

## Золото-ильменитовые россыпи Сихотэ-Алиня (Приморье) как перспективные источники стратегических металлов

Владимир П. Молчанов<sup>1</sup> [vpmol@mail.ru](mailto:vpmol@mail.ru)  0000-0001-7206-356X  
Михаил А. Медков<sup>2</sup> [medkov@ich.dvo.ru](mailto:medkov@ich.dvo.ru)  0000-0002-9417-0312

<sup>1</sup> Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр-т Столетия Владивостока, 159, г. Владивосток, 690022, Россия

<sup>2</sup> Институт химии ДВО РАН, пр-т Столетия Владивостока, 159, г. Владивосток, 690022, Россия

**Аннотация.** В Приморье россыпное золото добывалось задолго до прихода первых русских землепроходцев со времен Бохайского царства (VIII-X века). Многовековая эксплуатация месторождений драгоценных металлов привела к истощению их геологических запасов, что не могло не отразиться на резком снижении объемов добычи. Вместе с тем, есть веские основания полагать, что золотой потенциал региона далеко не исчерпан. Нужны новые подходы к прогнозу, поискам и освоению источников минерально-сырьевых ресурсов. К числу таких альтернативных источников относятся комплексные рудо-россыпепроявления стратегических металлов, в которых золото является попутным компонентом. Издавна к стратегическим металлам относят твердые виды полезных ископаемых, существенные для национальной безопасности. Многие из них (титан, металлы платиновой группы, редкие и редкоземельные элементы) присутствуют в рудах и россыпях, связанных с базитами и гипербазитами Приморья. Примером тому могут послужить золото-ильменитовые россыпепроявления Ариадненского массива ультраосновных пород. Задачей настоящих исследований явилась оценка возможностей промышленной переработки этих россыпей с применением методов пирогидрометаллургии. Для этого были разработаны основы комплексной технологии извлечения полезных компонентов. На начальной стадии исходные пески прошли гравитационное обогащение с последующим разделением электромагнитной сепарацией на магнитную и немагнитную фракции. Затем из магнитного материала, представленного ильменитом, с использованием сульфатного метода извлекался диоксид титана. На конечном этапе немагнитная фракция, включающая основную массу золота, послужили исходным сырьем для воздействия выщелачивающих растворов. Предлагаемые технические решения позволят расширить перспективы минерально-сырьевой базы юга Дальневосточного региона с соблюдением принципов рационального природопользования и защиты окружающей среды.

**Ключевые слова:** Дальний Восток России, Ариадненский массив базит-гипербазитов, золото-ильменитовые россыпи, стратегические металлы, пирогидрометаллургия

## Gold-ilmenite deposits of the Sikhote-Alin (Primorye) as promising sources of strategic metals

Vladimir P. Molchanov<sup>1</sup> [vpmol@mail.ru](mailto:vpmol@mail.ru)  0000-0001-7206-356X  
Michael A. Medkov<sup>2</sup> [medkov@ich.dvo.ru](mailto:medkov@ich.dvo.ru)  0000-0002-9417-0312

<sup>1</sup> Far East Geological Institute FEB RAS, 159 Prospekt 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia

<sup>2</sup> Institute of Chemistry FEB RAS, 159 Prospekt 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia

**Abstract.** Placer gold was mined in Primorye long before the arrival of the first Russian explorers from the time of the Bohai kingdom (VIII-X centuries). The centuries-old exploitation of precious metal deposits led to the depletion of their geological reserves, which could not but affect the sharp decline in production volumes. At the same time, there are good reasons to believe that the gold potential of the region is far from being exhausted. We need new approaches to forecasting, prospecting and developing sources of mineral resources. These alternative sources include complex ore-placer occurrences of strategic metals, in which gold is an associated component. For a long time, the strategic metals include solid types of minerals that are essential for national security. Many of them (titanium, platinum group metals, rare and rare earth elements) are present in ores and placers associated with basic and hyperbasites of Primorye. An example of this is the gold-ilmenite placers of the Ariadne massif of ultramafic rocks. The objective of this research was to assess the possibilities of industrial processing of these placers using pyro-hydro-metallurgy methods. For this, the foundations of an integrated technology for extracting useful components were developed. At the initial stage, the initial sands underwent gravity concentration followed by separation by electromagnetic separation into magnetic and non-magnetic fractions. Then titanium dioxide was extracted from the magnetic material represented by ilmenite using the sulfate method. At the final stage, the non-magnetic fraction, including the bulk of the gold, served as the feedstock for the action of the leaching solutions. The proposed technical solutions will expand the prospects for the mineral resource base in the south of the Far Eastern region in compliance with the principles of rational nature management and environmental protection.

**Keywords:** Far East of Russia, Ariadne massif of basite-hyperbasites, gold-ilmenite placers, strategic metals, pyro-hydro-metallurgy

Для цитирования

Молчанов В.П., Медков М.А. Золото-ильменитовые россыпи Сихотэ-Алиня (Приморье) как перспективные источники стратегических металлов // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 4. С. 242–246. doi:10.20914/2310-1202-2020-4-242-246

For citation

Molchanov V.P., Medkov M.A. Gold-ilmenite deposits of the Sikhote-Alin (Primorye) as promising sources of strategic metals. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 242–246. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-4-242-246

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Введение

Благородные металлы (БМ) издавна определяли металлогенический профиль россыпных месторождений юга Дальнего Востока России [1]. Однако к настоящему времени многие из этих объектов практически полностью исчерпали свой ресурсный потенциал. В создавшихся условиях укрепление сырьевой базы региона связано с комплексными проявлениями экзогенной минерализации. Именно к ним относятся титаноносные россыпи Сихотэ-Алинского орогенного пояса, в которых минералы БМ являются попутными компонентами. Большинство из них пространственно и генетически связано с синорогенными интрузиями базит-ультрабазитов. Основными направлениями их промышленного освоения являются детальная минералогическая оценка и глубокая переработка сырья на основе принципов рационального природопользования и экологической безопасности. Примером такого подхода могут послужить ильменитовые россыпи, связанные с Ариадненским массивом ультрабазитов, в которых авторами впервые обнаружены самородные золота и платина [2]. Главный промышленный минерал этих россыпей ильменит – твердый раствор метатитаната железа (II) и оксида железа (III) бертоллидного типа. Химический состав ильменита может быть представлен формулой  $n\text{FeTiO}_3 \times m\text{Fe}_2\text{O}_3$ , где  $n$  и  $m$  – переменные величины. Ильменит часто содержит примеси Mg, Mn, Nb, V, Cr и др., при этом  $\text{Fe}^{2+}$  изоморфно замещается  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$  [3]. Содержание титана в ильмените может колебаться в зависимости от происхождения от 25 до 35%. Ильменит является источником получения губчатого титана и пигментного диоксида титана, который является самым востребованным титансодержащим продуктом на мировом рынке. Основные сферы его потребления связаны с использованием его пигментных свойств, в частности при производстве лакокрасочной продукции, бумаги, пластмасс, катализаторов и т. д. [4]. Основной целью наших исследований является создание на основе надежной минералогическо-геохимической информации основ малоотходной технологии максимально полного извлечения полезных компонентов (титана и золота) из ильменитовых россыпей с использованием методов пиро-гидрометаллургии. Разработанные технические решения создадут предпосылки к промышленному освоению этих объектов без нанесения серьезного ущерба окружающей среде.

## Объект и методы

Ариадненский массив базит-ультрабазитов, расположенный в центральной части Приморья (площадь водосбора р. Уссури, притока р. Амур),

относится к группе дифференцированных интрузий Сихотэ-Алинского орогенного пояса. Его южная часть сложена перидотитами и пироксенитами, к северу преобладают ильменитовые габбро, переходящие в диориты, монцодиориты и сиениты. Характерными чертами этих пород являются повышенные кларки золота и металлов платиновой группы [5, 6].

Ильменитовые габбро продуцируют ряд крупных титаноносных россыпей. Так, протяженность россыпей р. Тодохова и ее правого ручья р. Потапова составляет соответственно 4,8 и 1,2 км при ширине до 520 и 280 м, средней мощности продуктивного пласта 7,4 м и содержанием ильменита до 375,5 кг/м<sup>3</sup>. Разведанные запасы  $\text{TiO}_2$  по состоянию на 01.01.2020 г. превышают один миллион тонн.

Для решения поставленных задач потребовалось выполнить комплекс минералогических и технологических исследований. В пределах изученных россыпей было отобрано пять крупнообъемных проб (река Падь Тодохова – 3, ключ Потапова – 2) весом до 500 кг каждая, которые и послужили предметами исследований. 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.

Анализ микроэлементного состава проб был выполнен на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) Agilent 7500 (Agilent Technologies, Япония), оборудованном распылителем Бабингтона, охлаждаемой распылительной камерой Скотта и заземленной горелкой Фассела. Использовались никелевые конусы сэмплера и скиммера. Определение петрогенных элементов проводилось на атомно-эмиссионном с индуктивно связанной плазмой спектрометре iCAP 6500 Duo (ИСП-АЭС) (Thermo Scientific, США).

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

Для изучения возможности взаимодействия ильменитового концентрата с сульфатом аммония исследуемый концентрат и  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  смешивали из расчета образования сульфатов основных компонентов концентрата и затем двойных сульфатов компонентов концентрата и аммония. Полученную смесь в стеклоглеродных тиглях с крышкой помещали в муфельную печь-контроллер фирмы Nabertherm GmbH (Германия), нагревали со скоростью 2,5 град/мин до заданной температуры и выдерживали при этой температуре в течение 4–6 ч. Навески составляли 10–40 г.

Изменения, происходящие с веществом при нагревании, контролировали по убыли массы исходной смеси, а также с использованием рентгенофазового метода анализа.

Рентгенограммы образцов снимали на автоматическом дифрактометре D-8 ADVANCE с вращением образца в  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении. Рентгенофазовый анализ проводили с использованием программы поиска EVA с банком порошковых данных PDF-2.

Процесс выщелачивания обработанного сульфатом аммония ильменитового концентрата проводили при комнатной температуре путем растворения полученного продукта в воде в течение 15–30 минут и последующего фильтрования через фильтр «синяя лента». В полученных фильтратах определяли содержание элементов методом атомно-абсорбционного анализа на спектрометре Solaar 6 M по аналитическим линиям элементов-компонентов концентрата.

Термогравиметрические исследования выполнены на дериватографе Q-1500 в открытом платиновом тигле на воздухе при скорости нагревания 5 град/мин и навесках 100–200 мг.

### Результаты

Предварительные минералогические исследования исходных песков показали, что титан в россыпях представлен исключительно ильменитом, который является главным минералом для промышленного извлечения. Среди постоянных примесей фиксируется довольно широкий круг высокотехнологичных металлов. Прежде всего необходимо обратить внимание на высокий уровень концентрации следующих элементов (г/т): V – 730, Co – 340, Zn – 230, Ta – 100 и Nb – 11. Содержания Au, Pt и Pd в отдельных блоках россыпей достигают 1,1 г/т.

Шлиховые пробы прошли стадию предварительного концентрационного обогащения с последующей электромагнитной сепарацией. Полученный гравитационный концентрат характеризуется высоким выходом магнитной фракции (93–95% общей массы) и низким – немагнитной (5–7%). Основу первой из них составляет ильменит, в небольших количествах фиксируется титаномагнетит. Отличительными чертами материала фракции (ильменитового концентрата) являются высокие содержания (мас. %)  $\text{TiO}_2$  (49,5), а также незначительные примеси  $\text{SiO}_2$  (1,02) и Cr (0,2), что вполне отвечает требованиям промышленного производства титана. Нельзя не отметить высокий уровень присутствия в концентрате массовой доли (до 300 г/т) таких высокотехнологичных металлов, как Ta, Nb, Nd, Co, Cu.

Немагнитная фракция в сущности представляет собой смесь анортита, кварца, роговой обманки, сфена и циркона. Кроме того, в незначительных количествах присутствуют монацит, рутил и апатит. Из рудных минералов преобладают сульфиды (единичные зерна пирита, арсенипирита, антимонита и галенита) и самородные металлы (золото, платина, цинк и никель). 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 и Pt, концентрации которых достигают промышленных масштабов (0,5–3,0 г/т). Самородное золото характеризуется высокими значениями пробы (до 970–999‰). В отдельных зернах отмечено присутствие Cu (0,1–3,2 ат. %) и Hg (3,5–4,3 мас. %). Платина представлена твердыми растворами Fe-Pt, где ведущим минералообразующим элементом является Pt (87,1–90,8 мас. %).

Ильменит сравнительно легко разлагается кислотами. Для его вскрытия широко используется серноокислотный способ. Это старейший промышленный способ извлечения  $\text{TiO}_2$  из ильменита, который заключается в переводе ильменита в растворимые сульфаты. Процесс состоит из трех стадий и большого числа операций (сушки концентрата до влажности 0,5%, сульфатизации олеумом при 80–210°C при бурном выделении газов и разбрызгивании реакционной смеси, операции вызревания пористого продукта, стадии выщелачивания и восстановления железа в растворах чугушной стружкой и многие другие). Получаемый от кислотной обработки раствор очищают от железа методом кристаллизации закисного железа при охлаждении и затем направляют на гидролиз. При прокатке гидролизного осадка получают  $\text{TiO}_2$ .

Использование серноокислотной технологии связано с большим расходом концентрированной серной кислоты и, кроме того, приводит к существенному загрязнению окружающей среды, поскольку ежегодно сбрасываются сотни тысяч тонн сульфатсодержащих отходов в виде  $\text{CaSO}_4$  и кислых промывных вод. Для замены жидкого сульфатирующего реагента часто применяют сульфат аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  [7–10]. В случае с ариадненскими ильменитовым концентратом избран наиболее экологически безопасный, но при этом достаточно простой и эффективный способ переработки [11–13]. При этом вскрытие должно проводиться в твердой фазе путем обжига концентрата с избытком сульфата аммония в качестве сульфатирующего реагента при температуре 360–400 °C в течение 4,0–4,5 часов. Образовавшийся продукт выщелачивают водой при соотношении Т:Ж=1:5,0–5,5 с получением раствора, содержащего сульфаты железа и титана. Не растворившийся остаток отделяют, после чего из полученного раствора путем термического гидролиза при температуре 80–90 °C в течение 1,5–2,0 часов получают диоксид титана анатазной модификации в виде осадка, который удаляют. Термический гидролиз проводят в присутствии восстановителя, обеспечивающего переход трехвалентного железа в двухвалентное.

Из раствора, оставшегося после отделения диоксида титана, получают железный купорос. Выделяющийся в газовую фазу аммиак улавливают и в виде сульфата аммония возвращают в оборот.

В процессе проведения эксперимента по извлечению полезных компонентов из магнитного концентрата установлено, что взаимодействие ильменита с сульфатом аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  начинается при достижении температуры термического разложения  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  ( $300^\circ\text{C}$ ) и протекает в температурном интервале  $300\text{--}400^\circ\text{C}$  с образованием смеси двойных солей – сульфата аммония и железа составов  $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  и  $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$  и сульфата аммония и титанила состава  $(\text{NH}_4)_2\text{TiO}(\text{SO}_4)_2$ . Водное выщелачивание продукта взаимодействия ильменитового концентрата с  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  позволяет перевести в раствор практически весь титан и основную массу железа и попутных полезных компонентов в форме хорошо растворимых в воде двойных солей.

Немагнитный гравитационный концентрат, включающий основную массу БМ, послужил исходным сырьем для пиро-гидрометаллургических исследований. Обычно при обогащении применяют цианидную технологию, представляющую значительную угрозу окружающей среде [14]. Ранее установлено [15], что золото из указанного вида сырья эффективно извлекается при выщелачивании тиоцианатными растворами. Извлечение золота осуществляется экстракцией тиоцианатных комплексов раствором трибутилфосфата в керосине при концентрации тиоцианат-ионов  $0,8\text{--}1,2$  моль/л. При этом тиоцианатные комплексы золота переводятся в органическую фазу. Затем тиоцианатный раствор разбавляют водой и проводят извлечение серебра при концентрации тиоцианат-ионов  $0,4\text{--}0,6$  моль/л экстракцией смесью трибутилфосфат-дифенилтиокарбамид в керосине. При этом тиоцианатные

комплексы серебра переводятся в органическую фазу. Необходимо отметить, что при наличии в растворах выщелачивания попутных компонентов, последние почти полностью переходят в органическую фазу. Далее осуществляют реэкстракцию металлов из органических фаз. Сквозное извлечение золота из сырья по указанной схеме достигало  $89\text{--}90\%$ .

### Заключение

В результате проведенных работ разработаны основы оригинальной ресурсосберегающей технологии комплексной переработки шлихового материала ариадненских россыпей с использованием методов гравитации, электромагнитной сепарации и пиро – гидрометаллургии. Основу исходных шлихов составляет ильменитовый концентрат, отвечающий регламенту технологических схем промышленного производства. Отличительной чертой этого шлихового материала являются повышенные концентрации золота. Предлагаемые технические решения по извлечению полезных компонентов с соблюдением принципов рационального природопользования и экологической безопасности являются лишь первым шагом в освоении ильменитовых россыпей юга Дальнего Востока России. Очевидно, что дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении увеличения степени глубокой переработки золото-ильменитовых песков с целью извлечения дополнительных количеств стратегических металлов, что позволит снизить затраты на получение отдельных видов минеральных продуктов и обеспечить более высокую эффективность производства.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00525.

### Литература

- 1 Леликов Е.П. Остров Аскольд: геологическое строение и золотоносность // Вестник ДВО РАН. 2013. № 6. С. 198–204. URL: <http://vestnikdvo.ru>
- 2 Молчанов В.П., Андросов Д.В. Минералы благородных металлов Ариадненского массива гипербазитов (Приморье) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. 2017. С. 142–146. URL: <http://geo.ysn.ru>
- 3 Donohue P.H., Simonetti A., Neal C.R. Chemical Characterisation of Natural Ilmenite: A Possible New Reference Material // Geostandards and Geoanalytical Research. V. 36. № 1. P. 61–73. doi:10.1111/j.1751-908X.2011.00124.x
- 4 U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2018. 200 p. doi:10.3133/70194932
- 5 Kemkin I.V., Khanchuk A.I., Kemkina R.A. Accretionary prisms of the Sikhote-Alin Orogenic Belt: Composition, structure and significance for reconstruction of the geodynamic evolution of the eastern Asian margin // Journal of Geodynamics. 2016. V.102. P. 202–230. doi: 10.1016/j.jog.2016.10.002
- 6 Ханчук А.И. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2006. 572 с. URL: <http://dalnauka.ru>
- 7 Пат. № 2571904, RU, C01G 23/053, C22B 3/08, 3/26. Способ переработки титансодержащего материала / Герасимова Л.Г., Касиков А.Г., Багрова Е.Г. № 2014145044/05; Заявл. 06.11.2014; Оpubл. 27.12.2015, Бюл. № 36.
- 8 Achimovicova M. et al. Aluminothermic production of titanium alloys (Part 1): synthesis of TiO<sub>2</sub> as input material // Metallurgical and Materials Engineering. 2014. V. 20. № 2. P. 141–154. URL: <http://www.metall-mater-eng.com>
- 9 Щелокова Е.А., Копкова Е.К., Громов П.Б. Получение диоксида титана при сернокислотном разложении механически активированного ильменитового концентрата // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 2–1. С. 203–207. doi: 10.25702/KSC.2307–5252.2018.9.1.203–207
- 10 Zhang W., Zhu Z., Cheng C.Y. A literature review of titanium metallurgical processes // Hydrometallurgy. 2011. V. 108. P. 177–188. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0304386X>

- 11 Zhang Y. Extraction of titanium from titanium-containing blast furnace slag by sulphate melting // Canadian journal of metallurgy and materials science 2014. V. 53. № 4. P. 440–443. doi:10.1179/1879139514Y.0000000136
- 12 Пат. № 2620440, RU, C22B 3/06, 3/44, C01G 23/047, 49/06, C09C 1/24, C01F 17/00. Способ комплексной переработки титаносодержащего минерального сырья / Пашнина Е.В., Гордиенко П.С. № 2016124091; Заявл. 16.06.2016; Оpubл. 25.05.2017, Бюл. № 15.
- 13 Пат. № 2715193, RU, C01G 23/053, C22B 34/12, 1/06, 3/04, C01G 49/14, C01C 1/242. Способ переработки ильменитового концентрата / Медков М.А., Крысенко Г.Ф., Эпов Д.Г. № 2019104828; Заявл. 20.02.2019; Оpubл. 25.02.2020, Бюл. № 6.
- 14 Лодейшичиков В.В. Возможности и перспективы промышленного использования нецианистых растворителей золота и серебра // Золотодобыча. 2012. № 166. С. 8–13. URL: <https://zolotodb.ru/subscribe>
- 15 Пат. № 2385958, RU, C22B 11/00, 3/26. Способ раздельного извлечения золота и серебра из тиоцианатных растворов / Белобелецкая М.В., Медков М.А., Горячев Н.А., Молчанов В.П., Смольков А.А. № 2008138144/02; Заявл. 24.09.2008; Оpubл. 10.04.2010, Бюл. № 10.

### References

- 1 Lelikov E.P. Askold Island: geological structure and gold content. Vestnik FEB RAS. 2013. no. 6. pp. 198–204. Available at: <http://vestnikdvo.ru> (in Russian).
- 2 Molchanov V.P., Androsov D.V. Minerals of noble metals of the Ariadno massif of hyperbasites (Primorye). Geology and mineral resources of the North-East of Russia. 2017. pp. 142–146. Available at: <http://geo.ysn.ru> (in Russian).
- 3 Donohue P.H., Simonetti A., Neal C.R. Chemical Characterisation of Natural Ilmenite: A Possible New Reference Material. Geostandards and Geoanalytical Research. vol. 36. no. 1. pp. 61–73. doi:10.1111/j. 1751–908X.2011.00124.x
- 4 U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2018. 200 p. doi:10.3133/70194932
- 5 Kemkin I.V., Khanchuk A.I., Kemkina R.A. Accretionary prisms of the Sikhote-Alin Orogenic Belt: Composition, structure and significance for reconstruction of the geodynamic evolution of the eastern Asian margin. Journal of Geodynamics. 2016. vol.102. pp. 202–230. doi: 10.1016/j.jog.2016.10.002
- 6 Khanchuk A.I. Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia. Vladivostok, Dalnauka, 2006. 572 p. Available at: <http://dalnauka.ru> (in Russian).
- 7 Gerasimova L.G., Kasikov A.G., Bagrova E.G. Method for processing titanium-containing material. Patent RF, no. 2571904, 2015.
- 8 Achimovicova M. et al. Aluminothermic production of titanium alloys (Part 1): synthesis of TiO<sub>2</sub> as input material. Metallurgical and Materials Engineering. 2014. vol. 20. no. 2. pp. 141–154. Available at: <http://www.metall-mater-eng.com>
- 9 Shchelokova E.A., Koptova E.K., Gromov P.B. Obtaining titanium dioxide by sulfuric acid decomposition of mechanically activated ilmenite concentrate. Transactions of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018. vol. 9. no. 2–1. pp. 203–207. doi: 10.25702/KSC.2307–5252.2018.9.1.203–207 (in Russian).
- 10 Zhang W., Zhu Z., Cheng C.Y. A literature review of titanium metallurgical processes. Hydrometallurgy. 2011. vol. 108. pp. 177–188. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0304386X>
- 11 Zhang Y. Extraction of titanium from titanium-containing blast furnace slag by sulphate melting. Canadian journal of metallurgy and materials science 2014. vol. 53. no. 4. pp. 440–443. doi:10.1179/1879139514Y.0000000136
- 12 Pashnina E.V., Gordienko P.S. Method of complex processing of titanium-containing mineral raw materials. Patent RF, no. 2620440, 2017.
- 13 Medkov M.A., Krysenko G.F., Epov D.G. Method of processing of ilmenite concentrate. Patent RF, no. 2715193, 2020.
- 14 Lodeyshchikov V.V. Opportunities and prospects for industrial use of non-cyanide solvents of gold and silver. Zolotodobycha. 2012. no. 166. pp. 8–13. Available at: <https://zolotodb.ru/subscribe> (in Russian).
- 15 Belobeletskaia M.V., Medkov M.A., Goryachev N.A., Molchanov V.P., Smolkov A.A. Method of separate extraction of gold and silver from thiocyanate solutions. Patent RF, no. 2385958, 2010.

### Сведения об авторах

**Владимир П. Молчанов** к.г.-м.н., лаборатория нелинейной металлогении, Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, Проспект 100-летия Владивостоку, 159, г. Владивосток, 690022, Россия, vpmol@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7206-356X>

**Михаил А. Медков** д.х.н., профессор, заведующий лабораторией переработки минерального сырья, Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Проспект 100-летия Владивостоку, 159, г. Владивосток, 690022, Россия, medkov@ich.dvo.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9417-0312>

### Вклад авторов

**Владимир П. Молчанов** написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

**Михаил А. Медков** обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент, выполнил расчёты

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Information about authors

**Vladimir P. Molchanov** Cand. Sci. (Geol.-Min.), laboratory of non-linear metallogeny, Far East Geological Institute of the far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 159, Prospekt 100- letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia, vpmol@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7206-356X>

**Michael A. Medkov** Dr. Sci. (Chem.), professor, laboratory of mineral processing, Institute of chemistry of the far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 159, Prospekt 100- letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia, medkov@ich.dvo.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9417-0312>

### Contribution

**Vladimir P. Molchanov** wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

**Michael A. Medkov** review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 05/10/2020	После редакции 15/11/2020	Принята в печать 01/12/2020
Received 05/10/2020	Accepted in revised 15/11/2020	Accepted 01/12/2020