь Тодохова. Предварительные минералогические исследования (см. таблицу) исходного шлихового материала показали, что основным промышленным

Таблица

Вещественный состав исходных металлоносных песков

Минералы/группы минералов	Содержания минералов, мас. %
<i>Породообразующие</i>	<i>Исходная проба</i>
Кварц	33,3
Плагиоклазы (альбит)	20,5
К-Полевые шпаты (ортоклаз)	2,2
Тальк	10,4
Пироксены (авгит)	9,5
Амфиболы:	
актинолит	3,4
роговая обманка	5,2
Глинисто-слюдистые:	
мусковит	3,3
вермикулит	0,4
каолинит	6,5
Хлориты	0,7
Гидроксипатит	1,4
Сумма	96,8
<i>Рудные</i>	<i>Исходная проба</i>
Ильменит	1,6
Титаномагнетит	0,8
Рутил	0,2
Хромит	Ед. зн
Брукит	0,2
Магнетит	Ед. зн
Монацит	0,4
Циркон	Ед. зн
Титанил	Ед. зн
Сумма	3,2
Общая сумма	100,0

Примечание. Ед. зн. – единичные знаки.

титаносодержащим минералом является ильменит, в небольших количествах присутствуют титаномагнетит, титанил, рутил, монацит и т.д. Химическому составу исходных продуктивных песков присуще (мас. %) преобладание TiO_2 (19,55), SiO_2 (19,72), Fe_2O_3 (19,9), MgO (4,48). Среди постоянных примесей фиксируются редкие, редкоземельные и благородные металлы. Редкоэлементный состав характеризуется присутствием (г/т) Ta (до 100) и Nb (до 11). Концентрации редкоземельных элементов незначительно выше кларкового

уровня. Содержание Au и Pt редко превышают 0,1 г/т. Нельзя не обратить внимание на высокий уровень концентрации (г/т) V (до 730), Co (340), Zn (230).

Исходный материал прошел расситовку на классы +6 мм и –6 мм. Класс +6 мм ушел в хвосты, –6 мм поступил на отсадочную машину, где произошла еще одна расситовка материала на классы +2 мм и –2 мм. Шлих с размером частиц более 2 мм прошел обогащение на отсадочной машине, а менее 2 мм – послужил предметом исследований с использованием серийных концентрационных столов, магнитных и электромагнитных сепараторов.

После этого шлихи прошли обогащение на гравитационной установке. Полученные концентраты посредством электромагнитной сепарации были разделены на магнитную и немагнитную фракции. Вещественный состав гравитационных концентратов характеризуется высоким выходом магнитной фракции (93–95 мас. %) и низким – немагнитной (5–7 мас. %). Основу магнитной фракции составляет ильменит (до 95%). Химический состав магнитной фракции характеризуется высокими концентрациями (мас. %) TiO_2 (39,79), Fe_2O_3 (34,47), MgO (1,8), MnO (0,42). Нельзя не отметить повышенные концентрации SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , вероятно, связанные с наличием во фракции сростков ильменита с амфиболами, пироксеном и плагиоклазом. Отличительной особенностью материала магнитной фракции является высокий уровень присутствия следующих элементов (г/т): V – 800, Nb – 210, Nd – 100, Co – 290, Cu – 490 и Zr – 280.

По данным ситового анализа основная масса ильменита приурочена к классу крупности –1,0 мм, который был принят в качестве продуктивного. При этом в целом по месторождению ильменит представлен следующими фракциями (мас. %): –0,1 мм – 5,74; 0,1–0,2 мм – 34,74; 0,2–0,5 мм – 53,24; 0,5–1,0 мм – 5,70; 1,0–2,0 мм – 0,58. Данные гранулометрического анализа указывают, что около 80 % основной массы ильменита находится в размерном интервале 0,1–0,5 мм. Фракция –1,0 мм прошла дополнительную расситовку на 10 размерных классов (в порядке уменьшения, мкм): 1) >800, 2) 800–630, 3) 630–500, 4) 500–400, 5) 400–315, 6) 315–200, 7) 200–160, 8) 160–100, 9) 100–63, 10) <63. По данным рентгенофлуоресцентного анализа установлено, что наиболее продуктивным по концентрациям титана является интервал крупности 160–400 мкм (см. рисунок).

Согласно требованиям промышленности, содержание TiO_2 должно быть не менее 45 мас. %. Для получения магнитных концентратов были применены повторная электромагнитная сепарация с удалением фракции –63 мкм, где фиксируется основное количество немагнитных составляющих. Это позволило получить ильменитовый концентрат с содержаниями TiO_2 до

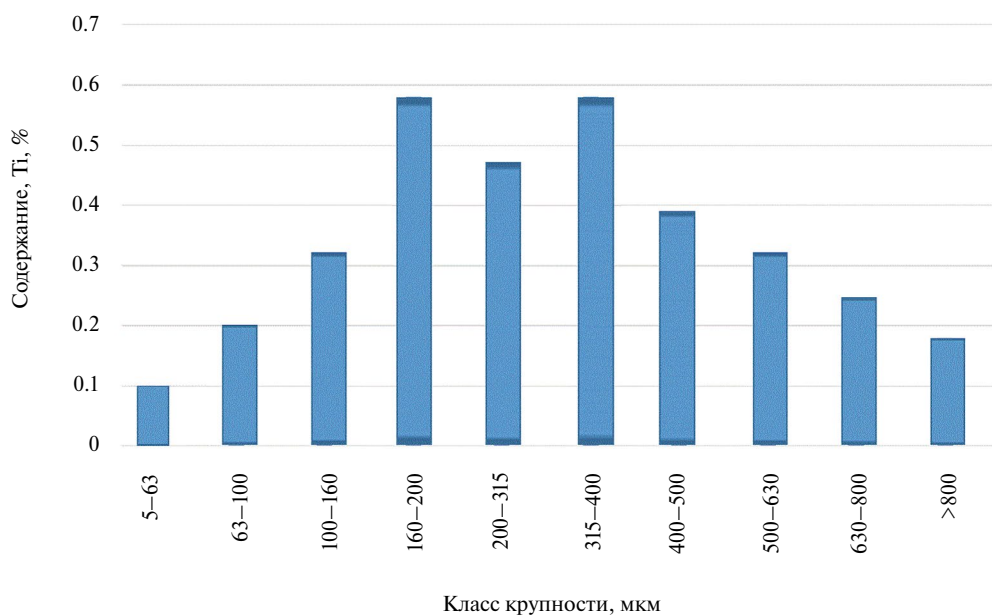


Рис. Гистограмма содержаний Ti (мас. %) по классам крупности магнитной фракции

49,5 мас. % и одновременным снижением массовой доли лимитируемых примесей (мас. %) SiO_2 (1,02) и Cr (0,2), что вполне отвечает требованиям промышленного производства [6].

Ильменит является основным источником получения диоксида титана, одного из самых востребованных титансодержащих продуктов на мировом рынке [7]. Он представляет собой минеральный вид переменного состава FeTiO_3 , где Fe^{2+} может изоморфно замещаться Mg^{2+} и Mn^{2+} . Стехиометрический состав ильменита характеризуется присутствием Ti (31,6 мас. %), или в пересчете на кислород 52,6% TiO_2 . Состав ариадненских ильменитов по данным микрозондового анализа характеризуется довольно значительными вариациями содержания основных компонентов (здесь и далее концентрация элементов в мас. %): Fe – 31,30–35,15; Ti – 31,09–35,15; O – 30,02–32,82. Кроме того, в них фиксируется устойчивая примесь Si (до 1,20); Al (до 0,05); Mg (до 0,49); Ca (до 0,16); V (до 1,10); Mn (до 1,94); Hf (до 1,32). В ямках и на отдельных гранях ильменитов проявляется «лейкоксенизация»: Ti – 30,29; Fe – 6,71; Cr – 0,30; Ca – 1,07; Si – 2,37; Al – 0,61; Mg – 1,33; O – 57,32. Исследования естественных поверхностей ильменитов выявили наличие выделений апатита (P – 11,98; Ca – 0,88; O – 45,79; Al – 1,21; Si – 3,27; Fe – 1,85; Ni – 0,13; La – 8,99; Ce – 19,46; Nd – 6,42), а также циркона, самородного никеля и интерметаллидов Pb–Sn.

Немагнитная фракция в сущности представляет собой смесь (мас. %) анортита (36,9), кварца (24,3), роговой обманки (17,6), сфена (15,4) и циркона (3,8). Кроме того, в незначительных количествах присутствуют монацит, рутил и апатит. Из рудных минералов преобладают сульфиды (единичные зерна пирита, арсенопирита, антимонита и галенита) и самородные металлы (золото, платина, цинк и никель). Немагнитный концентрат характеризуется следующим химическим составом (мас. %): SiO_2 – 49,6; CaO – 13,2; Al_2O_3 – 11,0; TiO_2 – 9,4; ZrO_2 – 4,23; P_2O_5 – 4,15; Fe_2O_3 – 3,23; MgO – 1,84; Na_2O – 1,67; K_2O – 1,18; V_2O_5 – 0,096. Микроэлементы концентрата можно подразделить на две группы. Первая из них включает редкие и редкоземельные элементы (г/т): Hf – 830, Ce – 320, Y – 220. Во вторую входят благородные металлы – Au, Ag и Pt, концентрации которых меняются в пределах 0,5–3,0 г/т.

Все золотины, выделенные из немагнитной фракции, по особенностям химизма можно разделить на две группы: ртутистую и медистую. Находки самородного золота с высокими концентрациями Cu и Hg неоднократно отмечались в рудо-, россыпепрооявлениях, тяготеющих к массивам базит-ультрабазитов России [8, 9]. Факт сохранения геохимических характеристик россыпных золотин первично-магматического генезиса имеет принципиальное значение, поскольку может использоваться при оценке перспектив ресурсного потенциала интрузий ультрабазитов не только юга Дальнего Востока, но и других регионов.

Заключение

Минералого-геохимическое изучение шлихов из золотоильменитовых россыпей ультрабазитов Сихотэ-Алиня пород позволило установить, что помимо титана, золота и платины в них присутствует широкий спектр стратегических металлов, среди которых прежде всего необходимо отметить такие промышленно важные, как V, Co, Ta, Nb и Pd.

Установлено, что основу магнитного концентрата исходного шлихового материала составляет ильменит (до 95–97 мас. %), который после несложных технологических операций легко доводится до промышленных кондиций. Его отличительной чертой является присутствие повышенных концентраций V, Nb, Nd, Co.

Немагнитный концентрат примечателен присутствием таких дефицитных для промышленности металлов, как Hf, Ce, Y, а применение современных технологий обогащения [10] позволит дополнительно извлечь из них благородные металлы Au, Ag, Pt и Pd с соблюдением ресурсосберегающих принципов и без нанесения существенного урона экологической обстановке. Извлечение критических металлов из титаноносных песков может повысить рентабельность разрабатываемых объектов. Учет особенностей пробоподготовки титаноносных шлихов до кондиционного состояния позволит более обоснованно наметить пути освоения российских комплексных месторождений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Архипова Ю.А. Современное состояние титановой базы Дальнего Востока России и перспективы ее освоения // Региональная экономика: теория и практика. 2010. № 32 (167). С. 36–43.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн.1. 572 с.
3. Molchanov V.P., Khanchuk A.I., Androsoy D.V. Gold- and platinum-bearing minerals of the late mesozoic Ariadne ultramafic massif (Sikhote-Alin orogenic belt) // Russian Journal of Pacific Geology. 2024. Vol. 18, No. 5. P. 560–574. <https://doi.org/10.1134/S1819714024700325>
4. Ivannikov S.I., Markin N.S., Zheleznov V.V. Determination of uranium in solutions by the neutron activation analysis method with ²⁵²Cf radionuclide neutron source // Nuclear Technology and Radiation Protection. 2021. Vol. 36, No. 1. P. 12–17. <https://doi.org/10.2298/NTRP201217005I>
5. Рудашевский Н.С., Рудашевский В.Н., Антонов А.В. Универсальная минералогическая технология исследования пород, руд и технологических продуктов // Региональная геология и металлогения. 2018. № 73. С. 88–102.
6. Байбеков М.К., Попов В.Д., Чепрасов И.М. Производство четыреххлористого титана. М.: Металлургия, 1980. 120 с.
7. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries. 2018. 200 p.
8. Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Огородников В.Н. Золотое оруденение, сопряженное с альпино-типными ультрабазитами (на примере Урала) // Литосфера. 2002. № 4. С. 63–77.
9. Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н., Яблокова С.В., Шатилова Л.В. Самородное золото в рудных и россыпных месторождениях России: атлас / под ред. А.И. Кривцова. М.: ЦНИГРИ, 2003. 184 с.
10. Молчанов В.П., Юдаков А.А. Возможности извлечения стратегических металлов из техногенных образований юга Дальнего Востока России // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 1 (233). С. 144–155. <https://doi.org/10.31857/S0869769824010109>

REFERENCES

1. Arkhipova Yu.A. The current state of the titanium base in the Russian Far East and the prospects for its development. *Regional Economics: Theory and Practice*. 2010;32(167):36–43. (In Russ.)
2. Khanchuk A.I. (Ed). Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia. Vladivostok: Dal'nauka; 2006. Book 1. 572 p. (In Russ.)
3. Molchanov V.P., Khanchuk A.I., Androsoy D.V. Gold- and platinum-bearing minerals of the late mesozoic Ariadne ultramafic massif (Sikhote-Alin orogenic belt). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2024;18(5):560–574. <https://doi.org/10.1134/S1819714024700325>
4. Ivannikov S.I., Markin N.S., Zheleznov V.V. Determination of uranium in solutions by the neutron activation analysis method with ²⁵²Cf radionuclide neutron source. *Nuclear Technology and Radiation Protection*. 2021;36(1):12–17. <https://doi.org/10.2298/NTRP201217005I>
5. Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Antonov A.V. Universal mineralogical technology for the study of rocks, ores and technological products. *Regional Geology and Metallogeny*. 2018; 73:88–102. (In Russ.)
6. Baibekov M.K., Popov V.D., Cheprasov I.M. Production of titanium tetrachloride. Moscow: Metallurgy; 1980. 120 p. (In Russ.)
7. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries. 2018. 200 p.
8. Sazonov V.N., Murzin V.V., Ogorodnikov V.N. Golden mineralization associated with alpinotypic ultrabasites (on the example of the Urals). *Lithosphere*. 2002;(4):63–77. (In Russ.)
9. Nikolaeva L.A., Gavrilov A.M., Nekrasova A.N., Yablokova S.V., Shatilova L.V. Native Gold in Ore and Placer Deposits of Russia. Moscow: TsNIGRI; 2003. (In Russ.)
10. Molchanov V.P., Yudakov A.A. Possibilities of extracting strategic metals from technogenic formations in the South of the Russian Far East. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;233;(1):144–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869769824010109>