

Владимирцева О.В.¹, Набелкин О.А.², Субботин Н.А.³
(1 — МГРИ-РГГРУ, 2 — ФГБУ «ИМГРЭ», 3 — Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

ВЕЩЕСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИПОГЕННЫХ И ГИПЕРГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ЗОЛОТА ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РУЧЬЯ СНЕЖНЫЙ (ВЕРХОЯНСКИЙ РАЙОН, ЯКУТИЯ)

*В статье приведены результаты исследования химического состава остаточного гипогенного золота россыпи руч. Снежный и гипергенных образований на нем. Исследование вещественного состава и строения остаточного гипогенного россыпного золота позволяет выявить особенности рудного источника. Характеристики гипергенных образований на золотилах отражают условия переноса золота и формирование россыпи, что позволяет судить об удаленности и типе источника металла. **Ключевые слова:** Адыча-Тарынская зона, Верхоянский район, золото, россыпи, гипергенные высокопробные каймы.*

Vladimirtseva O.V.¹, Nabelkin O.A.², Subbotin N.A.³
(1 — MGRI-RGGRU, 2 — IMGRE, 3 — Moscow branch VSEGEI)

PHYSICAL FEATURES OF HYPOGENIC AND HYPERGENIC GOLD FORMATIONS OF MAN-MADE DEPOSITS OF SNOW STREAM (VERKHOYAN DISTRICT, YAKUTIA)

*This article presents the results of a study of the chemical composition of the residual hypogenic gold placer stream Snezhnyy and hypergenic formations on it. The study of the material composition and structure of the residual hypogenic alluvial gold reveals the features of the ore source. Characteristics of supergene assemblages of the gold particles reflect the conditions of transfer of gold and the formation of placers that allows to judge about the remoteness and the type of power metal. **Keywords:** Adycha-Turinskaya area, Verkhoyanskiy district, gold deposits, hypergenic gold-rich rims.*

Ручей Снежный располагается в среднем течении р. Адыча (Верхоянский район, Якутия), относящейся к Адыча-Тарынской сурьмяно-золоторудной минералогической зоне. Является водотоком I порядка, берущим свое начало с поверхности террасы II эрозионного уровня р. Адыча, впадает в руч. Куранах. Ручей Снежный отрабатывался несколько раз на протяжении более 15 лет (с 1990-х годов до 2007 г.). Доминирующий класс крупности золотин составляет $-5+2,5$ мм (51 %), золото высокой-средней степени окатанности. Тяжелая фракция пред-

ставлена исключительно золотом. По результатам морфологического и гранулометрического анализа золотин техногенных образований руч. Снежный [1] установлено, что источник первоначальной россыпи — промежуточный коллектор, которым, скорее всего, являлись отложения террасы II эрозионного уровня р. Адыча. Для установления химического состава золотин, определения особенностей их строения, распределения пробности был проведен микрозондовый анализ.

Методика проведенных исследований

Для исследования золота было выбрано 11 золотин (рис. 1), отобранных из техногенных образований руч. Снежный. Золотины относятся к классу крупности $-5+2,5$ мм. Цвет золота — ярко-желтый; золотины 5 и 8 более тусклые. Большинство золотин можно охарактеризовать как комковидные уплощенные. Выделяются следующие разновидности золота по форме: золото хорошо окатанное изометричное (золотины 4, 10), золотины средней степени окатанности с простыми краями (золотины 5, 7, 8, 9, 11), золотины средней степени окатанности со сложными краями (1, 2, 3, 6).

Золотины были отполированы параллельно поверхности уплощения. Полировка проходила на войлочном диске. При исследовании золота под оптическим микроскопом установлено, что золотины различаются по цвету: золотины 2, 3, 4, 7, 10, 11 имеют ярко желтый цвет; 1, 5, 6, 9 — серебристо-желтый, а золотина 8 — серебристый цвет (рис. 2).

Определение химического состава золотин проводилось в лабораториях микрозондового анализа на микроанализаторе JXA-8200 фирмы JEOL в ЦКП «ИГЕМ-аналитика (ИГЕМ РАН, аналитик Е.В. Ковальчук) и на модернизированном микроанализаторе Camebax-microbeam с волновой дисперсией (ФГБУ «ИМГРЭ», аналитик О.А. Набелкин). Для исследования особенностей химического состава золота золотины анализировались на следующие элементы: Au, Ag, Cu, Pb, Sb, Hg, Bi, Fe, S, As. При проведении анализа на микрозондовом анализаторе с волновой дисперсией в качестве эталонных образцов для анализируемых элементов, кроме Pb, Sb, S и Hg, использовались соответствующие металлы с чистотой не менее 99,5 %. Для последних элементов в качестве эталонов применялись синтетические образцы PbTe, GaSb и чистые

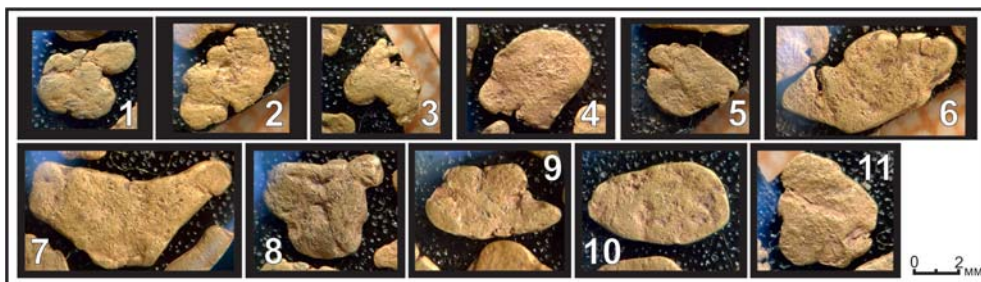


Рис. 1. Золотины техногенных отложений руч. Снежный, класс крупности $-5+2,5$ мм: 4, 10 — золото хорошо окатанное изометричное; 5, 7, 8, 9, 11 — золотины средней степени окатанности с простыми краями; 1, 2, 3, 6 — золотины средней степени окатанности со сложными краями

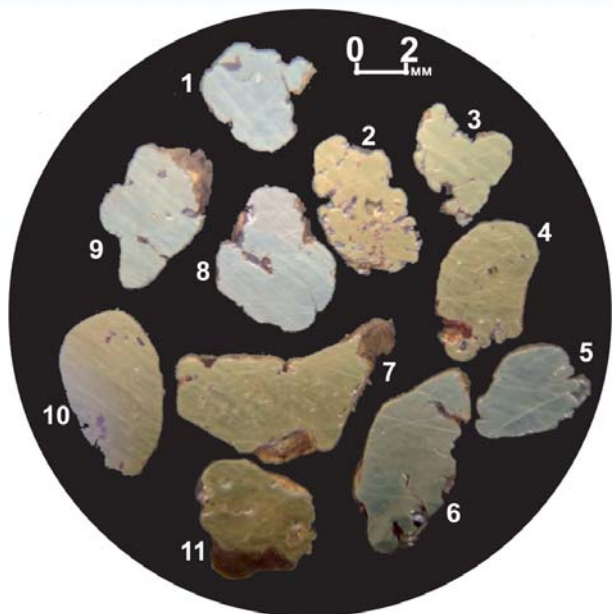


Рис. 2. Шашка с золотиными техногенных отложений руч. Снежный

природные минералы FeS_2 и HgS соответственно. Экспериментальные условия: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка электронов 40 нА. Анализ каждой золотины по основной матрице проводился в трех точках; при наличии включений зерен минералов, высокопробных кайм и прочих образований проводились дополнительные измерения. Всего было проведено 75 измерений.

Результаты анализа

Несмотря на широкий спектр анализируемых химических элементов, в составе золота присутствуют только Au и Ag. В зернах включений минералов выявлены Fe, S, Ti, Bi. Установлены следующие особенности золотин: зерна с каймами повышенной пробности относительно преобладающей массы золотины (1, 3, 5, 6, 8, 9, 10), зерна с участками с повышенным содержанием серебра (2, 4, 7, 10, 11). Также выявлены минералы в сростании с золотом: кварц (на всех зернах), галенит (2, 4, 7, 10, 11), пирит (4), рутил (8). За исключением минеральных включений, явно выделяемых по цвету, кайм и участков с повышенным содержанием серебра, окраска всех золотин распределена равномерно, что, вероятно, указывает на однородную пробность золотин.

Выделены следующие разновидности золотин (рис. 3):

- по пробности основной массы золотин: с пробностью от 570,5 до 723‰ в количестве 5 золотин, с содержанием золота от 879 до 949‰ в количестве 6 золотин;

- золотины с высокопробной каймой — 7 зерен;

- золотины с участками с повышенным содержанием серебра, относительно остаточного гипогенного золота — 5 зерен.

Характеристика гипогенного остаточного золота

Остаточное гипогенное золото — часть золотины без следов гипергенных преобразований, унаследовавшая вещественные и структурные особенности от рудного золота.

По особенностям строения остаточное гипогенное золото следует разделить на две группы. В первой пробность распределена равномерно. В эту группу входят все относительно низкопробные золотины (5 шт.) и одна золотины с пробностью 878,9‰. Было проведено 18 определений химического состава золотин (по 3 на каждую). Среднеквадратическое отклонение содержания золота в точке анализа в каждой золотине от среднего по золотине не превышает 0,147, в среднем составляет 0,03, что подтверждает однородность состава матрицы золотин. Во всех этих золотиных встречены зерна кварца. В одной золотине обнаружено зерно рутила (рис. 4). Цвет зерна — темно-коричневый, рельеф нейтральный. Химический состав по результатам микрозондового анализа TiO_2 —97,15 %, FeO — 1,25 %, по границам зерна фрагментарно прослеживается высокопробная гипергенная кайма (пробность каймы — 912‰).

Вторую группу составили золотины с неравномерным распределением пробности. На 5 высокопробных золотиных были установлены участки с повышенным содержанием серебра (2, 4, 7, 10, 11). Эти участки характеризуются положительным рельефом (рис. 5) и отчетливо видны в режиме BSE. Выполнено 10 определений химического состава высокосеребряных участков и 15 определений химического состава матрицы золотин.

При повторной полировке шашки с золотиными (на плексигласном диске) участки с повышенным содержанием серебра нивелировались. При последующей полировке на фетровом диске эти участки проявились вновь, однако их размеры стали меньше. При полировке на войлочном диске участки с повышенным содержанием серебра проявились отчетливо. На основании этого можно предположить, что такие участки распространены в объеме всей золотины, а не только

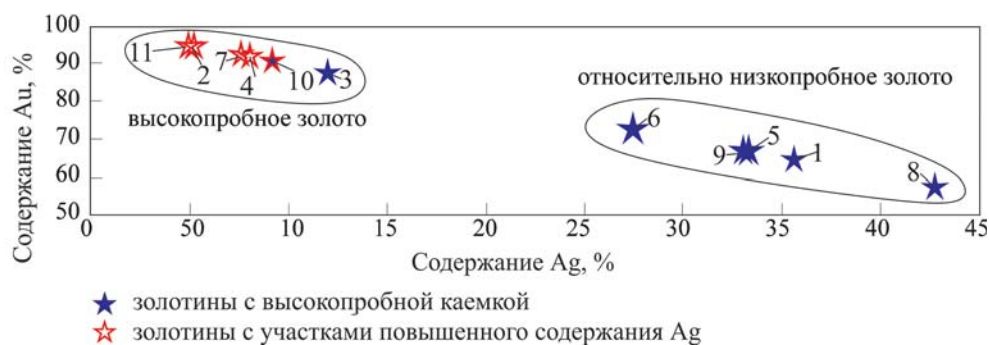


Рис. 3. Распределение золотин по содержанию Au и Ag

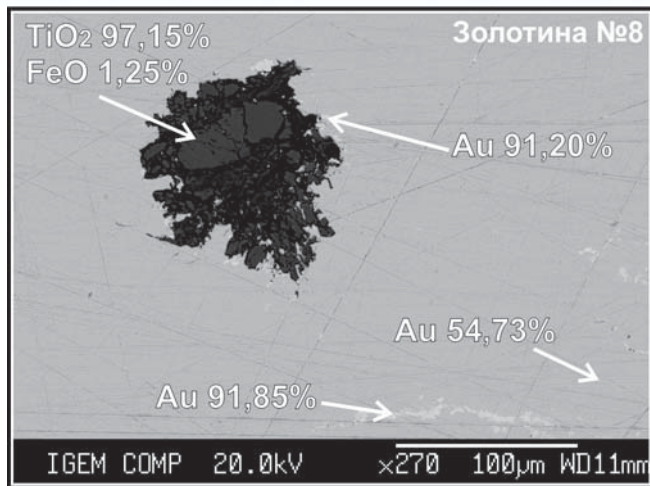


Рис. 4. Зерно рутила в золотине № 8

по ее поверхности. Очевидно, данные участки сформировались вместе с золотиной в коренном источнике и не связаны с процессами гипергенеза. Примечательно, что высокосеребряные участки имеют примерно одинаковую пробность — 103–113‰, что отражает единые условия формирования золота. За исключением высокосеребряных участков основная масса золотин имеет равномерную пробность.

Во всех золотинах на участках с повышенным содержанием серебра обнаружены зерна галенита вытянутой формы (рис. 6 а, в). Размер зерен по длинной оси колеблется от 10 до 250 мкм. Галенит имеет темно-серый цвет, рельеф нейтральный. Всего был определен химический состав 5 зерен. В их составе найдена примесь Bi до 0,5 %. В золо-

тине № 4 встречено зерно пирита (рис. 6 б). Цвет зерна черный, рельеф слабый положительный. Размер зерна 50×40 мкм. Химический состав пирита: Fe — 46 %, S — 53 %.

Таким образом, гипогенное золото явно разделяется на две группы по однородности пробности. Выделенные группы золотин также разделяются по значениям пробности. Примечателен тот факт, что в золотинах с неравномерным распределением пробности (с высокосеребряными участками) присутствуют зерна галенита.

По сложившимся представлениям (Лаврухин и др. 1961 г.) главными полезными ископаемыми в пределах среднего течения р. Адыча является золото, проявления которого относятся к двум разновозрастным рудным формациям: малосульфидной золотокварцевой и антимонит-золотокварцевой.

Рудные образования золота малосульфидной формации представлены среднетемпературными кварцевыми жилами, прожилками и минерализованными зонами дробления, в которых, кроме небольшого количества сульфидов, почти всегда присутствует шеелит. Жильные минералы, кроме кварца, представлены хлоритом, кальцитом и турмалином.

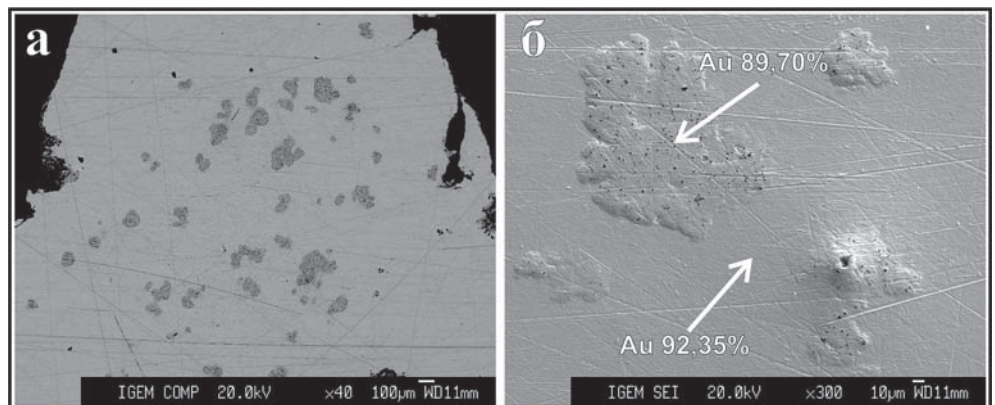


Рис. 5. Участки с повышенным содержанием серебра в золотине № 7: а — увеличение ×40, б — увеличение ×300

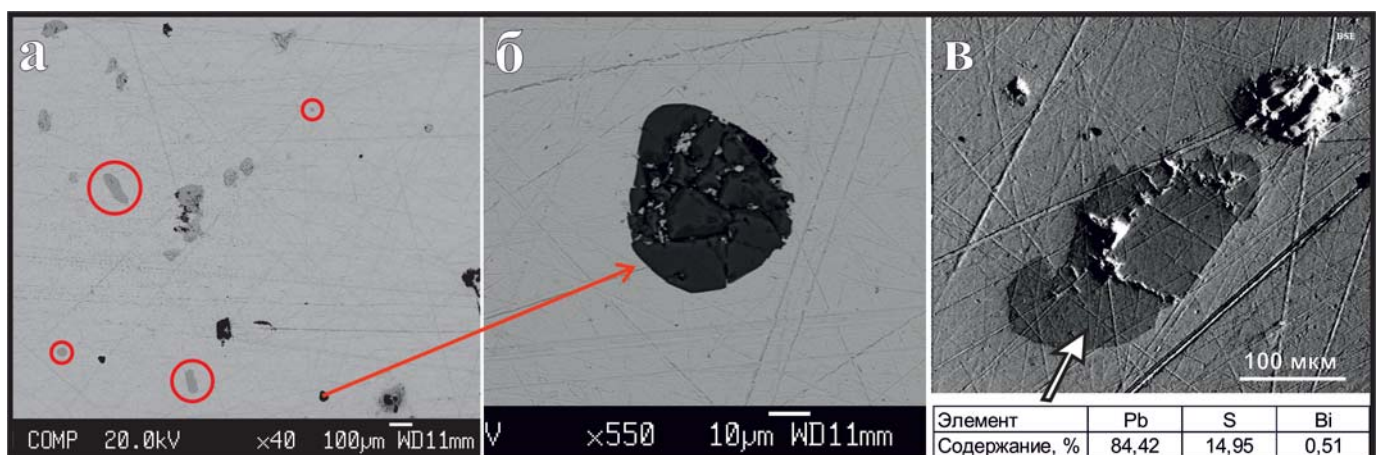


Рис. 6. Зерна минералов в золотине № 4: а — зерна минералов в золотине (красным обведены зерна галенита), увеличение ×40, б — зерно пирита, увеличение ×550, в — зерно галенита в режиме BSE, увеличение ×100

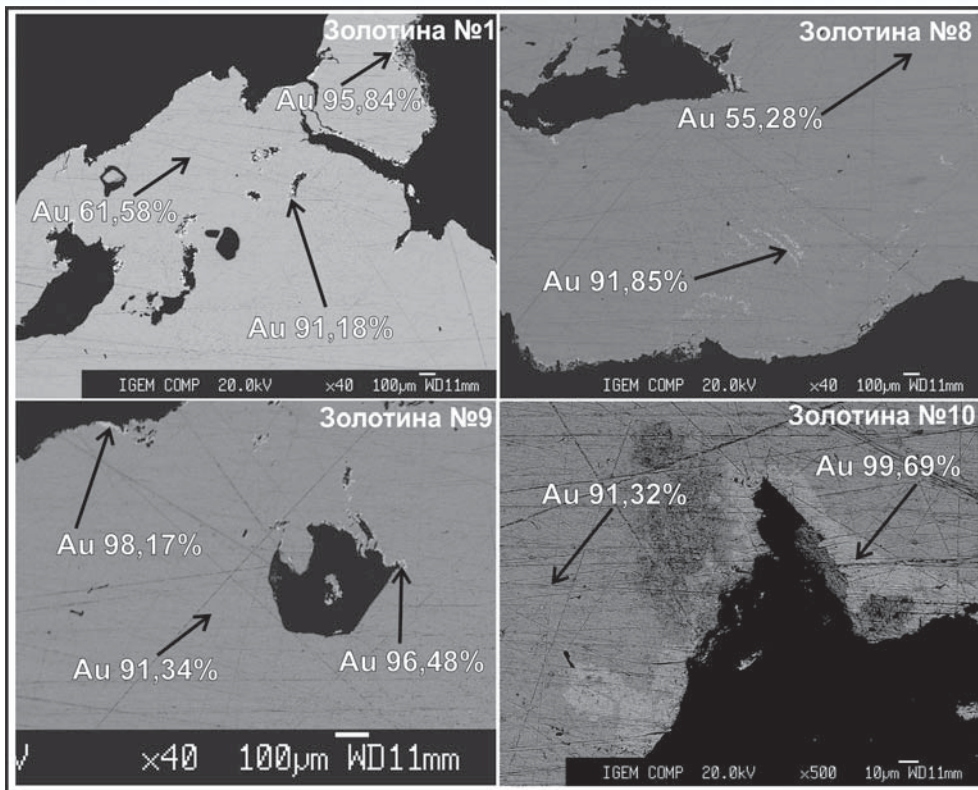


Рис. 7. Высокопробные каймы на золотинах из техногенных отложений руч. Снежный

Среди рудных отмечаются арсенопирит, халькопирит, галенит, шеелит, касситерит, минералы висмута, рутил. Пробность золота невысокая, от 550 до 700‰.

Золотосурьмяные проявления значительно отличаются от золоторудных малосульфидной формации как по количеству сульфидов, так и по минеральному составу; при этом, именно наличие и содержание антимонита является определяющим фактором этого различия. Минеральный состав: жильные — кварц, кальцит, реже — хлорит; рудные — антимонит, арсенопирит, пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, спорадически — шеелит и вольфрамит. Золото средней (800–900) и высокой (более 940) пробности.

Результаты исследования гипогенного золота показывают, что золото россыпи руч. Снежный относится к различным рудным формациям.

Гипергенные образования

Для восстановления истории формирования россыпей и доли участия золота из древних россыпей и кор выветривания в их питании, для суждения о наличии золота на уровне современного эрозионного среза первостепенное значение приобретают такие признаки, как степень вторичных гипергенных преобразований золота и выяснение многократности и последовательности их проявления [2].

Гипергенные образования представлены высокопробными каймами по краям золотин и прожилками внутри них, которые сложены исключительно Au и Ag. Каймы распространены на всех относительно низкопробных золотинах и на двух высокопробных (золотина № 10—918,5‰ и золотина № 3—878,9‰). Высокопробная кайма располагается фрагментарно по краям золотины и по границам включений зерен минералов внутри нее. Границы между высокопробной каймой и остаточным золотом отчетливые и дендровидные. Пробность каймы по краям золотины не изменяется, однако отличается от пробности каймы внутри золотины вокруг гнезд минералов (рис. 7), где она значительно ниже.

Толщина кайм на золотинах колеблется от первых микрон до 50 мкм. Для сравнения толщины гипергенных кайм внутри золотин были выбраны краевые участки золотин. Наблюдается прямая зависимость между пробностью золотины и шириной каймы.

Гипергенные каймы сложены высокопробным золотом (пробность от 940,8 до 993,4‰). Коэффициент корреляции между пробностью остаточного гипогенного золота и гипергенной каймы составляет 0,82, что свидетельствует о присутствии положительной связи между этими показателями (рис. 9).

Если рассмотреть зависимость пробности остаточного гипергенного золота от процента увеличения пробности каймы, выяснится, что степень изменения пробности золота на каймах имеет обратно про-

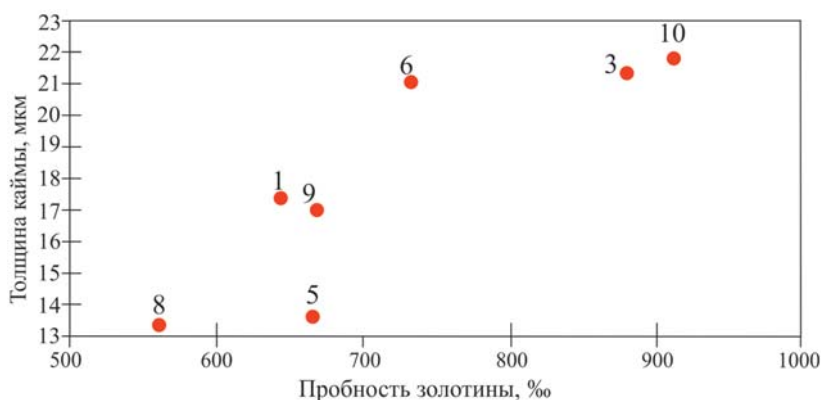


Рис. 8. Зависимость толщины гипергенной каймы на краевых частях золотины от пробности остаточного гипогенного золота

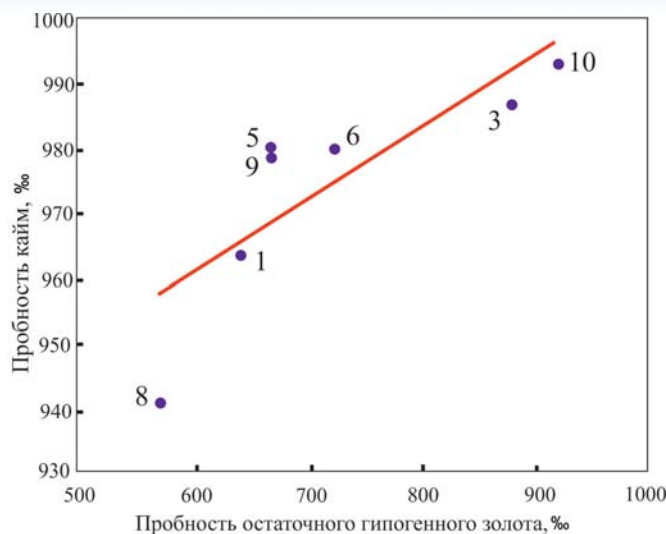


Рис. 9. Зависимость пробности остаточного гипогенного золота от пробности кайм

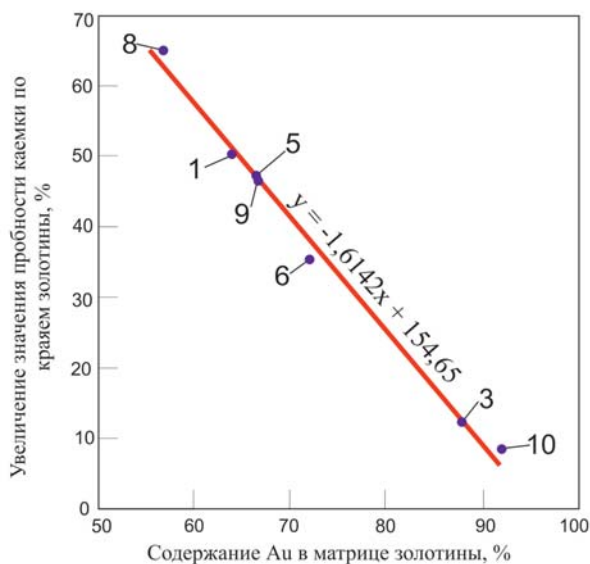


Рис. 10. Изменение пробности каймы по краям золотины относительно пробности золотины

порциальную зависимость с пробностью золотины. Изменение пробности каймы рассчитывалось по формуле:

$$\text{Приращение пробности каймы} = \frac{\text{ПРк} - \text{ПРз}}{\text{ПРз}} \times 100 \%,$$

где ПРк — пробность каймы, %; ПРз — пробность остаточного гипогенного золота, %.

Это изменение пробности краевых кайм описывается уравнением, выведенным по линии тренда (рис. 10):

$$y = -1,6142 \times \text{ПР}_3 + 154,65,$$

где y — процент увеличения пробности каймы; ПР₃ — пробность золотины. Величина достоверности аппроксимации (R²) при этом составляет 0,994.

Этот результат обуславливается близкими значениями пробности гипергенной каймы, которые, в свою очередь, указывают на единый процесс формирования кайм.

Данный подход возможно применять для восстановления условий, при которых формировалась высокопробная кайма на золотилах. Если все золотины подчиняются данной зависимости, то справедливо утверждать, что формирование данных кайм прошло на протяжении одного процесса. В случае, если не все золотины подчиняются такому распределению, то можно предполагать, что каймы образовались в результате различных процессов.

Гипергенная кайма на золотине может образоваться в результате как процессов выщелачивания серебра и других металлов из гипогенного золота, так и в результате образования «нового» золота. Образование «нового» золота связано с осаждением металлов из циркулирующих в россыпи растворах. Наличие золота и серебра в растворах может быть вызвано рядом причин: расположением россыпи вблизи зоны окисления рудного объекта, поступлением из окисляющихся сульфидов, растворением поверхности золота в процессе коррозии [2]. До сих пор нет единого мнения на происхождение кайм выщелачивания. С одной стороны, считается, что высокопробные каймы формируются в результате электрохимической коррозии [2], с другой стороны, — образование высокопробного слоя в приповерхностных частях золотин происходит при выщелачивании серебра [2].

Корреляционная зависимость пробности каймы от пробности остаточного гипогенного золота указывает на то, что при формировании высокопробных кайм доминирующим процессом было *выщелачивание серебра*.

Для золота россыпей промежуточных коллекторов зачастую характерно слоистое строение кайм [2], которое связано с многостадийным процессом их образования. Отсутствие зонального строения высокопробных гипергенных кайм в исследуемых золотилах позволяет предположить, что каймы на золотилах сформировались одновременно.

Моделируя процесс образования кайм, выясняется, что их формирование на золотилах с пробностью более 958‰ невозможно, так как ожидаемая расчетная пробность кайм будет ниже пробности золотины. Вероятно, формирование высокопробных кайм возможно и на золотилах с пробностью выше 958‰, однако данный расчет характеризует особенности формирования высокопробных кайм именно на золотилах данной россыпи.

Выводы

В результате исследования вещественных особенностей гипогенных и гипергенных образований золота техногенных отложений руч. Снежный можно сделать несколько выводов. Во-первых, наличие сростков золота с галенитом (5 золотинов из 11) при отсутствии минералов тяжелой фракции в шлихах указывает на сложный многостадийный процесс переноса золотин

из коренного источника, что подтверждает предположение о поступлении золота в руч. Снежный из промежуточного коллектора, в качестве которого могут выступать отложения Адычанских террас II эрозионного уровня. Во-вторых, разделение гипогенного золота на две группы по пробности и однородности ее распределения указывает на то, что в промежуточный коллектор золото поступило из различных рудных формаций: группа низкопробных золотин относится к проявлениям золото-малосульфидной формации, группа высокопробных золотин относится к золото-сурьмяной формации. В-третьих, высокопробные каймы сформировались в результате одного процесса, что подтверждается близкими значениями пробности гипергенной каймы и отсутствием ее зональности. Выявленная зависимость между пробностью остаточ-

ного гипогенного золота и высокопробной гипергенной каймы с коэффициентом корреляции 0,82 указывает на процессы выщелачивания серебра при образовании каймы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Владимирцева, О.В. О вероятном источнике аллювиальных россыпей золота руч. Куранах и руч. Снежный (Верхоянский район, Якутия) / О.В. Владимирцева / Новые идеи в науках о Земле: Материалы XIV Международной научно-практической конференции. — М.: МГРИ-РГГРУ, 2019. — Т. 2. — С. 46–50.
2. Николаева, Л.А. Генетические особенности самородного золота как критерии при поисках и оценке руд и россыпей / Л.А. Николаева. — М.: Недра, 1978.

© Владимирцева О.В., Набелкин О.А., Субботин Н.А., 2019

Владимирцева Ольга Владимировна // olga_9_4@mail.ru
Набелкин Олег Анатольевич // mulderfw@yandex.com
Субботин Николай Алексеевич // subbotin26@mail.ru

ГЕОФИЗИКА

УДК: 550.837.211

Тарасов А.В.^{1,2}, Ихина Э.Р.¹, Каюков А.Е.³, Гоглев Д.А.⁴
(1 — ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика», 2 — Санкт-Петербургский государственный университет ИНЗ, 3 — ООО «Байкал Недра Гео», 4 — ООО «ГЕОСКАН»)

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОВЫСОТНОЙ АЭРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ С КОМПЛЕКСОМ ГЕОСКАН-401-ГЕОФИЗИКА НА СЫННЫРСКОМ УЛЬТРАКАЛИЕВОМ МАССИВЕ

В статье представлены результаты аэромагнитной съемки, выполненной с помощью беспилотного аэромагнитного комплекса ГЕОСКАН-401-Геофизика. Съемка была проведена в пределах Сынырского ультракалиевого массива в Северо-Байкальском районе Республики Бурятия. В результате обработки аэромагнитных данных была получена новая геолого-структурная информация, позволившая скорректировать программу горно-буровых работ. **Ключевые слова:** аэромагнитная съемка, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), Сынырский массив, сыныриты, шонкиниты.

Tarasov A.V.^{1,2}, Ihina E.R.¹, Kayukov A.E.³, Goglev D.A.⁴
(1 — VIRG-Rudgeofizika, 2 — St. Petersburg State University, 3 — Baikal Nedra Geo, 4 — GEOSCAN)

EXPERIENCE OF USING LOW-ALTITUDE AEROMAGNETIC SURVEY WITH THE COMPLEX GEOSCAN-401-GEOPHYSICS AT THE SYNRYR ULTRAPOTASSIC IGNEOUS MASSIF

The article presents the results of aeromagnetic survey carried out at the Synryr ultrapotassic igneous massif (North-Baikal region of Russia). GEOSCAN-401-Geophysics unmanned

aeromagnetic complex was used to measure magnetic field at low altitude above relief surface. A new geologic-structural information was obtained as a result of the aeromagnetic data processing. It allowed to correct drilling program on the prospecting area. **Keywords:** aeromagnetic survey, unmanned aerial systems, Synryr massif, ultrapotassic rocks, shonkinite.

Введение

Поиски полезных ископаемых геофизическими методами требуют постоянного совершенствования и внедрения инноваций для повышения экономической эффективности с сохранением высокой производительности. В последнее десятилетие значительно вырос интерес к применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения геологических задач, благодаря возможности установки на них различного оборудования: от фото- и видеоаппаратуры до современных геофизических приборов, таких как квантовые магнитометры.

Магниторазведка, как ни один другой геофизический метод, подходит для использования БПЛА. Современные магнитометры относительно легкие и малопотребляющие электроэнергию геофизические приборы, которые обеспечивают высокую точность измерения модуля вектора магнитного поля. Это позволяет устанавливать магнитометры на относительно легкие БПЛА.

Магниторазведка на базе БПЛА особенно результативна в труднодоступных регионах, характеризующихся резкими перепадами высот, залесенностью, заболоченностью и прочими осложняющими пешеходную съемку условиями.

Преимущества низковысотной аэромагнитной съемки перед пешеходной съемкой очевидны. Производи-