

## Золото-ильменитовые россыпи интрузий ультрабазитов Сихотэ-Алиня: минералогия, геохимия и происхождение

Молчанов В.П.<sup>1</sup>, Молчанова Н.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, [vpmol@mail.ru](mailto:vpmol@mail.ru)

<sup>2</sup> ООО «Гидрометаллург», Владивосток, [631135@mail.ru](mailto:631135@mail.ru)

**Аннотация.** Определены основные черты минералогии и геохимии, а также рудный потенциал титаноносных россыпей, пространственно и генетически связанных с Ариадненской интрузией ультрабазитов (Приморье). Изучен состав ильменита, золота и платины, выявлен комплекс попутных стратегических металлов. Полученные данные позволили сделать вывод об участии в россыпеобразовании полигенных и полихронных коренных источников. В качестве поставщика ильменита, платины, медистого и ртутистого золота выступали базит-ультрабазиты. Другим источником питания россыпей, повидимому, послужили кварцево-жильные образования с золото-сурьмянной минерализацией. Углубленные минералого-геохимические исследования ильменитовых россыпей базит-ультрабазитов Сихотэ-Алиня позволяют расширить перспективы сырьевой базы Дальнего Востока.

**Ключевые слова:** ильменит, платина, серебристое, медистое и ртутистое золото, титаносные россыпи, ультрабазиты, Ариадненский массив, Приморье.

## Gold-ilmenite placers of intrusions of ultrabasites of Sikhote-Alin: mineralogy, geochemistry and origin

Molchanov V.P.<sup>1</sup>, Molchanova N.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, [vpmol@mail.ru](mailto:vpmol@mail.ru)

<sup>2</sup> Limited Liability Company «Hydrometallurg», Vladivostok, Russia, [631135@mail.ru](mailto:631135@mail.ru)

**Abstract.** The main features of mineralogy and geochemistry, as well as the ore potential of titanium-bearing placers, spatially and genetically associated with the Ariadne intrusion of ultrabasites (Primorye), are determined. The composition of ilmenite, gold and platinum was studied, a complex of associated strategic metals was revealed. The data obtained allowed us to make a conclusion about the participation of polygenic and polychronous indigenous sources in placer formation. The mafic ultramafites were a supplier of ilmenite, platinum, copper and mercury gold. Another power source of the placers, apparently, was the quartz-vein formation with gold mineralization surmandal. The experience of extracting strategic mineral raw materials from a variety of minerals requires careful study in relation to the conditions of the Far Eastern region.

**Key words:** ilmenite, platinum, copper gold, mercury gold, titanium-bearing placer, ultrabasites, Ariadnensky massif, Primorsky Region.

### Введение

Приморье относится к числу наиболее старых районов золотодобычи России (Анерт, 1928). благородные металлы здесь добывали задолго до прихода первых русских поселенцев. Интенсивная эксплуатация россыпных месторождений золота на протяжении многих лет привела к истощению их геологических запасов, что не могло не отразиться на резком снижении объемов добычи благородных металлов (БМ). Вместе с тем, есть весомые основания полагать, что минерально-сырьевой потенциал региона далеко не исчерпан. Нужны новые подходы к прогнозу, поискам и освоению источников стратегических минеральных ресурсов. Одними из таких альтернативных источников являются комплексные проявления экзогенной минерализации, в которых стратегические металлы являются попутными компонентами. 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: редко-

земельные элементы для производства мобильных телефонов, компьютеров, а титан – для применения в медицине и авиастроении и т.д. В конце прошлого века в рубежной литературе появились понятия «критические металлы» и «критическое минеральное сырье», прочно утвердившееся 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, металлы платиновой группы, редкоземельные элементы, ниобий, тантал, гафний, ванадий, кобальт, сурьма) присутствуют в рудах и россыпях базитов и гипербазитов Приморья, указывая на необходимость проведения геолого-разведочных работ. Примером тому может послужить Ариадненская интрузия ультрабазитов и сопровождающий ее довольно широкий спектр рудо-россыпепроявлений полезных компонентов. Изучение типоморфных свойств основных и попутных россыпепроявляющих минералов, в первую очередь ильменита, самородных золота и платины, позволит не только идентифицировать источники питания россыпей и локализовать участки их максимального распространения, но и оценить возможности извлечения этих полезных компонентов.

### **Методы исследований**

Минералогические исследования осуществлялись с применением электронно-зондового микроанализатора JeolSuperprobe JXA 8100 с системой INCA Energy 350 OxfordInstruments и электронного сканирующего микроскопа EVO-500XVP с системой INCA Energy 350 OxfordInstruments.

Анализ микроэлементного состава проб был выполнен на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) Agilent 7500c (AgilentTechnologies, 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) (ThermoScientific, 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.

### **Объект исследований**

Ариадненский массив базит-ультрабазитов, расположенный в среднем течении р. Малиновка (площадь водосбора р. Уссури, притока р. Амур), относится к группе дифференцированных интрузий Ариадненского металлогенического пояса, приуроченных к Самаркинскому террейну юрской аккреционной призмы. В геологическом строении Ариадненского рудно-россыпного узла, совпадающего с контурами одноименного массива, принимают участие верхнеюрские турбидиты и олистостромы аккреционной призмы с включениями позднепалеозойских и нижнемезозойских океанических кремней, сланцев, известняков и базальтов, которые прорваны Ариадненской интрузией базит-ультрабазитов раннемелового возраста. Ее южная часть сложена перидотитами и оливиновыми пироксенитами, к северу преобладают ильменитовые и роговообманковые габбро, переходящие в диориты, монцодиориты и сиениты. Вышеперечисленные стратифицированные и магматические образования, в свою очередь, прорваны поздними гранитоидами, дайками основного и кислого состава позднемелового возраста (Геодинамика..., 2006).

С габброидами связано Ариадненское проявление ильменитовой минерализации. Рудные тела представляют собой залежи сложной морфологии северо-восточного простирания 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 %. В верховьях р. Падь Тодохова широко развита сеть северо-восточных разрывных нарушений, контролирующая положение кварцевых жил с золото-сурьмяной минерализацией Тодоховского рудопоявления.

ния. Большой частью они приурочены к экзоконтакту ультрабазитов с песчаниками и алевролитами. По простиранию они, по данным В.М. Лосива (1990 г.) прослежены до 4000 м, по падению – до 400 м. Главный рудный минерал – антимонит, реже встречаются арсенопирит, пирит, марказит. Сохранения основных полезных компонентов варьируют в следующих пределах: Sb – 0.18-23.4 мас. %, (среднее – 2.2 мас. %), Ag – 500-1820 г/т; Au – 0.14-0.74 г/т (среднее – 0.3 г/т).

Ариадненские базит-ультрабазиты продуцируют ряд крупных титаноносных россыпей. Так, судя по материалам Андросова Д.В. и Слободян Е.А. (2017 г.), протяженность россыпей р. Тодохова и ее правого притока руч. Потапова россыпей 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/м<sup>3</sup>.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Для решения поставленных задач потребовалось выполнить комплекс минералогических и технологических исследований. В пределах изученных россыпей было отобрано пять крупнообъемных проб (р. Падь Тодохова – 3, кл. Потапова – 2) весом до 500 кг, которые и послужили предметами исследований. В процессе технологических исследований исходные пески 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. Отличительной чертой материала магнитной фракции является высокий уровень присутствия (до 800 г/т) таких высокотехнологичных металлов, как V, Nb, Nd, Co, Cu. Немагнитная фракция, в сущности, представляет собой смесь анортита, кварца, роговой обманки, сфена и циркона. 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). Составные компоненты фракции можно подразделить на две группы. Первая из них включает дефицитные для промышленности металлы Hf, Ce, Y (до 900 г/т). Во вторую входят Au и Pt, концентрации которых варьируют в пределах 0.5-3.0 г/т.

Особый интерес вызывают первые находки самородных платины и золота в россыпях узла. Для платиновых минералов характерно преобладание твердых растворов Fe-Pt, которые можно отнести, используя известную номенклатуру (Nagris, Cabri, 1991) к изоферроплатине. Железистая платина обычно встречается в виде комковатых зерен неправильной или овальной, уплощенной формы, в поперечнике не превышающих 0.1 мм.

Все золотины, выделенные из немагнитной фракции, по особенностям химизма можно разделить на три группы: серебристую, ртутистую и медистую.

*Серебристое золото.* В первую, наиболее распространенную группу (до 70 % всех изученных образцов) входят низко- и высокопробные, в понимании Н.В. Петровской (1973), разновидности золото-серебряных соединений. Макроскопически низкопробные фазы – мелкие (менее 0.1 мм) пластинчатые, иногда комковидные частицы желтого цвета. Поверхность золотинок – мелкоямчатая, окатанность – средняя, иногда хорошая. Они характеризуются сравнительно узким диапазоном колебаний пробы от 670 до 740 ‰. На периферии зерен довольно часто наблюдаются гипергенные высокопробные оболочки толщиной 30-50 мкм, где концентрации Ag (1.6-1.8 мас. %) значительно понижены по сравнению с центральной частью. Переход от матрицы к кайме резкий и хорошо прослеживается. Появление этих оболочек, по-видимому, связано с выносом примесей из золота в зоне гипергенеза. В отдельных зернах металла наблюдаются мелкие вросстки арсенопирита. Химический состав этого минерала (Fe – 32.3, As – 42.6, S – 19.6 мас. %) отличается избытком серы и дефицитом мышьяка по отношению к стехиометрии.

Другая разновидность золото-серебряных соединений характеризуется высокими значениями пробы (до 970-999 ‰). Спорадически в этих золотинок обнаруживается дискретные микроскопические обособления самородного серебра. Их появление, скорее всего, связано с гипергенными пре-

образованиями низкопробного золота. Высвободившееся при этом серебро отлагалось в виде самостоятельной минеральной фазы.

Широкое развитие в рыхлых отложениях Ариадненского массива золото-серебряных фаз, возможно, является подтверждением участия в россыпеобразовании кварцево-жильных образований Тодоховского проявления золото-сурьмяной минерализации, генетически связанного с поздним гранитоидным магматизмом. Самородное золото подобных образований, по данным Э.М. Спиридонова и П.А. Плетнева (2002), наиболее серебристое в ряду плутоногенных гидротермальных месторождений.

*Ртутистое золото.* Представлено низкопробными ртутьсодержащими фазами (Au от 53.72 до 55.37 мас. %, Ag от 39.1 до 41.45 мас. %, Hg от 3.47 до 4.31 мас. %). Они характеризуются невысокой гипергенной устойчивостью. Своеобразие вторичных преобразований выразилось в образовании высокопробной пористой диффузионной зоны шириной до 100 мкм, в которой практически полностью отсутствует Hg. Схожие изменения претерпевало гипогенное ртутистое золото в процессе формирования многих россыпей Урала (Мурзин и др., 1987). Отличительными чертами такого золота являются пониженные значения пробы, монокристаллическое (плотное) внутреннее строение, прямая корреляция концентраций Ag и Hg. Подобными характеристиками обладают изученные ртутистые фазы. Это позволяет сделать вывод о синхронной кристаллизации ртути и золота, а не о техногенном «заражении» шлихового золота в процессе эксплуатации россыпей. Таким образом, изложенные данные позволяют уверенно относить изученное ртутистое золото к природным твердым растворам системы Au-Ag-Hg.

*Медистое золото.* Эта группа состоит из тонких (менее 0.1 мм), относительно изометричных выделений золота ярко-желтого цвета с красноватым оттенком. Типоморфной примесью этих золотин средней пробы (850-900‰) можно считать Cu (0.1-3.2 ат. %). В процессе микрондовых исследований установлен неравномерный характер распределения этого элемента. Размер гомогенных участков редко превышает первые десятки микронов.

Ртутистый и медистый состав самородного золота россыпей, указывает на «ультрабазитовый» тип коренного источника. Так, находки самородного золота с высокими концентрациями Cu и Hg неоднократно отмечались в рудо-россыпепроявлениях, тяготеющих к базит-гипербазитам Урала (Сазонов и др., 2002), Приамурья (Молчанов и др., 2001). В пользу этой точки зрения, в нашем случае, свидетельствует близость макросоставов шлихового золота «ультрамафитового» профиля и его аналогов из ультраосновных пород. Факт сохранения геохимических характеристик россыпных золотин первично-магматического генезиса имеет принципиальное значение, поскольку может использоваться при металлогенических построениях, а также оценке перспектив ресурсного потенциала территорий не только юга Дальнего Востока но и других регионов.

В то же время, нельзя до конца исключать гипотетической возможности обогащения самородного золота за счет мафит-ультрамафитов, послужившими боковыми породами для флюидов, формировавших золото-сурьмяную минерализацию. Это взаимодействие могло сопровождаться выносом Au, Cu, Hg из ультраосновных пород, отличавшихся их повышенной концентрацией по сравнению с эдуктом, и с последующим поступлением этих элементов в гидротермальную систему.

Интерпретация полученных материалов приводит к выводу о том, что процесс формирования коренных источников россыпей Ариадненского узла охватывает длительный период времени. Его можно разделить на два этапа. На первом этапе, предположительно ( $J_2$  - $K_1$ ), формировались собственно магматогенные ильменитовая и благороднометалльная минерализации, связанные со становлением дифференцированного массива гипербазитов. Последующая магматическая активизация на втором этапе ( $K_2$ ) привела к появлению золото-сурьмяных руд, ассоциирующих с поздними гранитоидными интрузиями. Разрушение вышеупомянутых магматических и рудных образований привело к поступлению в россыпи ильменита и минералов благородных металлов.

### **Заключение**

Результаты проведенных исследований дают основания полагать, что ариадненские базит-ультрабазиты активно участвовали в формировании россыпей, поставляя в них ильменит, медистое и ртутистое золото, минералы металлов платиновой группы. Находки золотин с включениями арсенипирита отражают факт участия в россыпеобразовании других коренных источников. Выявленные индикаторные свойства шлихового золота позволяют не только уточнить особенности его генезиса, но и идентифицировать источники питания россыпей и локализовать участки их максимального распространения.

Применение современных технологий обогащения россыпей (Молчанов, 2008) позволит извлекать из них не только титан, золото, платину, но и весь спектр сопутствующих высокотехнологичных металлов (гафний, ниобий, иттрий, тантал, ванадий, неодим, кобальт и т.д.), с соблюдением ресурсосберегающих принципов и без нанесения существенного урона экологической обстановке. Представляется, что комплексное использование титаноносных руд и россыпей, связанных с базит-ультрабазитами, в значительной мере поможет удовлетворить потребности страны по целому ряду стратегических видов минерального сырья.

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

### **Литература**

1. Анерт Э.Э. Богатство недр Дальнего Востока. Хабаровск. Изд-во: Книжное дело. 1928. 923 с.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России (под ред. А.И. Ханчука). Кн. 1. Владивосток. Изд-во: Дальнаука. 2006. 572 с.
3. Молчанов В.П. Возможности ресурсосберегающей технологии извлечения полезных компонентов из техногенных и прибрежно-морских россыпей юга Дальнего Востока России // Экология и промышленность России. 2008. № 5. С. 41–45.
4. Молчанов В.П., Зимин С.С., Гвоздев В.И. Роль апогипербазитов в формировании платиноидно-золотых россыпей Гарьского узла (Среднее Приамурье) // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток. Изд-во: Дальнаука. 2001. Вып. 2. Т. 2. С. 219–232.
5. Мурзин В.В., Малюгин А.А. Типоморфизм золота зоны гипергенеза (на примере Урала). Свердловск. Изд-во: УНЦ. 1987. 96 с.
6. Петровская Н.В. Самородное золото. М. Изд-во: Наука. 1973. 345 с.
7. Сазонов В.Н., Мурзин В.В., Огородников В.Н. Золотое оруденение, сопряженное с альпинотипными ультрабазитами (на примере Урала) // Литосфера. 2002. № 4. С. 63–77.
8. Спиридонов Э.М., Плетнев П.А. Месторождение медистого золота Золотая гора (о «золотородингитовой» формации). М. Изд-во: Научный мир. 2002. 220 с.
9. Harris D.C., Cabri L.J. Nomenclature of platinum-group-elements allous. Review and revision // Can. Miner. 1991. V. 29. P. 231–237.