

На правах рукописи



Кузнецова Инна Владимировна

**ГЕОЛОГИЯ, ТОНКОДИСПЕРСНОЕ И НАНОРАЗМЕРНОЕ ЗОЛОТО В
МИНЕРАЛАХ РОССЫПЕЙ НИЖНЕСЕЛЕМДЖИНСКОГО
ЗОЛОТОНОСНОГО УЗЛА (ПРИАМУРЬЕ)**

Специальность 25.00.11 – геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

КРАСНОЯРСК – 2011

Работа выполнена в Институте геологии и природопользования
Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Благовещенск.

Научный руководитель: академик РАН,
доктор геолого-минералогических наук
Валентин Григорьевич Моисеенко

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук
Сазонов Анатолий Максимович

кандидат геолого-минералогических наук
Кошкин Владимир Федорович

Ведущая организация: ОАО «Амургеология»
г. Благовещенск

Защита состоится 20 мая 2011 г. в 12 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.099.09 при Федеральном государственном
автономном образовательном учреждении высшего профессионального
образования «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г.
Красноярск, пер. Вузовский 3, ауд. 237.

Автореферат диссертации разослан «18» апреля 2011 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО Сибирского
федерального университета.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат геол.-минерал. наук



М. В. Вульф

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В Монголо-Охотской ветви Тихоокеанского рудного пояса (Смирнов, 1946; Радкевич, Моисеенко, 1966) расположен ряд месторождений золота, среди которых наиболее распространены коренные месторождения с упорными рудами и россыпи с преобладанием тонкодисперсного и наноразмерного золота. Эта закономерность особенно характерна для золотоносных узлов Приамурья, в которых нередко наблюдается совмещение собственно золотого, золотосеребряного и золотополиметаллического оруденения с преобладанием тонкодисперсного золота. В процессе гипергенеза золоторудные месторождения претерпевают существенные изменения, при этом происходит, как преобразование видимого самородного золота, так и формирование его новообразованных разновидностей. Между тем, на сегодняшний день до конца не выяснены факторы и механизмы, вызывающие эволюцию золота в зоне гипергенеза. Нет полного представления о распределении и содержании золота в минералах россыпей. Добыча золота в Приамурье ведется более 100 лет и за это время многие из россыпей обрабатывались по нескольку раз. Главная причина плохого извлечения благородного металла связана с тем, что основное количество золота закапсулировано в других минералах. Изучение и оценка золотоносности россыпей, тонкодисперсного и наноразмерного золота в россыпных месторождениях и продуктах их обработки, является одним из важнейших условий для решения проблемы повышения эффективности россыпной золотодобычи. Поэтому актуальными являются минералого-геохимические исследования по определению количества золота в минералах россыпей, проведенные на материале Нижнеселемджинского золотоносного узла (НЗУ) и экспериментальные работы по моделированию процессов укрупнения наночастиц золота.

Цель и задачи исследований. Целью работы являлось исследование геологического строения и закономерностей локализации месторождений золота Нижнеселемджинского рудно-россыпного узла Приамурья, гипергенных факторов, определяющих миграцию, концентрирование и морфоструктурные характеристики тонкодисперсного и наноразмерного золота россыпей, изучение процессов агрегирования золота от нано- до макроразмеров в природе и эксперименте.

Основные задачи: (1) изучение геологии, рудной и россыпной минерации Нижнеселемджинского золотоносного узла; (2) выявление геологических и минералогических особенностей россыпей золота НЗУ, а также выяснение генезиса и определение форм нахождения золота в россыпях; (3) экспериментальные исследования по укрупнению наночастиц золота.

Фактический материал и методы исследования. В основу диссертации положен фактический материал, собранный автором или с его участием в период с 1996 по 2010 годы в АмурКНИИ ДВО РАН и ИГиП ДВО РАН при выполнении плановых научно-исследовательских работ. Методические приемы исследования: геологические, аналитические и экспериментальные работы.

Автором проведены полевые работы на ряде объектов и под руководством академика РАН В.Г. Моисеенко экспериментальные работы по определению количества тонкодисперсного и наноразмерного золота, изучению его состава, размеров и форм выделений благородного металла в минералах месторождений Приамурья. Для исследования вещественного состава россыпей и отходов золотодобычи, выявления форм нахождения в них золота, а также оценки его содержания было изучено и проанализировано 560 кг шлиховых концентратов Нижнеселемджинского золотоносного узла, 110 кг отходов флотации Харгинской обогатительной фабрики. Проведено более 100 экспериментов. Атомно-абсорбционный анализ проводился в лабораториях химического анализа АмурКНИИ ДВО РАН и ИГиП ДВО РАН на двухлучевом спектрофотометре 1 класса фирмы «Hitachi» (250 анализов). В пробирной лаборатории АмурКНИИ ДВО РАН проанализировано 100 проб. Спектральный полуколичественный анализ на 32 элемента произведен в лабораториях АмурКНИИ ДВО РАН и ОАО «Амургеология» (~1000 проб). Минералогический состав образцов определяли в лаборатории минералогии АмурКНИИ ДВО РАН и лаборатории минералогии и геохимии месторождений полезных ископаемых ИГиП ДВО РАН (100 проб). Электронно-микроскопические исследования минералов проводились в лабораториях АмурКНИИ ДВО РАН, ИГиП ДВО РАН, АЦ ДВГИ ДВО РАН и ЦЭМ ИБМ ДВО РАН.

Защищаемые положения.

1. Разработана интрузивно-купольная модель строения Нижнеселемджинского золотоносного узла, основные элементы которой – углеродистые и известковистые толщи средне- позднепротерозойского(?) возраста, прорванные массивами раннемеловых гранитоидов, определяют рудно-магматическую систему зонального распределения рудных и морфоструктурные закономерности локализации россыпных концентраций золота различных формационных типов.

2. Исследован вещественный состав россыпей НЗУ. Установлены минералы-концентраты наноразмерного золота – монацит, рутил, галенит. Изучен процесс гипергенеза, при котором золото высвобождается из золотосодержащих минералов и перетлагается в виде аутигенных губчатых, глобулярных и кристалломорфных зерен и агрегатов.

3. Экспериментально уточнены параметры разложения минералов-носителей тонкодисперсного и наноразмерного золота, его высвобождения и переотложения. В лабораторном процессе образуются более крупные, чем в природе сростки частиц и самородки сфероидной и ячеисто-сотовой морфологии. Предложена схема обработки проб для выделения и изучения различных форм золота в минералах россыпей.

Научная новизна работы. Впервые предложена интрузивно-купольная модель Нижнеселемджинского золотоносного узла, в которой основная часть россыпей и рудопоявлений золота приурочена к средне- и верхнепротерозойской(?) толще углеродистых и известковистых сланцев, прорванных разновозрастными интрузиями.

Выявлено значительное количество наноразмерного золота входящего в монацит, рутил, галенит и другие минералы россыпей НЗУ. Доказана гипергенная перегруппировка и вторичное концентрирование золота в техногенных россыпях НЗУ.

Экспериментально уточнены параметры разрушения минералов-концентраторов золота с высвобождением наночастиц Au и образованием из них более крупных по размеру сростков благородного металла сфероидной и ячеистой структуры.

Практическая значимость работы. Приуроченность золотоносности НЗУ к средне- верхнепротерозойской (?) толще углеродистых и известковистых сланцев, прорванной многоэтапными интрузивными образованиями, расширяет перспективы обнаружения в его пределах рудных месторождений золота.

В результате изучения геологических и минералогических особенностей россыпей НЗУ получены новые данные, свидетельствующие о перспективах наращивания ресурсов россыпного золота за счет присутствующих в материале аллювия наноразмерных частиц благородного металла.

Экспериментально разработан оригинальный подход к более точному определению содержания золота в минералах россыпей, позволяющий увеличить ресурсы благородного металла.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 13 работ, три из которых в журналах, входящих в список ВАК РФ. Основные положения диссертации были представлены и докладывались на II международной научно-технической конференции «Современные технологии освоения минеральных ресурсов» (Красноярск, 2004), II Международной конференции «Стратегии развития минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Москва, 2006), международном экологическом форуме "Природа без границ" (Владивосток, 2007), научном симпозиуме «Наногеохимия золота» (Владивосток, 2008), Всероссийской конференции, посвященной 100-летию Н.В. Петровской «Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований» (Москва, 2010), Всероссийской научно-практической конференции «Новые и нетрадиционные типы месторождений полезных ископаемых Прибайкалья и Забайкалья» (Улан-Удэ, 2010).

Объем и структура диссертации. Объем рукописи составляет 151 страницу машинописного текста. Работа состоит из Введения, 3-х глав, Заключения, Списка литературы (включающего 224 наименований), содержит 9 таблиц и 32 рисунка. *Введение* аналогично вводной части автореферата. В *первой главе* определены геологическое строение и основные закономерности размещения рудопроявлений и россыпей золота Нижнеселенгинского золотоносного узла. Во *второй главе* дана типизация россыпей, рассмотрены минералогические характеристики россыпей золота, типоморфные особенности самородного золота, определены основные минералы-концентраторы благородного металла и изучены процессы укрупнения золота в зоне гипергенеза. В *третьей главе* приведены результаты экспериментальных работ по разложению минералов-концентраторов золота из россыпей с высвобождением нано- и микрочастиц Au и образованием из них

более крупных сростков благородного металла. Содержание первой, второй и третьей глав обосновывает 1-ое, 2-ое и 3-е защищаемые положения. В *заключении* обобщены результаты исследований и перечислены основные выводы.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность руководителю академику РАН В.Г. Моисеенко за формирование целей и задач исследований и организационную помощь в проведении работ. За неизменное внимание к работе, ценные советы и практическую помощь автор особо благодарит д.г.-м.н., профессора В.А. Степанова. Автор также очень признателен к.г.-м.н. А.В. Мельникову, д.г.-м.н. Г.И. Неронскому, к.г.-м.н. С.М. Радомскому, к.х.н. В.И. Радомской, и к.г.-м.н. Д.Л. Вьюнову за методическую помощь при подготовке работы; д.г.-м.н. Н.С. Остапенко, д.г.-м.н. В.Е. Стрихе и к.г.-м.н. А.Ф. Миронюку – за критические замечания и консультации при написании работы. Большой вклад в выполнение аналитических работ внесли к.ф.-м.н. П.П. Сафронов, Т.Б. Макеева, к.ф.-м.н. В.И. Рождествина, Е.Н. Воропаева, Л.И. Козак, Н.С. Санилевич и Н.А. Бородина. Автор также крайне признателен генеральному директору ОАО «Майское» Маврину В.П. за содействие при сборе фактического материала.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Разработана интрузивно-купольная модель строения Нижнеселемджинского золотоносного узла, основные элементы которой – углеродистые и известковистые толщи средне- позднепротерозойского(?) возраста, прорванные массивами раннемеловых гранитоидов, определяют рудно-магматическую систему зонального распределения рудных и морфоструктурные закономерности локализации россыпных концентраций золота различных формационных типов.

Нижнеселемджинский золотоносный узел приурочен к Селемджинскому звену позднепротерозойско-палеозойской Дасинаньлин-Селемджинской складчатой системы Центрально-Азиатского подвижного пояса и расположен в центральной части Амуро-Охотской минерагенической провинции на правом берегу р. Селемджа.

Степень изученности Нижнеселемджинского золотоносного узла остается явно недостаточной. Имеющиеся геологические материалы не обеспечивают получение необходимой информации как об интенсивности оруденения, так и о геологическом строении узла в целом. Это определило необходимость разработки предварительной модели Нижнеселемджинского рудно-россыпного узла, базирующейся на конкретных фактических материалах.

В геолого-структурном плане Нижнеселемджинскому золотоносному узлу отвечает эродированное интрузивно-купольное поднятие изометричной формы площадью около 1200 км² (рис. 1). Узел сложен образованиями неклинской и дагмарской толщ среднего- позднего(?) протерозоя, прорванными палеозойскими гранитоидами октябрьского и тырмо-буреинского комплексов. Раннемеловые гранит-порфиры буриндинского комплекса образуют небольшие штоки и силлоподобные тела северо-восточного простирания в междуречье рр. Орловка – Селемджа. Незначительно распространены раннемеловые вулканиты поярковской свиты и их субвулканические аналоги. Ареал нижнемеловых магматитов

расположен в юго-восточном секторном блоке поднятия. На остальной территории встречаются лишь их дайки.

В пределах Нижнеселемджинского узла широко развиты россыпи золота, в основном аллювиальные, из которых с конца XIX века добыто более 20 тонн благородного металла. Из них около 9 т получено при отработке делювиально-элювиальных россыпей, к которым относится вершина р. Некля и ее левого притока руч. Веселый. Эти россыпи приурочены к коре выветривания по углеродистым хлорит-актинолитовым сланцам $PR_{2-3}(?)$, с редкими прослоями доломитизированных известняков. Золотоносные пласты россыпей располагаются непосредственно на плотике и представлены сильновыветрелыми галечниками с пестроцветной песчано-глинистой примазкой. В головках россыпей и в местах дополнительной подпитки металлом золото относительно крупное, ноздреватое, часто в сростках с кварцем. Доля золота рудного облика составляет до 60%.

В пределах НЗУ расположены небольшие рудопроявления золота: Храброе, Утесное, Загадочное и др., представленные зонами золото-кварцевого и золото-сульфидно-кварцевого прожилкования в кварц-сланцевых сланцах, углеродистых алевропелитовых и зеленокаменных породах позднего протерозоя. Оруденение малосульфидное, золото-кварцевой формации. Из рудных минералов отмечаются пирит, арсенопирит и самородное золото.

С золотым оруденением парагенетически связаны широко развитые дайки фельзит-порфиров, кварцевых порфиров и гранит-порфиров раннемелового буриндинского комплекса. Прогнозные ресурсы золотого оруденения оцениваются разными исследователями в первые десятки тонн.

Наблюдаются определенные закономерности в размещении россыпей и рудопроявлений золота, обусловленные концентрически-зональным и секторно-блоковым строением узла. Россыпи золота берут начало в приадачной, наиболее эродированной части узла. Они располагаются среди палеозойских интрузивных массивов и протягиваются вдоль радиальных и внутреннего концентрического разломов. В результате разрушения протолитов в россыпях в значительных количествах накапливаются акцессорные минералы (ильменит, магнетит, циркон и др.). Наиболее богатые россыпи приурочены к радиальным и центральному концентрическому разломам, располагаясь в основном, в юго-восточном секторе узла. На периферии узла известны протяженные бедные россыпи крупных рек Селемджа и Орловка, русла которых вытянуты вдоль внешнего концентрического разлома НЗУ.

Рудопроявления золота и свинца тяготеют к периферии узла. Большая часть их выявлена в юго-восточном секторном блоке, в котором сланцевые толщи позднего протерозоя прорваны серией субвулканических малых интрузий и даек гранит-порфиров раннемелового возраста.

Нижнеселемджинскому узлу отвечает аномальное геохимическое поле Au-Ag специализации ранга рудного узла. НЗУ отнесен к наиболее перспективным рудным узлам Приамурской провинции. Прогнозные ресурсы Au рудно-россыпного узла составляют: по категории P_2 – 11 т, по категории P_3 – 330 т (Д.Л. Вьюнов и др., 2005). Прогнозные ресурсы россыпного золота по категории P_3 – 6 т (Н.Н. Петрук и др., 2003).

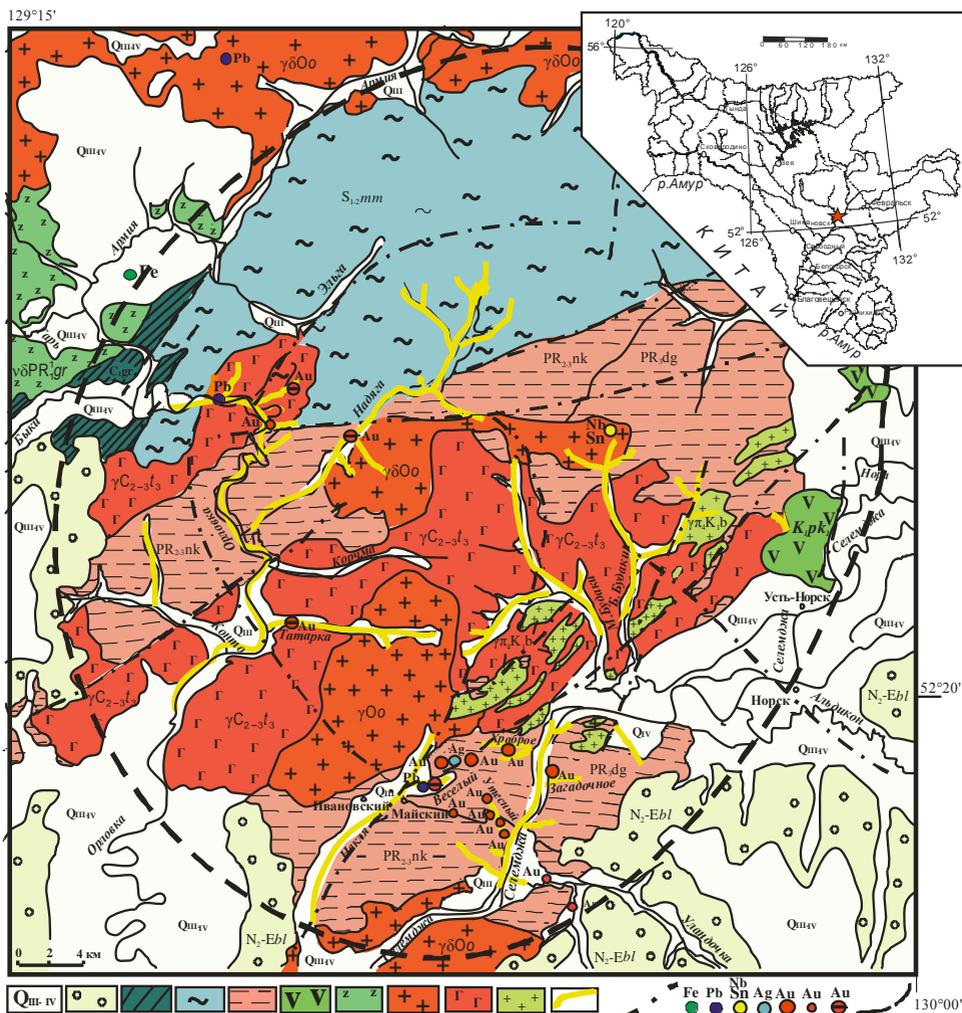


Рис. 1. Геологическое строение НЗУ с элементами золотонности (использовались материалы В.Ф. Зубкова, 1980 г.; Ю.В. Кошкова и др., 1998 г.; Д.Л. Вьюнова и др. 2005 г.).

Условные обозначения: 1 – четвертичные образования (валуны, галька, гравий); 2 – неоген-четвертичные образования (глины, песок, галька, алевролиты); 3 – каменноугольные отложения (песчаники, известняки, алевролиты); 4 – силурийские отложения (песчаники, алевролиты, конгломераты, туфы); 5 – верхнепротерозойские (?) терригенно-карбонатные отложения (сланцы, известняки, песчаники); 6 – раннемеловые андезиты; 7 – раннепротерозойские габбродиориты; 8 – ордовикские граниты; 9 – граниты и гранодиориты среднего-позднего карбона; 10 – раннемеловые гранит-порфиры, гранодиорит-порфиры и диоритовые порфириты; 11 – россыпи золота; 12 – разломы; 13-17 – рудопроявления: 13 – железа, 14 – свинца, 15 – олова и ниобия, 16 – серебра, 17 – золота; 18-19 места отбора штуфных проб с высоким содержанием золота: 18 – по данным Д.Л. Вьюнова (2005), 19 – данные автора; 20 – схематическая граница узла. На врезке показано географическое положение НЗУ.

Интрузивно-купольное поднятие дешифрируется на аэрофотоснимках, отчетливо отражено в геофизических и геохимических полях. На гравиметрической карте центральной части НЗУ отвечает изометричная отрицательная аномалия в 22 мГл. В магнитном поле центральной части узла соответствует слабопеременное отрицательное поле до -200 нТл, а периферии – резкопеременное от отрицательного до положительного. В сочетании положительных и отрицательных гравиметрических и магнитных аномалий вырисовывается структура золотоносного узла.

Таким образом, по геоморфологическим, геохимическим и геофизическим данным разработана геолого-структурная модель Нижнеселемджинского золотоносного узла, представляющая собой интрузивно-купольное поднятие. Установленная приуроченность золотого оруденения к углеродистым и известковистым сланцам протерозоя позволяет прогнозировать выявление промышленных месторождений золото кварцевого, золотополиметаллического и других типов. Наиболее высоки перспективы выявления золоторудных месторождений не в центральной, наиболее эродированной, а в периферической части узла. Здесь среди сланцевых и терригенных толщ сохранились структуры экранирования, благоприятные для локализации золотого оруденения.

2. Исследован вещественный состав россыпей НЗУ. Установлены минералы-концентраты наноразмерного золота – монацит, рутил, галенит. Изучен процесс гипергенеза, при котором золото высвобождается из золото содержащих минералов и преотлагается в виде аутигенных губчатых, глобулярных и кристалломорфных зерен и агрегатов.

По геоморфологическим особенностям среди россыпей НЗУ выделяются долинные, увальные, террасовые, русловые и делювиально-элювиальные. Большинство россыпей верхнечетвертичного возраста, к современным относятся долины крупных рек (Орловка и Селемджа). Все россыпи НЗУ отработаны и переведены в разряд техногенных. Но работы по добыче благородного металла продолжают до настоящего времени. Главная причина плохого извлечения связана с тем, что основное количество золота в россыпях тонкодисперсное или находится в минералах-концентратах.

Основным источником золота в россыпях являются не крупные золото кварцевые жилы, а рассеянные по площади маломощные золотоносные кварцевые прожилки в гранитоидах и осадочных породах, метаморфизованных в фации зеленых сланцев. Непосредственно на полигоне россыпи руч. Веселый обломки дезинтегрированных кварцевых жил залегают в полностью разложенных вмещающих породах, которые состояли из хлорит-серицит-кварцевых сланцев. В обломочном кварце установлено содержание золота от 0,07 до 180 г/т. Наиболее богатыми зонами коры выветривания являются каолинит-хлорит-серицитовые глины (содержание Au 3,3 г/т). Они отличаются ограниченным развитием в цоколе профиля и наличием стяжений золотоносных железомарганцевых оксигидроксидов (содержание Au 5,2 г/т).

Минеральный состав продуктивного пласта россыпей следующий (% от массы): глинистые минералы от 19 до 41; кварц с полевыми шпатами от 24 до 68; рудные минералы в сумме составляют до 3%. Среднее содержание золота по

россыпям НЗУ от 50 до 200 мг/м³ на массу. Для россыпей характерен значительный разброс выхода тяжелого шлиха от 0,2 до 9 кг/м³ породы.

Для определения минерального состава тяжелого шлиха россыпей узла были отобраны представительные шлиховые пробы из бассейнов рек Татарка, Надяга и Некля. Магнитная фракция шлихов представлена магнетитом и мартитом. Количество ее в среднем составляет 3-7% от общей массы черного шлиха (до 300 г/м³ породы), преобладающим минералом является магнетит (до 90% фракции).

Электромагнитная фракция составляет от 34 до 72% от всей массы шлиха. От 5 до 50% электромагнитной фракции составляет ильменит. В состав шлиха входят также следующие минералы: гранат, монацит, гематит, рутил, фергусонит, колумбит, сфен, эпидот, сидерит, пирит и хромит.

Тяжелая немагнитная фракция составляет от 4 до 29% от общей массы черного шлиха и включает в себя: циркон, золото, рутил, сфен, касситерит, галенит и пироморфит. Доминирует циркон (до 55% фракции).

Содержание свободного золота в отобранных тяжелых шлихах колеблется от 0,08 до 1629,8 г/т. Кроме свободного золота присутствует золото, связанное в различных минералах.

При формировании техногенных россыпных месторождений происходят геологические процессы, связанные с гипергенным изменением состава пород, выведенных на поверхность. При этом изменяются окислительно-восстановительные и другие физико-химические условия среды.

В россыпи руч. Веселый в процессе формирования техногенной россыпи наблюдается изменение процентного соотношения основных минералов в тяжелой фракции шлиха. Увеличивается количество самородного Pb до 16% с одновременным уменьшением галенита до 5%. Выявлено до 12% металлического Fe и окислов железа. Уменьшилось количество магнетита, не обнаружены гематит, пирит и лимонит. Появляется амальгама золота (до 0,5%).

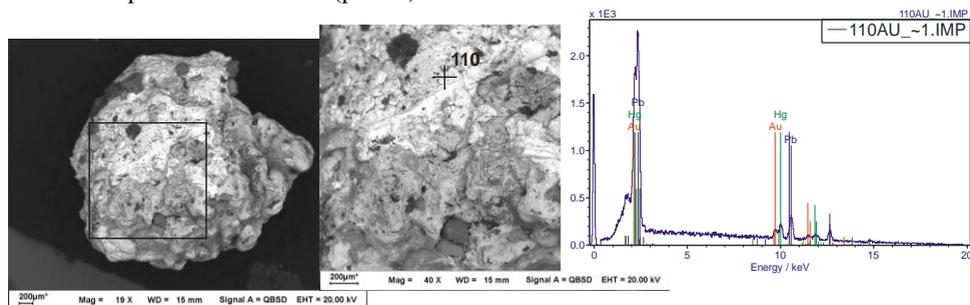
В аллювии в восстановительных условиях, создаваемых деструкцией органического вещества, заболоченностью и отсутствием кислорода, происходит разложение адуляра, некоторых минералов железа (гематита, пирита, магнетита) и галенита с частичным восстановлением до металла. При этом происходит высвобождение закапсулированного в них тонкодисперсного и наноразмерного золота, вынос его и переотложение.

Среднее содержание свободного золота в тяжелой фракции шлиха техногенной россыпи руч. Веселый по минералогическому анализу 1473 г/т, по данным атомно-абсорбционного метода содержится 1758 г/т Au. Предполагается, что часть золота находится в минералах тяжелой фракции в связанном состоянии. В процессе золотодобычи, где до недавнего времени широко использовалась ртуть, активно происходит трансформация амальгам с высвобождением золота, при этом происходит заражение благородным металлом типичных аксессуарных минералов поступивших в россыпи, таких как ильменит (Au-110 г/т, Ag-50 г/т) и циркон (Au-280 г/т, Ag-560 г/т).

Установлены основные золотосодержащие минералы в техногенной россыпи руч. Веселый: халцедоновидный кварц (Au 100-150 г/т, Ag 10-30 г/т), магнетит (Au 100-300 г/т, Ag 50-100 г/т) и самородный свинец (Au 60-140 г/т, Ag 20-50 г/т).

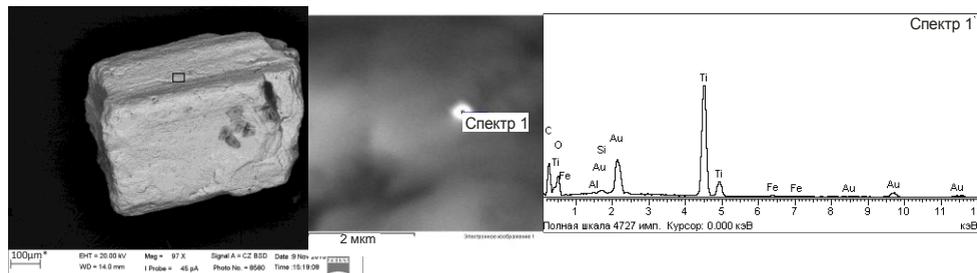
Наряду с традиционными, выявлены новые минералы-концентраты золота – монацит (Au 400-680 г/т, Ag 400-600 г/т); рутил (Au 500-1000 г/т, Ag 20-70 г/т) и галенит (Au 5-10 г/т, Ag 1-2 г/т).

Галенит в пробе частично окисленный, незначительно окатанный. Структура поликристаллическая, зернистая. Некоторые его зерна, кроме включений других минералов (ильменита, касситерита, кварца и др.), содержат примазки амальгамированного золота (рис. 2).



а) б) **Рис. 2.** Галенит из россыпи руч. Веселого (левый приток р. Некля) НЗУ: а) общий вид зерна; б) увеличенный фрагмент поверхности галенита, содержащий амальгаму Pb-Hg-Au (спектр 110). РЭМ, РСМА, изображения в отраж. электронах (аналитик Т.Б. Макеева, ИГИП ДВО РАН).

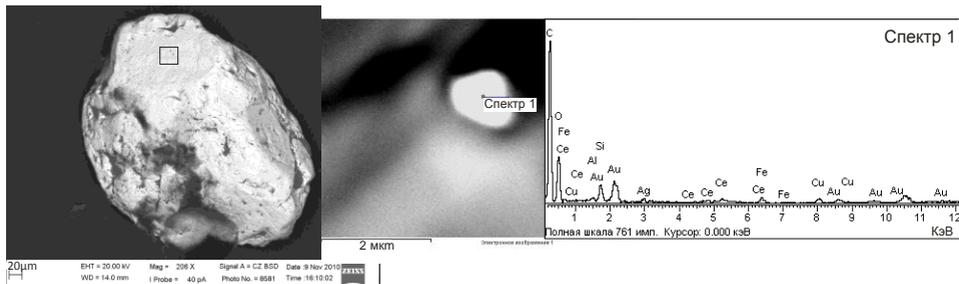
Рутил в россыпи слабо окатанный, черного цвета (рис. 3а). Многие зерна, наряду с вростками кварца или алюмосиликата, и примесью Fe, содержат включения наноразмерного золота (рис. 3б, в).



а) б) в) **Рис. 3.** Рутил из россыпи руч. Веселый: а) общий вид зерна; б) увеличенный фрагмент поверхности этого зерна с наночастицей высокопробного золота (~250-300 нм) в рутиловой матрице; в) спектр от данного выделения золота (эл-т Au) и от частично захваченной матрицы (эл-ты: Ti, O, примесь Fe) с сохранившимися на ее поверхности остатками алюмосиликата (Si, Al). РЭМ, РСМА, изображения в отраж. электронах (аналитик П.П. Сафронов, АЦ ДВГИ ДВО РАН, ЦЭМ ИБМ ДВО РАН).

Монацит в россыпи полуокатанный, просвечивающий, светло-желтого цвета (рис. 4а). Методами РЭМ на его поверхности, в дефектах структуры, зафиксированы включения микро- и наноразмерного золота (рис. 4б)

Наличие отложений микро- и наноразмерного Au на поверхности и по дефектам структур золотосодержащих минералов (галенита, рутила, монацита) свидетельствует о гипергенном характере генезиса благородного металла.



а) б) **Рис. 4.** Монацит из россыпи руч. Веселый: а) общий вид зерна; б) увеличенный фрагмент поверхности зерна монацита с микрочастицей медистого золота (~1.2 мкм), находящейся в ассоциации с высокоуглеродистой породой в одной из интерстиций на поверхности зерна (спектр 1). РЭМ, РСМА, изображения в отраж. электронах (аналитик П.П. Сафронов, АЦ ДВГИ ДВО РАН, ЦЭМ ИБМ ДВО РАН).

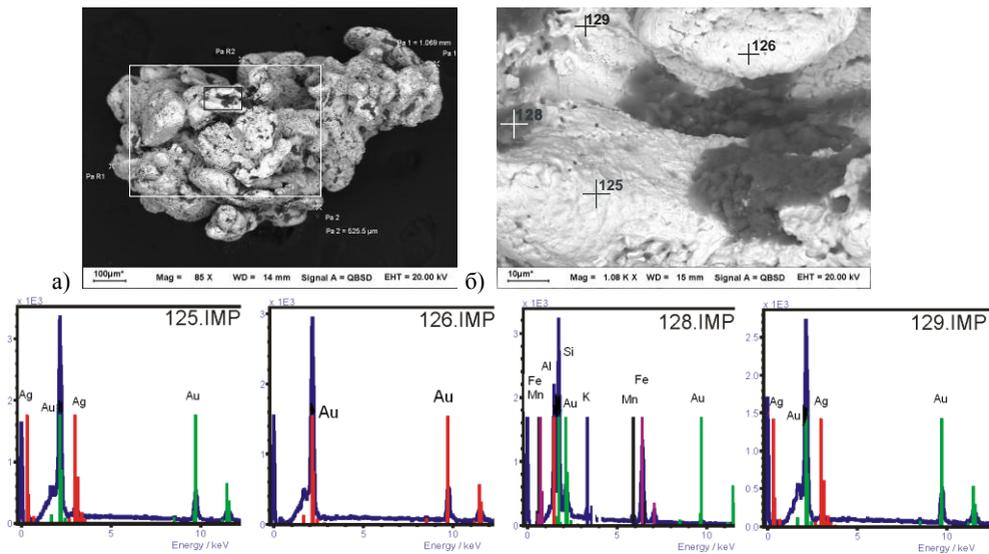
Процессы физико-химического преобразования вещественного состава россыпей (освобождение минералов из глинистых агрегатов, сростков и др.) и золота (высвобождение, вынос и переотложение), проявляющиеся в зоне гипергенеза и при разработке золотосодержащих месторождений, приводят к перераспределению концентраций тонкодисперсного золота и его укрупнению.

Проба золота в россыпях НЗУ значительно изменяется даже в пределах одной россыпи - от 810 до 950‰, в среднем по узлу составляет – 880‰ (Неронский, 1998). Основная масса золота (90-95% всего металла) россыпей НЗУ однотипна по своему химическому составу и является продуктом разрушения руд одного генетического типа. Кроме высокопробного золота, в россыпях НЗУ постоянно наблюдается электрум и мелкие зерна зеленовато-желтого золота с мелкозернистой структурой.

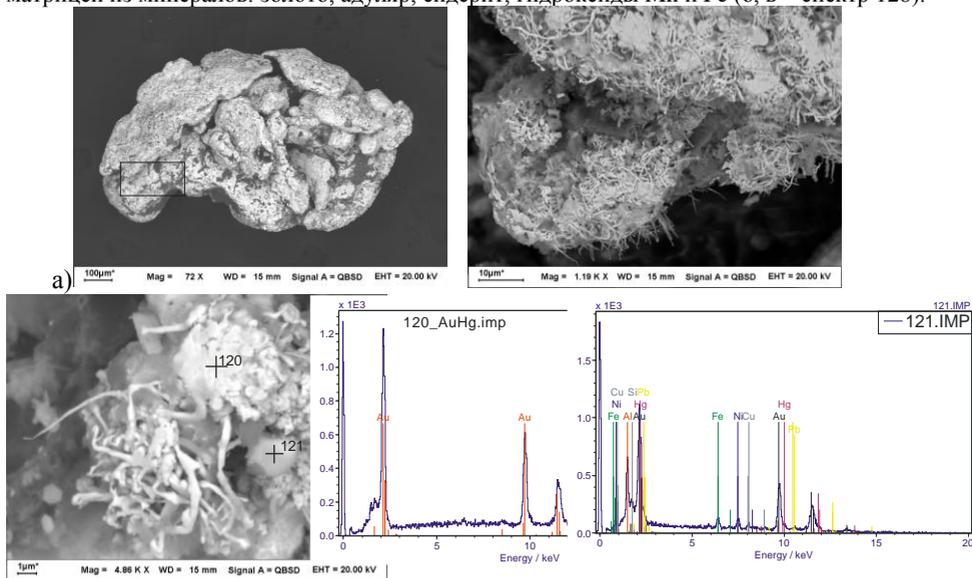
Золото в *техногенных россыпях* распределено неравномерно, его крупность варьирует от наноразмерного до самородков. В россыпи руч. Веселый часто встречается золото рудного облика и крупные самородки (до 186 г), как окатанные, так и в сростках с кварцем. Преобладающая масса золота в россыпи имеет остаточное происхождение, с достоверностью определяемое по взаимоотношению с кварцем и вторичное (гипергенное), характеризующееся высокой пробой, сложной микроструктурой поверхности и наличием включений алюмофосфатов и гидроксидов марганца и железа (рис. 5).

В россыпи руч. Веселого наблюдается гипогенное золото двух видов: высокопробное (рис. 5б, в - спектр 126) и электрум (рис. 5б, в - спектр 125, 129), по-видимому, различного генезиса (плутоногенного и вулканогенного). Эти зерна золота, характеризующиеся различным составом (рис. 5б, в - спектр 125, 126, 129) цементируются в единый агрегат полиминеральной матрицы, состоящая из золота, адуляра, сидерита и гидроксидов Mn и Fe (рис. 5б, в - спектр 128).

Широко развито «новое» золото, которое отлагается на поверхности окатанных золотин и отличается высокой (до 1000‰) пробой (рис. 5б, в - спектр 126; рис. 6б спектр - 120). Пленки аутигенного золота покрывают поверхность, как разных минералов, так и кластогенные зерна золота.



в)
Рис. 5. Конгломерат самородного золота, россыпи руч. Веселый (а), состоящий из более мелких зерен золота различного состава (б, в – спектры 125, 126, 129) сцементированные матрицей из минералов: золото, адуляр, сидерит, гидроксиды Mn и Fe (б, в – спектр 128).



б)
Рис. 6. Гипергенное золото россыпи руч. Веселый: а) общий вид зерна и увеличенный фрагмент его поверхности; б) увеличенная поверхность золотины с новообразованным высокопробным нитевидным нанозолотом (~100 нм) (спектр 120) в сростках с амальгамированным интерметаллидом сложного состава (спектр 121) (РЭМ, РСМА, аналитик Т.Б. Макеева, ИГиП ДВО РАН).

Происходит срастание наноразмерных золотин в тонкие и затем более крупные зерна благородного металла (процесс укрупнения золота в зоне гипергенеза). Кроме того, одним из основных механизмов укрупнения зерен Au является их цементация пленками ртутной амальгамы, где в единый агрегат «спаяны» мелкие зерна (рис 6). Мелкие золотины покрыты пленкой из глобулярных, гантеле- и нитевидных наноразмерных выделений (рис. 7б, г). Они представляют собой гроздевидные агрегаты более мелких частиц, размер которых часто не превышает 1 мкм (7б), что позволяет предполагать существование еще более мелких частиц свободного золота.

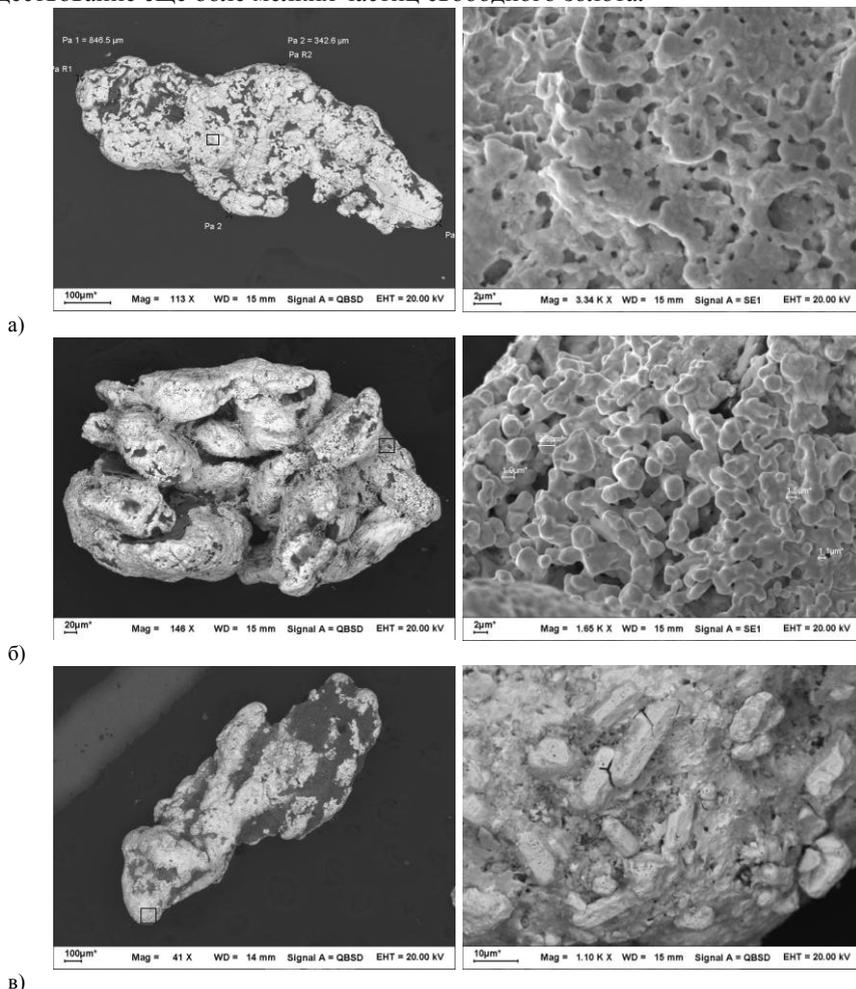


Рис. 7. Золото россыпи руч. Веселый (лев. приток р. Некля). Слева – общий вид зерна, справа – микроструктура его поверхности: а) пористая микроструктура; б) поверхность зерна, состоящая из слившихся глобулярных микрочастиц размером 1,5–2 мкм; в) кристаллы Au в виде шестигранных призм в золотой матрице (РЭМ, аналитик Т.Б.Макеева, ИГиП ДВО РАН).

Микроструктура золотин пористая, глобулярная, иногда кристаллическая (рис. 7а-в), характерная для новообразованного Au (Фрейзе, 1933; Петровская, 1941; Яблокова, 1965; Николаева, 1958). Аутигенное микро- и наноразмерное золото имеет форму шестигранных призм, губчатых и глобулярных выделений, а также волосовидных кристаллов, характеризующихся более высокой пробой (рис. 6а, б - спектр 120; рис. 7). Золото часто амальгамированное, с включениями адуляра, каолинита и сложных интерметаллидов (рис. 6б – спектр 121). Химический состав (%): Au-76,26; Ag-1,61; Cu-0,31; Fe-0,18; Mn-0,011; Cr-0,0054; Zn-0,0018; Ni-0,0017; Co<0,002; Pb<0,001; Cd<0,0002.

Присутствие в составе Au включений адуляра, говорит о том, что часть золота в россыпи поступила из рудных тел месторождений вулканогенного золотосеребряного типа (Моисеенко и др., 2010). Наличие пленок гидроксидов железа и марганца, высокопробные каймы на зернах золота, а также наросты губчатого и кристалломорфного новообразованного золота являются характерными типоморфными признаками золота, прошедшего стадию коры выветривания.

Золото из коры выветривания в большинстве своем относится к мелкому классу, но значительно превосходит по размеру золото из коренных месторождений. В то же время оно гораздо более мелкое по сравнению с золотом из аллювиальных россыпей. В месторождениях коренного золота, при прочих равных условиях, доля наноразмерного золота максимальна в первичных рудах, затем она снижается в зоне окисления, а в россыпях сопоставима или преобладает доля крупного золота (Альбов, 1960; Моисеенко, 1997).

В россыпях под воздействием биохимических процессов происходит высвобождение Au, закапсулированного в других минералах и его переотложение. Часть самородного золота в россыпи сформировалось из мелких (вплоть до наноразмерного уровня) золотин (рис. 7). В зоне гипергенеза золотоносных месторождений происходят как преобразование видимого самородного золота, так и формирование его новообразованных разновидностей. Последние возникают за счет высвобождения тонкодисперсного золота из сульфидов коренных месторождений при их разложении и последующей его агрегации и укрупнения.

3. Экспериментально уточнены параметры разложения минералов-носителей тонкодисперсного и наноразмерного золота, его высвобождения и переотложения. В лабораторном процессе образуются более крупные, чем в природе сростки частиц и самородки сферической и ячеисто-сотовой морфологии. Предложена схема обработки проб для выделения и изучения различных форм золота в минералах россыпей.

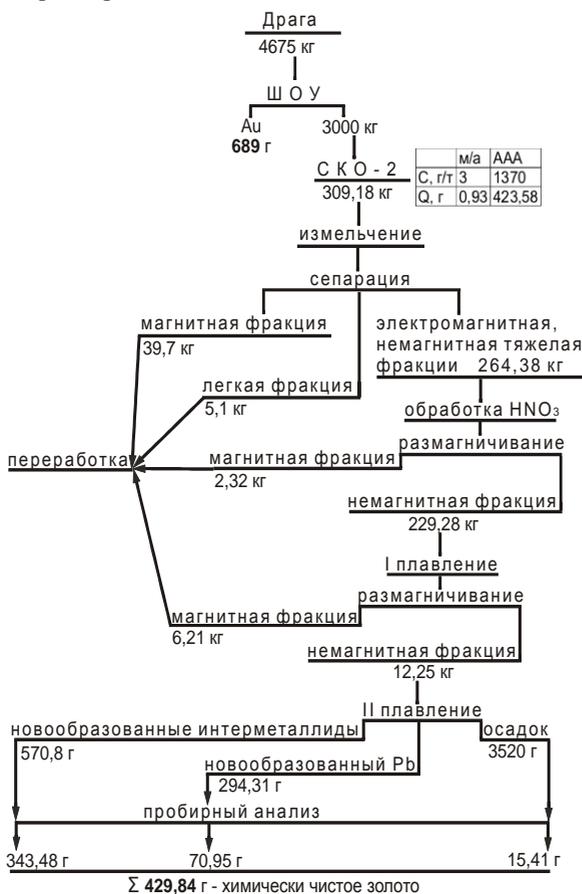
С целью более точного определения содержания золота в минералах россыпей были проведены исследования проб гравитационных концентратов, полученных в результате дражной и гидравлической добычи и содержащие большое количество тяжелых минералов железа и свинца.

При дражной отработке россыпи руч. Веселого НЗУ был получен гравитационный концентрат (съемка), из которого при обогащении на ШОУ извлекли 689 г свободного золота (вес пробы 3 т, среднее содержание Au по

атомно-абсорбционному анализу 32 г/т). Этот «обеззолоченный» промпродукт был дополнительно сконцентрирован нами на СКО-2 до веса 309,18 кг и взят для исследования остаточного Au. Основной минеральный состав пробы – ильменит (30%), циркон (28%), галенит (24%) и монацит (10%). В небольших количествах присутствуют рутил, касситерит, пирит, магнетит, гранат и маргит.

По данным минералогического анализа, среднее содержание в концентрате свободного остаточного золота размерностью более 50 мкм составило 3 г/т. Общее содержание Au в этом материале по данным атомно-абсорбционного анализа – 1370 г/т. Сравнение этих результатов позволяет полагать, что 95% золота в концентрате тонкодисперсное и закапсулировано в золотосодержащих минералах.

Последующее измельчение материала пробы до крупности <0,5 мм позволило высвободить из матрицы золото, находящееся в сростках с минералами, увеличив тем самым содержание в концентрате свободного благородного металла размерностью >50 мкм до 809 г/т.



Далее материал пробы был разделен на фракции магнитной и электромагнитной сепарацией. Из общего концентрата были отделены лёгкая и магнитная фракции с низкой концентрацией золота, весом 44,8 кг. Основное количество золота осталось в электромагнитной и немагнитной тяжёлых фракциях (264,38 кг), которые и легли в основу дальнейших экспериментов.

Для выделения из шлиха связанного золота, была проведена постадийная термохимическая обработка (рис. 8).

Рис. 8. Схема экспериментальных работ (С – содержание Au; Q – запасы; м/а – данные минералогического анализа; AAA – атомно-абсорбционный анализ).

С целью разрушения минералов-концентраторов золота (галенита и пирита) пробу прокипятили с 30%

раствором HNO_3 . В раствор перешло золото, находящееся в ионной форме, содержание его составило 0,02% от общего количества Au в пробе.

Осадок, полученный после кислотной обработки пробы, сплавлялся с едким натром при 450-600° С. Плавень выщелачивали водой. Полученный в результате реакции щелочной раствор содержал ионное золото в количестве 0,054% от его массовой доли в пробе.

Из полученного осадка удаляли магнитную фракцию. Оставшийся концентрат содержал видимое золото размером <1 мм, представляющее собой сростки пластинчатых и игольчатых форм.

Для дальнейшего разложения упорных минералов, полученный после сплавления и выщелачивания остаток подвергали повторной термохимической обработке с добавлением в шихту восстановителя в количестве 10%. В результате всех операций в раствор ушло 97% исходного состава матрицы и произошло концентрирование золота в осадке в 36 раз. Получился богатый концентрат, в котором преобладали сфероидные выделения (рис. 9а) различного состава (от собственно Au до Au-Pb и Pb-Au) и крупные сростки драгметаллов ячеисто-сотового строения (рис. 9б).

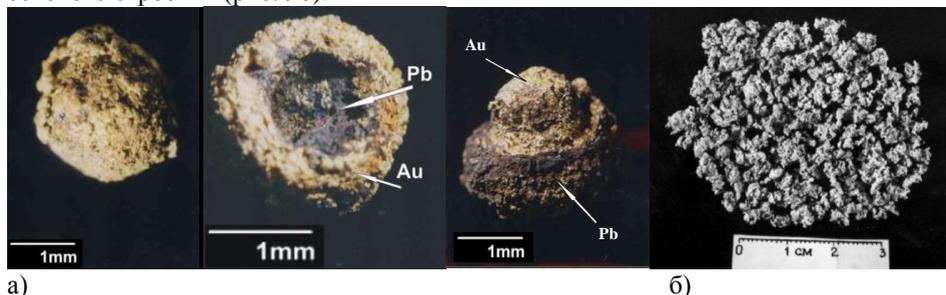


рис. 9. Новообразованные в лабораторных условиях интерметаллиды: а) Au-Pb сплав сфероидной формы; б) интерметаллид ячеисто-сотового строения (23,8 г).

В процессе эксперимента произошло разрушение минералов-концентраторов с высвобождением нано- и микрочастиц золота, серебра и свинца. С энергетической точки зрения побудительной причиной кристаллизации служит стремление системы к уменьшению свободной энергии. В результате в низкотемпературном расплаве частицы металлов агрегируются в тонкие и далее – более крупные, вплоть до самородков, образования интерметаллидов (рис. 9б). В оставшемся после опыта осадке установлено новообразованное, более крупное по размеру по сравнению с данными до опыта, золото, отличающееся по форме и составу (рис. 9). Таким образом, в ходе экспериментов нами установлено высвобождение золота из различных минералов, его укрупнение от наноразмерного до тонкого и крупного, вплоть до образования самородков.

Применение изложенного подхода позволило более точно определить содержание тонкого и наноразмерного золота в гравитационных концентратах и выделить из отходов ШОУ, обогащенных минералами железа и свинца дополнительно 429,84 г химически чистого золота (рис. 8). В исследованном концентрате доля остаточного свободного золота (размерность >50 мкм) составила 0,2%; Au в сростках с другими минералами – 51,48%; ионного золота,



входящего в решетку минералов-концентраторов – 0,074% и 48,25% приходится на долю микрометрового и наноразмерного Au (<50 мкм) закапсулированного в минерал-концентраторах (рис. 10).

Рис. 10. Доизвлеченное в процессе эксперимента золото из гравитационного концентрата, полученного после ШОУ при дражной отработке россыпи руч. Веселый.

Полученные экспериментальные данные позволяют рассчитать соотношение самородного золота по размерности в дражных

концентратах из россыпи руч. Веселый. В результате расчетных данных, при гравитационной отработке россыпи руч. Веселый извлекается концентрат, в котором доля свободного Au размерностью >50 мкм – 59%; золото в сростках с другими минералами 21%; 0,03% Au в ионной форме и 19,97% доля микрометрового и наноразмерного золота (<50 мкм) (рис. 11).



Рис. 11. Содержание различных форм самородного золота в гравитационном концентрате из россыпи руч. Веселый

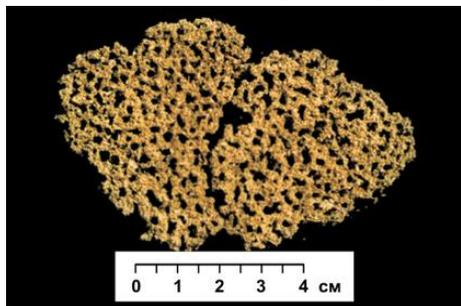
При дражной и гидравлической отработке россыпей золота Нижнеселемджинского узла на сегодняшний день извлекается, в основном, свободное Au класса размерности >50 мкм, составляющее 58,65% от всего золота,

содержащегося в получаемом концентрате. Следовательно, при традиционных методах добычи россыпного золота не извлекается тонкодисперсное и наноразмерное золото, а также золото в сростках с другими минералами.

Полученные результаты по уточнению параметров разрушения минералов-концентраторов золота с высвобождением наночастиц Au и образованием из них более крупных по размеру сростков благородного металла согласуются с серией наших экспериментов на материале Харгинского золотоносного узла (Кузнецова, 2008, 2010). Находившиеся в пробе частицы свободного золота и высвобождавшееся в процессе реакции тонкодисперсное и наноразмерное золото

укрупнялись, с образованием макроформ, размером до 10 см. Полученные сростки благородного металла представляли собой сетку, состоящую из золотых ячеек с многослойной сотовой структурой (рис. 12).

Рис. 12. Полученные в результате эксперимента сростки золота ячеисто-сотовой структуры.



В результате проведенных исследований подобраны физико-химические параметры, позволяющие высвободить и концентрировать благородные металлы из шлихов сложного состава, обогащенных минералами железа и свинца. Показано, что труднообогатимые, традиционно считающиеся бедными, магнитные и немагнитные отходы гравитационной отработки золоторудных и россыпных месторождений, можно эффективно использовать для дополнительного извлечения Au при условии применения принципиально новых технологических и технических решений.

Изложенный подход может быть использован как один из способов пробоподготовки для комплексных концентратов и отвальных продуктов золотодобычи с повышенным содержанием свинец- и железосодержащих минералов, с целью более точного определения в них содержания тонкого и наноразмерного золота. В перспективе он может быть использован при переоценке запасов Au в россыпных (в том числе техногенных) и рудных месторождениях золота. Найденные приемы по определению содержания связанного, тонкодисперсного и наноразмерного золота в минералах и их выделению отработаны на реальных концентратах различного состава и заверены на Красноярском аффинажном заводе.

Заключение

В результате исследований разработана интрузивно-купольная модель строения Нижнеселемджинского золотоносного узла, основные элементы которой песчано-сланцевые толщи, прорванные магматическими образованиями палеозойского и мезозойского возраста. Геолого-структурное моделирование НЗУ позволило определить основные закономерности размещения проявлений рудного золота и россыпей и определить их перспективы. Установлено, что россыпи золота берут начало в центральной части узла, где развиты интрузивные образования, но наиболее богатые из них, а также известные рудопроявления золота приурочены к толще углеродистых и известковистых сланцев среднего- позднего(?) протерозоя. Одним из основных источников золота в образовании россыпей являются отложения золотоносных кор выветривания по осадочным породам, метаморфизованным в фации зеленых сланцев. Поиски месторождений золота следует проводить в периферической части узла, где сохранились позднепротерозойские сланцы, а также структуры экранирования, благоприятные для локализации оруденения.

Показано, что основу минерального состава гравитационных концентратов из россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла составляют минералы железа. Самородное золото россыпей высокопробное (810 – 910‰), различных форм, размеров (от наноразмерного до самородков) и генезиса. Оно встречается в свободном состоянии, в сростках с другими минералами и закапсулировано в минералах-концентраторах. Значительное

количество тонкодисперсного и наноразмерного золота находится в железо- и свинецсодержащих минералах россыпей. Наряду с традиционными минералами-концентраторами золота выявлены необычные минералы, содержащие благородный металл наноразмерного уровня: монацит, рутил и галенит. Установлено, что в процессе гипергенеза в россыпях происходит разрушение золотосодержащих минералов с высвобождением тонкодисперсного и наноразмерного золота, его переотложение и агрегирование. Характерными типоморфными особенностями золота, прошедшего стадию коры выветривания, являются наличие наростов губчатого, глобулярного и кристалломорфного аутигенного золота и пленок гидроксидов железа и марганца.

Проведенные эксперименты по выявлению тонкодисперсного и наноразмерного золота в шлиховых концентратах и минералах россыпей позволили смоделировать процессы разрушения золотосодержащих минералов с высвобождением наночастиц золота и серебра, а также образованием новых, более крупных по размеру сростков интерметаллидов благородных металлов сфероидальной и ячеисто-сотовой структуры.

Установлено, что при гравитационной отработке россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла в тяжелой фракции шлиха доля наноразмерного, закапсулированного в минералах-концентраторах золота (<50 мкм) и Au находящегося в сростках с другими минералами в сумме составляет 41% от общего его содержания. Предложена схема обработки гравитационных концентратов, которая позволяет более достоверно определять в пробах общее содержание золота, соотношение различных форм его нахождения в материале и способствует увеличению извлечения благородного металла.

Список наиболее значимых публикаций по теме диссертации:

1. Моисеенко В. Г., **Кузнецова И. В.** Роль наночастиц золота, серебра и свинца в образовании месторождений благородных металлов // ДАН, 2010. – Т. 430. – № 3. – С. 377-381.
2. Пискунов Ю.Г., **Кузнецова И.В.**, Борисова И.Г., Коваль А.Т. Экологические проблемы золотодобычи на примере Амурской области // Экология и промышленность России, 2008. – № 1. – С. 29-32.
3. **Кузнецова И.В.**, Моисеенко В. Г. Поведение золота и свинца в зоне гипергенеза // Руды и металлы, 2011. – № 2. – С. 24-27.
4. **Кузнецова И.В.** Извлечение золота из золотосодержащих электромагнитных концентратов россыпей // Будущее амурской науки: труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Благовещенск: АмурНЦ, 2002. – С. 77-78.
5. **Кузнецова И.В.** Геоэкологические особенности разработки россыпей Нижне-Селемджинского золотоносного узла (Амурская область) // Проблемы

экологии и рационального использования природных ресурсов в Дальневосточном регионе: мат-лы региональной научно-практической конференции. – Благовещенск, 2004. – С. 96-100.

6. **Кузнецова И.В.**, Веселова М.С. Пирогидрометаллургическое извлечение золота из касситеритсодержащих шлихов // Сборник научных трудов международной конференции «Современные технологии освоения минеральных ресурсов». – Красноярск: ГУЦМ, 2004. – вып. 2. – С. 344-348.

7. **Кузнецова И.В.** Минералогические особенности некоторых россыпей Нижнеселемджинского золотоносного узла (Амурская область) // Мат-лы региональной конференции «Геология, минералогия и геохимия месторождений благородных металлов Востока России. Новые технологии переработки благороднометалльного сырья». – Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2005. – С. 163-165.

8. Моисеенко В.Г., **Кузнецова И.В.**, Пискунов Ю.Г., Кулик Е.Н. Освоение методов образования макросистем золота из его микро и наночастиц – путь к созданию технологий максимального извлечения золота из упорных руд и концентратов // II Международная конференция «Стратегии развития минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». – Москва: Изд. РУДН, 2006. – С. 292-294.

9. Моисеенко В.Г., Пискунов Ю.Г., Моисеенко Н.В., Тертышный И.Г., **Кузнецова И.В.**, Кулик Е.Н. Микроскопические частицы благородных металлов в упорных рудах и методы их извлечения // Мат-лы международного экологического форума "Природа без границ". – Владивосток: Изд-во админ. Приморского края, 2007. – С. 148-151

10. **Кузнецова И.В.** Влияние количества золота в руде на скорость концентрации драгоценного металла (по экспериментальным данным) // Труды Симпозиума «Наногеохимия золота». – Владивосток: Дальнаука, 2008. – С. 79-82.

11. **Кузнецова И.В.** Влияние свинца на образование самородного золота (по геологическим и экспериментальным данным) // Мат-лы всероссийской конференции посв. 100-летию Н.В. Петровской «Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований». – М.: ИГЕМ РАН, 2010. – С. 304-306.

11. **Кузнецова И.В.** Особенности состава техногенных россыпей золота Амурской области // Мат-лы всероссийской конференции «Проблемы безопасности жизнедеятельности в техносфере». – Благовещенск: АмГУ, 2010. – С. 67-70.

13. **Кузнецова И.В.** Золото в минералах с высоким содержанием железа // Мат-лы всероссийской научно-практической конференции «Новые и нетрадиционные типы месторождений полезных ископаемых Прибайкалья и Забайкалья». – Улан-Удэ: ЭКОС, 2010. – С.111-113.

Подписано в печать 11.04.2011
Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 1,4
Тираж 100 экз. Заказ № 2375
Отпечатано:

Полиграфический участок ИП Сажина А.А.
675016, г. Благовещенск, ул. Калинина 127, к. 45, тел. 8(4162)492-535