

Приоритетное направление **7.5. ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ; НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ.**

Программа **7.5.2. РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И МЕТАЛЛОГЕНИЯ КРУПНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПРОВИНЦИЙ**

Проект **7.5.2.2. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В СТРУКТУРАХ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ, ЕЕ ОБРАМЛЕНИЯ И ОХОТСКО-ЧУКОТСКОГО ВУЛКАНОГЕННОГО ПОЯСА ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ, НАНОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИМ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ** (научные руководители проекта д.г.-м.н. А.М. Спиридонов, д.х.н. В.Л. Таусон)

Блок 1. Изучить геохимическую специализацию магматических комплексов и рудную минерализацию складчатых структур Восточного Забайкалья, Восточной и Центральной Монголии, Приамурья и Северного Приохотья

• Проведенные Институтом геохимии СО РАН (А.М. Спиридонов) в 2003-2007 годах поисково-ревизионные работы в Монголии на площади Их Хайрханской депрессии (Рис. 16), расположенной на юго-западе предхэнтэйского прогиба, позволили выявить здесь крупную Их Салинскую Au-содержащую Cu-Mo-порфировую систему, включающую четыре проявления рудной минерализации: Batyn Shand, Bargilt Khairhan, Ikh Salaa и Bayan Khushun, и два эпитермальных Au-Ag проявления: Altan ovoo и Khalzar Undur. Наиболее полно в настоящее время исследовано проявление Их Салаа (Рис. 16).

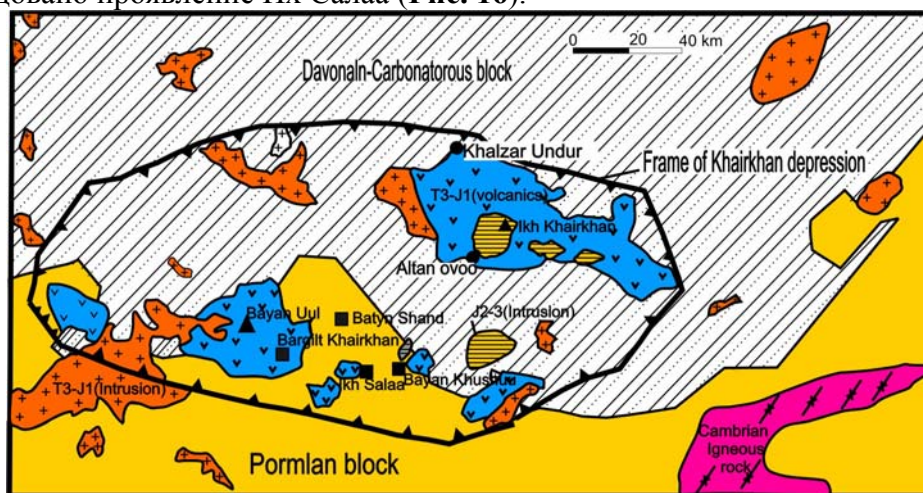


Рис.16.

- В геологическом строении площади исследований принимают участие пермские (P_1), черные углистыми алевролиты, кварц-полевошпатовые, реже полимиктовые алевропесчаники и песчаники, слагающие возвышенности, окаймляющие депрессию, заполненную вулканитами двух вулканических циклов триаса («рыжими» и «серыми») андезито-базальтами и андезитами).
- В вулканических образованиях откартировано тело эксплозивных брекчий (жерловая фа́ция), фиксирующих осевую часть палеовулканического аппарата. В составе брекчий преобладают обломки «рыжих» вулканитов, сцементированных «серыми» порфировыми андезито-базальтами.
- В восточной и северо-восточной частях площади Их Салаа картируются крупные массивы гранитоидов бороундурского комплекса, представленного гранитами, гранодиоритами и лейкократовыми гранитами. Возраст этих образований определен, по данным Rb/Sr отношения, как P_2 (Рис. 17). В центральной и западной частях площади исследований отмечаются малые (штоки, силлы, дайки) субвулканические интрузии диоритовых порфиров, гранодиорит-порфиров, гранит-порфиров, кварцевых порфиров и кварцевых сиенит-порфиров, предполо-

жительно шарахандинского комплекса, возраст которых по данным Rb/Sr отношения определен как T₃-J₁.

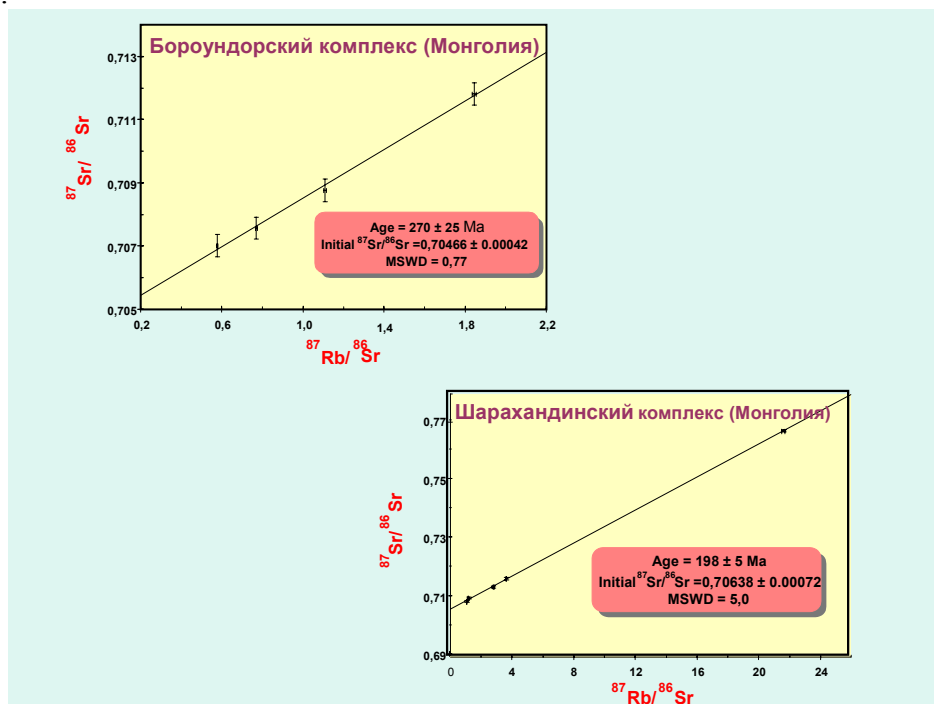


Рис.17.

- В центральной части проявления Их Салаа установлены мощные (от 1-2 м до 350-400 м) зоны катаклаза и окварцевания (гидротермальная брекчия), имеющие северо-западное и юго-восточное простирание. Проявление здесь гидротермально-метасоматических процессов (турмалинизации, окварцевания и сульфидизации) свидетельствует об их синрудном характере и позволяет отнести их в разряд перспективных на предмет выявления промышленной минерализации меди, золота и серебра.
- Наиболее широко в пределах участка проявлены процессы пропилитизации и аргиллизации, занимающие большую часть площади исследований. Среди пропилитов выделяются образования эпидот-актинолитовой, эпидот-хлоритовой и низкотемпературной альбит-карбонат-хлоритовой фаций. Пропилиты образовались на магматическом этапе формирования рудно-магматической системы (РМС), под воздействием термо-флюидного потока интрузирующей магмы, производными которой являются субвулканические тела гранодиорит и гранит-порфиров шарахандинского комплекса. Аргиллизиты и кварц-серицитовые метасоматиты фиксируют рудный этап развития РМС. При этом аргиллизиты наиболее проявлены на фланговых частях рудных зон, а кварц-серицитовые метасоматиты тяготеют к их центральной части.
- Рудная продуктивность связывается с зонами брекчирования, окварцевания, интенсивной лимонитизации (железными шляпами), прожилково-вкрапленной, жильной кварц-турмалин-сульфидной и полисульфидной минерализацией. Из рудных минералов основное развитие получили пирит, халькопирит, молибденит, галенит, сфалерит, энаргит и продукты их изменения в зоне гипергенеза. Золото в самородном виде встречается фрагментарно, хотя аномальные его концентрации фиксируются повсеместно. Гидротермальные изменения вмещающих пород и рудная минерализация, как правило, сопровождаются контрастными геохимическими аномалиями Cu (до 1000 ppm), Mo (до 150 ppm), Au (от 0,1 до 12 г/т), Ag, As, Pb, Zn и Bi.
- Продолжены исследования (Л.Д. Зорина) в обоснование высказанного ранее мнения (работы 2000-2006 г.г.) о принадлежности месторождений Дарасунской рудно-магматической системы (Восточное Забайкалье) к золото-медно-порфировому типу.
- С использованием тонких минералогических и геохимических методов получены новые данные об особенностях оруденения Талатуйского месторождения (Геология рудных место-

рождений, 2007, т. 49, № 1, с. 37-76; Материалы конференции – см. список публикаций) и вкрапленных руд в эксплозивных брекчиях Дарасунского месторождения, подтверждающие, что Талатуйское и Дарасунское месторождения формируются по порфировому типу. Вкрапленные золото-медно-порфиновые руды классифицируются как новый тип промышленного оруденения Дарасунского золоторудного района.

- Детально изучены геологические, минералогические и геохимические особенности метасоматитов Карийского рудного узла в Восточном Забайкалье (Геология и геофизика, 2007, т. 48, № 11, с. 1158-1169): предрудных пропилитов и синрудных метасоматитов, связанных с разными стадиями минерализации. Выявлена тенденция увеличения содержаний золота с возрастом роли калия.
- Продолжено изучение (Р.Г.Кравцова) рудных объектов Северного Приохотья (Au-Ag месторождения Дукат, Дальнее, Кварцевая Сопка, Ирбычан, Карамкен, Ag-Pb – Мечта, Тидит и Гольцовое, Sn-Ag – Мало-Кенское, Ново-Джагынское). В структурном отношении они приурочены к центральной части Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Покровское рудное поле и одноименное месторождение «Приамурье» расположено на западном фланге позднемезозойского Умлекано-Огоджинского вулканно-плутонического пояса.
- Первое сравнение гипергенных рудных минералов и серебросодержащих образований литохимических потоков рассеяния Дукатского Au-Ag месторождения, установленных с помощью метода РСМА, с составом первичных руд этого месторождения дали положительный результат. Установлено, что минеральный и элементный состав серебросодержащих образцов, отобранных из рыхлых отложений водотоков, дренирующих месторождение, в достаточной степени идентифицируются с первичными рудами. В рыхлых отложениях литохимических потоков рассеяния различаются участки (образования) с хорошо сохранившимися, близкими к первичным, рудными минералами, такими, как сульфиды и сульфосоли Ag (аргентит, акантит, штернбергит, пираргирит), самородное Ag, электрум, галенит, сфалерит, пирит, халькопирит, магнетит (Рис. 18, 19).

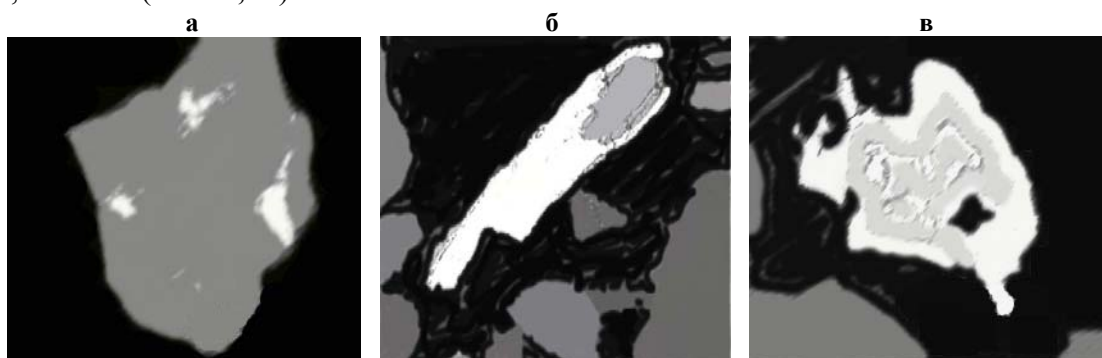


Рис. 18 Включения аргентита (белое) в зерне (серое) магнетита (а, увеличение 780). Аргентит (белое) с включением пирита (серое) – (б, увеличение 480). Срастание сульфидов серебра (белое) – аргентита и не установленного минерала с пиритом (серое) – (в, увеличение 940). Изображение дано в обратно рассеянных электронах.

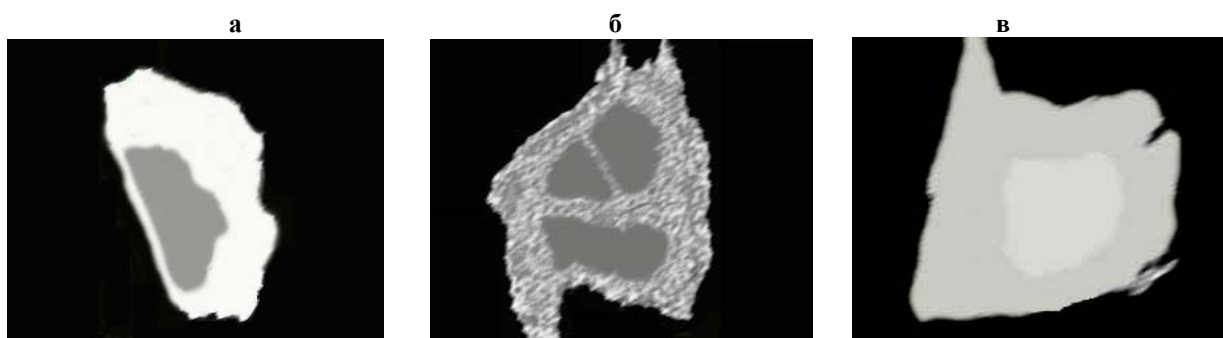


Рис. 19. Включение сфалерита (серое) в аргентите (белое) – (а, увеличение 1200). Халькопирит (серое) в оторочке каплевидных зерен штернбергита и самородного Ag (б, увеличение 1000). Срастание пираргирита (светло-серое в центре) и аргентита (серое) – (в, увеличение 2200). Изображение дано в обратно рассеянных электронах.

- Установленные формы нахождения Ag в рыхлых отложениях являются эффективным критерием оценки перспектив геохимических аномалий, выявленных по потокам рассеяния. Этот критерий мо-

жет успешно применяться на всех стадиях изучения сереброносных площадей, начиная с прогнозной оценки перспектив выявленных по литохимическим потокам рассеяния аномалий на слабо изученных территориях, до детальных работ на уже известных рудных объектах [Рогозина Ю.И., Кравцова Р.Г., 2007]

Блок 2. Металлогения углеродистых формаций южного обрамления Сибирской платформы. Физико-химическое моделирование гидротермальных золотоносных сульфидно-арсенидных систем золото-кварцевой рудной формации и комплексных золоторудных месторождений, связанных с черносланцевыми толщами (к.г.-м.н. В.К. Немеров)

- Осадочные палеобассейны позднего докембрия, широко развитые на южной окраине Сибирского кратона (ЮОСК), вмещают известные, экономически важные стратиформные месторождения Au, Pb, Zn, а также многочисленные проявления этих и других полезных ископаемых (Ag, P, Mn и др.). Характерно, что подавляющее большинство указанных месторождений и проявлений тяготеет к единому стратиграфическому уровню, располагаясь в разных фациальных зонах осадконакопления и регионального метаморфизма (Рис.20).

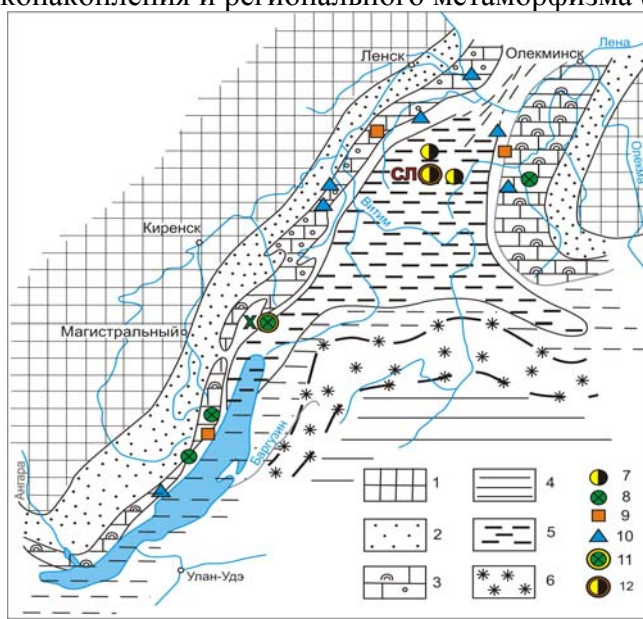


Рис. 20. Палеогеографическая схема позднерифейского этапа развития Байкало-Патомского неопротерозойского бассейна седиментации и расположение проявлений и месторождений основных полезных ископаемых, приуроченных к отложениям этого этапа

1-Сибирский кратон (суша), 2-прибрежные терригенные красноцветные отложения, 3-хемобиогенные карбонатные отложения шельфа, 4-углеродсодержащие терригенные отложения глубокого шельфа и материкового склона., 5-углеродсодержащие глубоководные, турбидитные осадки склона и котловины задугового бассейна, 6-вулканогенные и вулканогенно-осадочные толщи островодужных фаций; 7-10 – месторождения и рудопроявления: 7 – золота, 8 – полиметаллов, 9 – марганца, 10 – фосфора. 11, 12 - крупные и уникальные месторождения: X – Холоднинское; СЛ – Сухой Лог.

- Результаты региональных работ биостратиграфических, геохимических (Немеров, 1988; Немеров, Станевич, 1993 и др.) и радиоизотопных исследований (Неймарк и др., 1991; Рыцк и др., 2001) убедительно показали, что разнообразные рудовмещающие комплексы пород формировались в довольно узком интервале позднего рифея. Продуктивные образования залегают в породах дальнетайгинского и жуинского региональных горизонтов (хомолхинская, аунакитская, валюхтинская – каланчевская, сеньская, улунтуйская, ондокская и др. свиты, келянская толща), которые, вероятнее всего, образовались во второй половине позднего рифея. Мощность этих образований не превышает 3 км, в то время, как суммарная мощность рифей-вендских толщ в регионе достигает 15 км. Это время в истории развития ЮОСК характеризовалось специфическим сочетанием геодинамических и палеогеографических обстановок седиментогенеза, определивших в дальнейшем металлогенический потенциал отложений.
- Осадки палеобассейнов дальнетайгинского и жуинского времени выделяются в разрезе

рифей-вендских толщ ЮОСК повышенной общей «меланократовостью» пород и халько-сидерофильной геохимической специализацией (рис. 21, 22).

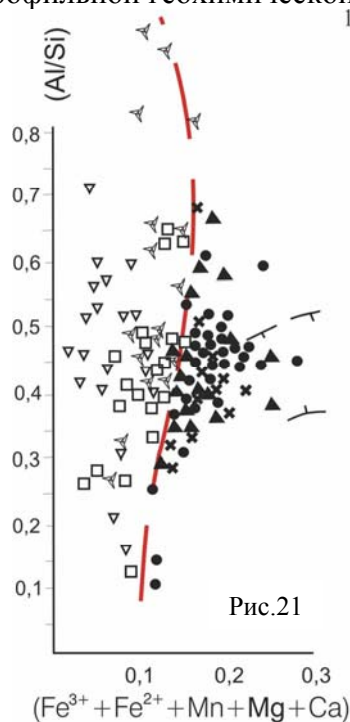


Рис.21

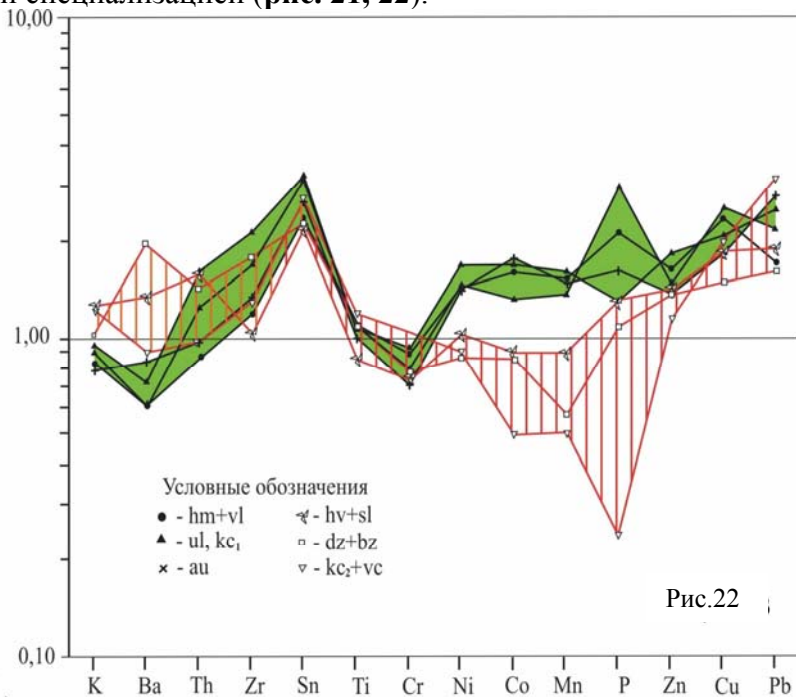


Рис.22

Рис. 21. Петрохимическая характеристика углеродистых отложений Байкало-Патомского бассейна на классификационной сетке А.Н. Неелова.

Фигуративные точки черного цвета - характеризуют металлоносные отложения; фигуративные точки белого цвета - типичны для толщ, не несущих оруденения;

Обозначения стратиграфических подразделений на рис. 20.

Рис.22. Распределение петрогенных и редких элементов в углеродистых алевропелитах Байкало-Патомского бассейна.

Содержания элементов нормированы по стандартному образцу черных сланцев SCHS-1 [Petrov et.al., 04].

1-спектр, характеризующий металлоносные отложения; 2-спектр типичный для толщ не несущих оруденения;

hm + vl - хомолхинская + валюхтинская свиты; ul - улунтуйская свита, kc₁ - нижняя подсвита качергатской свиты; au - аунакитская свита; hv + sl - хайвергинская и слюдянкинская свиты; dz + bz джемкуканская и бужуихтинская свиты; vc + kc₂ - вачская и верхняя подсвита качергатской свит.

- При литолого-геохимическом анализе фациальных рядов реконструируется последовательный ряд обстановок осадконакопления, соответствующих задуговому бассейну, а южнее – островодужной системе. Изменения условий седиментации вкрест простирания палеобассейна наиболее отчетливо прослеживаются по разрезам верхней половины дальнетайгинского горизонта. На севере, в Прибайкальской и Приленской шельфовых зонах распространены отложения прибрежных фаций, которые по латерали сменяются фациями биохемогенного карбоната накопления (улунтуйская, каланчевская-валюхтинская, сеньская и др. свиты). К зонам фациальных переходов приурочены известные в регионе фосфатопоявления (Сарминская, Малочуйская, Уринская, Причарская фосфатоносные площади) и повышенные содержания Mn и Fe. Далее к югу, в зонах развития органогенных (строматолитовых и микрофитолитовых) карбонатных пород (Синчук, Кичко, 1981), в сочетании с проявлениями активной, синхронной осадконакоплению, эксгальвативной деятельностью широко развиты проявления свинца и цинка (Ульканская, Нижневитимская, Жуя-Ничатская, Олоkitская, Намаминская и другие рудоперспективные площади). Южнее, в обстановке дистального шельфа и его бровки накапливались слабоуглеродистые песчано-алевропелитовые осадки с конкрециями фосфоритов и высокими содержаниями марганца (валюхтинская и др. свиты). В Бодайбинской зоне в условиях материкового склона и его подножия формировались турбидитные углеродистые отложения (хомолхинская, аунакитская свиты). Здесь в алевропелитах установлены самые высокие по профилю (шельф – склон – подножие склона) концентрации C_{орг}, S и содержания Au, Ag, Cu, Co, Ni, Pb, Zn, Mn. Общая «меланократовость» и существенное увеличение значений эксгальвативного модуля (Mn-Zn-Pb/Ti) определяют особенности геохимической специализации осад-

ков, которая объясняется влиянием синхронных гидротерм, а также поступлением эксплозивного материала с юга. Концентрации элементов в осадках с повышенным содержанием органических веществ связываются с жизнедеятельностью анаэробных бактериоценозов, остатки которых в ряде случаев являются породообразующими. Большинство золоторудных объектов (более 90%) приурочены к первично специализированным отложениям хомолхинской и аунакитской свит (Сухой Лог, Высочайший, Верный и др.)

- В более южной, Байкало-Муйской зоне, особенности седиментогенеза этого времени отражены в фрагментах осадочно-вулканогенных разрезов, включающих продукты островного вулканизма (часть келянской толщи, ондокская, джалагунская и др. свиты). Наряду с базальтами, развитие получают эффузивы и субвулканические образования андезит-дацитового ряда. Их эксплозивная часть, видимо, и оказывала влияние на геохимические особенности амгаматичных отложений Бодайбинской, Приленской и Прибайкальской зон (Немеров, 1988; Немеров, Станевич, 2001). Отчетливыми показателями участия гидротермальных эксгаляций в формировании месторождений и рудопроявлений является увеличенные в 3–5 раз значения эксгалятивного модуля в отложениях ондокской свиты, даже далеко за пределами Холоднинского рудного поля.

- Из вышеизложенного следует, что основные рудовмещающие отложения позднего рифея на ЮОСК образовались в период вулканической и подводно-гидротермальной деятельности в условиях задугового бассейна. Седиментогенное накопление продуктов вулканической и гидротермальной активности являлось первым этапом формирования месторождений и рудопроявлений. При дальнейшей эволюции территории произошла постседиментационная трансформация специализированных толщ с перераспределением (рассеиванием либо локализацией) полезных компонентов.

- Тектоно-магматическая активность, происшедшая на ЮОСК в среднем-позднем палеозое в интервале 350-312 (± 20) млн. лет (Рундквист и др., 1992), была вызвана коллизионными процессами, скорее всего, при смыкании Сибирского и Китайского кратонов. По другой версии (Кузьмин и др., 2006) эта активность была обусловлена воздействием мантийного плюма на континентальную литосферу, и как следствие, образованием Ангаро-Витимского батолита. В результате, этот этап ознаменовался палингенно-анатектическим гранитообразованием, зональным метаморфизмом, интенсивным складкообразованием, оживлением глубинных разломов фундамента и формированием прожилкового и прожилково-вкрапленного золотого оруденения в черных сланцах позднего рифея.

Блок 3. Изучение распределения мышьяка, элемента-индикатора рудных концентраций золота в объемах зон минерализованных пород на месторождениях Бодайбинского рудного узла.

- Геохимическая ассоциация золота и мышьяка, типичная для многих золоторудных месторождений и определенно связанная с их совместным переносом в гидротермальных растворах, сохраняется при гипергенезе во вторичных ореолах рассеяния. Однако в зоне окисления рудных объектов по причине существенного различия химических свойств элементов концентрационные зависимости между ними изменяются, и возникают дифференцированные пути их миграции в отложениях перекрывающего рыхлого чехла. Но распределение мышьяка тесно связано с разрушающимися рудными телами вследствие образования как твердых, так и растворимых соединений его, появляющихся на основе As (III), As (V) и сорбционных взаимодействий. И поскольку образуются совмещенные или сближенные вторичные литохимические ореолы рассеяния As и Au, достаточно отчетлива проблема изучения поведения As в рыхлых отложениях рудных районов, расположенных в ландшафтно-климатической обстановке сибирского Севера и соответствующих физико-химических условиях. Эта проблема имеет прямое отношение к разработке эффективных поисковых методик для прогнозной оценки рудных зон. Как главные факторы, инициирующие миграцию мышьяка, на первый план выходят сернокислотное разложение сульфидов-концентраторов и образование его подвижных форм в растворе анионов-арсенитов и арсенатов. Но масштаб переноса элемента существенно огра-

ничивается сорбционными барьерами, среди которых наиболее эффективен железогидроокисный. Возможно, не менее значимы его аналоги – алюмогидроокисный, кремневых гелей и карбонатный барьеры. Дальнейшая подвижность As в зоне окисления определяется соотношением его растворенных и сорбированных форм, процессами сорбции-десорбции. И здесь особое значение приобретает фактор pH. Таким образом, в зоне окисления сочетаются низкие растворимости мышьяка с его адсорбцией на продуктах выветривания рудных минералов. Эти два обстоятельства не способствуют высокой подвижности элемента, имеющей аналитическое выражение через малый коэффициент геохимического рассеяния. Мышьяку свойственно осаждение на местных как сорбционных, так и комбинированных геохимических барьерах физико-химического и биогенного происхождения при коэффициенте биологического поглощения, сопоставимом с его изовалентными аналогами – железом и алюминием. Ограничения подвижности As при нивально-бореальных условиях развития зоны окисления на золоторудных месторождениях Бодайбинского района способствуют образованию его мало перемещенных, «закрепленных» вторичных ореолов рассеяния. Ореолы As проецируют выходы рудных тел, в том числе и с тонкодисперсным золотом, на современной поверхности, являясь их надежными поисковыми признаками.

Блок 4. Геохимическая типизация ультрамафитов и мафитов из архейских террейнов Саянской металлогенической провинции.

- Изучался (*О.М. Глазунов*) идарский комплекс гипербазитов в Кингашском рудном поле. Он отличается, кроме повышенного уровня Cr и Pt, а также соотношения Mg/Fe, близостью с гипербазитами офиолитовой формации. С кингашским рудоносным комплексом его сближает повышенное содержание никеля и приуроченность к тем же тектоническим структурам, что видно на примере Кингашско-Борыньского линейного ареала массивов. Это обстоятельство позволяет предполагать возможную комагматичность гипербазитов кингашского и идарского комплексов и, таким образом, распространять прогнозы по никелю на поля гипербазитов, развитых среди гнейсов архея в истоках р. Кунгус.
- Для Кингашского месторождения составлена новая геолого-технологическая карта, где выделены следующие промышленные типы руд: пентландит-халькопирит-пирротиновые, халькопирит-пирротиновые, валлериит-халькопирит-пентландит-пирротиновые, пентландит-пирротиновые. На месторождении Верхний Кингаш отмечено локальное преобладание пирротин-халькопирит-пентландитовых руд, менее выдержанных на глубину по сравнению с Кингашским месторождением, где основные продуктивные «горизонты» находятся в придонной части массива.
- На Верхне-Кингашском месторождении отмечена также наиболее чёткая тенденция преобладания Pd над Pt при некотором смещении пиковых содержаний, что согласуется с широким размахом здесь метасоматических процессов и мигматизации.
- На Кингашском месторождении обнаружено, что собственно магматическая стадия, включая ликвацию, развивается при участии пентландита, низконикелистого пирротина и высоконикелистого халькопирита. Гидротермальные процессы характеризуются сбросом минералов ряда Со-пентландит– валлериит-маккинавит-кубанит- и др. Они завершились отложением самородного золота, насыщенного серебром и ртутью. Висмутотеллуриды палладия фиксируют раннемагматическую стадию, тогда как для гидротермальной стадии не исключается кристаллизация паоловита (Pd_2Sn) и сперрилита ($Pt(As_2)$). Установлен также большой разброс в температурах образования сульфидов. Для раннемагматических пентландита и пирротина расчётами допускается температура образования в интервале 600-700° С.
- Важным достижением работы 2007 года является открытие в рудах Кингашского месторождения ряда новых соединений висмута-теллуридов. К известным самородным платиноидам (котульскит, соболевскит, мончеит, фрудит и др.) добавились минералы, отдалённо приближающиеся по составу к таковым ряда меренскиит-мелонит. Обнаруженное соединение характеризуется особенно высоким содержанием Те (63-65 %), Ni (до 17 %) и недосыщенностью Pd (12 %), дефицитом Bi (3-4 %) при низкой концентрации Pt. Находки подобных соединений

в густовкрапленных рудах нижнего платиноидного «риффа» Кингаша, наряду с другими признаками говорят об их магматической природе.

- В майченерите по мере перехода от вкрапленных ликвационных руд к брекчиево-жилыным, при снижении концентрации платины с 9.8 % до следов, поднимается уровень палладия с 18 до 24 %, осмия с 0.05 до 0.23 %, теллура с 23 до 29 %. Обращает на себя внимание обедненность никелем и сурьмой почти всех минералов группы платины (соболевскит, котульскит, мончеит и др.).
- Изучение руд так же показывает, что некоторые сульфиды принимают на себя часть рассеянных Pd и Pt (до 10 %). Форма их вхождения выясняется с помощью новых физических методов и усовершенствования уже известных.
- В области расшифровки глубинного строения получены с помощью «ОАО Норильского никеля» данные по гравиметрической и магнитной картине всего рудного поля.
- При изучении Кингашских месторождений долгое время оставался вопрос о комагматичности габбро и гипербазитов. Наряду с минералого-петрографическими данными изотопные метки Sr и Nd подтверждают единство габбро с гипербазитами. Более того, они показывают на близость источника кингашских габбро и долеритов Норильских месторождений. Не случайно сейчас обнаружился заметный вклад габбро в общие запасы месторождений по Ni, Co, V, Cu и ЭПГ.
- Кингашские месторождения в настоящее время входят в число крупных по запасам Ni, Co и ЭПГ. Они приобретены «Норильским никелем», который готовит базу для их доразведки и строительства модульной обогатительной фабрики.
- В ультрабазитах Барбитайского рудного узла изучены минералы сульфидных руд в ряде блоков, различающихся петрографическим составом пород, степенью вторичных преобразований и расположенных в полях максимального насыщения структуры ультраосновными породами. Массив Желос сложен серией пород, меняющих свой состав от лерцолитов до оливинных пироксенитов. В них хорошо сохранились первичные пироксены и оливины с включениями хромшпинелида. Ультраосновные породы массива Токты-Ой представлены в различной степени измененными дунитами и перидотитами. Породы подвержены низкотемпературным метаморфическим процессам – серпентинизации и оталькованию, вплоть до превращения их в аподунитовые и апоперидотитовые серпентиниты и амфибол-серпентиновые сланцы. Массив Правохайломинский сложен слабоизмененными дунитами и лерцолитами. Во всех массивах присутствуют вкрапленные сульфидные руды, в массивах Токты-Ой и Желос также густовкрапленные и в последнем – сидеронитовые.
- Вкрапленные сульфидные руды во всех массивах представлены агрегатами пирротина, пентландита и халькопирита, которые находятся в различном объемном соотношении. В массиве Токты-Ой преобладает пентландит, в массиве Желос пирротин и пентландит находятся в равных соотношениях при подчиненном количестве халькопирита. Первичные рудные минералы подвержены вторичным изменениям и в различной степени замещаются виоларитом, макиновитом и пиритом.

Блок 5. Физико-химическое изучение особенностей процессов рудообразования методом минимизации термодинамического потенциала Коржинского с учетом свойств ультрадисперсных и наночастиц порообразующих и рудных минералов

- На основе двойственного решения обратной задачи термодинамического моделирования предложен новый подход к оценке окислительного потенциала флюида и минеральных ассоциаций. Произведена оценка потенциала кислорода в различных минеральных ассоциациях метаморфических пород Охотского, Чогарского комплексов и Ларбинской глыбы, метаморфизованных в условиях гранулитовой фации, независимо от того, присутствует ли в них магнетит, ильменит или графит. Установлено, что безмагнетитовые минеральные ассоциации отличаются высокой восстановленностью, отвечающей по величине потенциала кислорода примерно буферу ССО. Вероятно, что «внешний» метаморфогенный флюид, при котором осуще-

ствлялся метаморфизм гранулитовой фации, формировался в поле устойчивости графита. Результаты моделирования показывают, что все парагенезисы метapelитовых пород, не содержащие магнетит, являются значительно восстановленными, а на диаграмме $\log f_{O_2} - 10^4/T^0K$ они находятся ниже буфера кварц-фаялит-магнетит, вблизи буфера ССО, более окислены метабазальтовые ассоциации, содержащие роговую обманку (рис. 23).

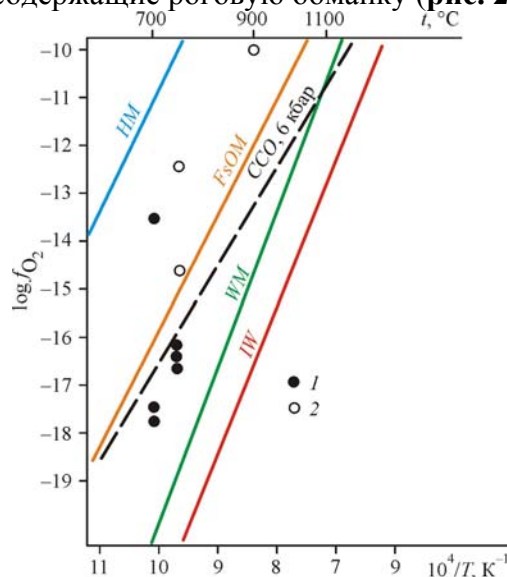


Рис. 23. Положение минеральных ассоциаций метapelитовых (1) и метабазитовых (2) пород на диаграмме $\log f_{O_2} - 10^4/T^0K$. Буферные равновесия: гематит-магнетит (HM), ферросилит-кварц-магнетит (FsQM), графит-окись углерода (ССО), вюстит-магнетит (WM), иоцит-магнетит (IM).

- Результаты расчета модели “водный раствор электролита – минеральный парагенезис” свидетельствуют о высокой растворимости SiO_2 в метаморфогенном флюиде, которая является доказательством того, что процесс гранулитового метаморфизма может быть мощным геохимическим фактором перераспределения и переноса кремнезема из нижних горизонтов коры в верхние.
- Теоретически обоснован и практически реализован метод термодинамического моделирования открытых систем на основе минимизации изобарно-изотермического потенциала Коржинского, реализующий фундаментальное понятие дифференциальной подвижности компонентов. Расширение используемых факторов состояния за счет химических потенциалов вполне подвижных компонентов позволяет в полной мере, не выходя за рамки равновесной химической термодинамики, учитывать влияние внешних силовых полей, отвечающих за перераспределение вещества в открытой системе. На **Рис. 24** представлена модель формирования метасоматической зональности в результате кислотного выщелачивания гранат-биотит-силлиманитового гнейса, приводящего к образованию фибролитовых кварцитов. Задание ряда дифференциальной подвижности компонентов произведено на основе экспериментальных наблюдений процесса высокотемпературного кислотного метасоматоза (Зарайский, 1989): $K, (Fe, Mg), (Na, Ca) | Si, Al, Ti$. Исходный состав смоделированного гнейса соответствует реально наблюдаемому составу минералов в минеральном парагенезисе образца породы гранулитовой фации: Гр+Пл+Би+Сил+Кв при $P = 6800$ бар, $T = 700^\circ C$ и инертном поведении всех компонентов системы (**Рис. 24**, зона 1).

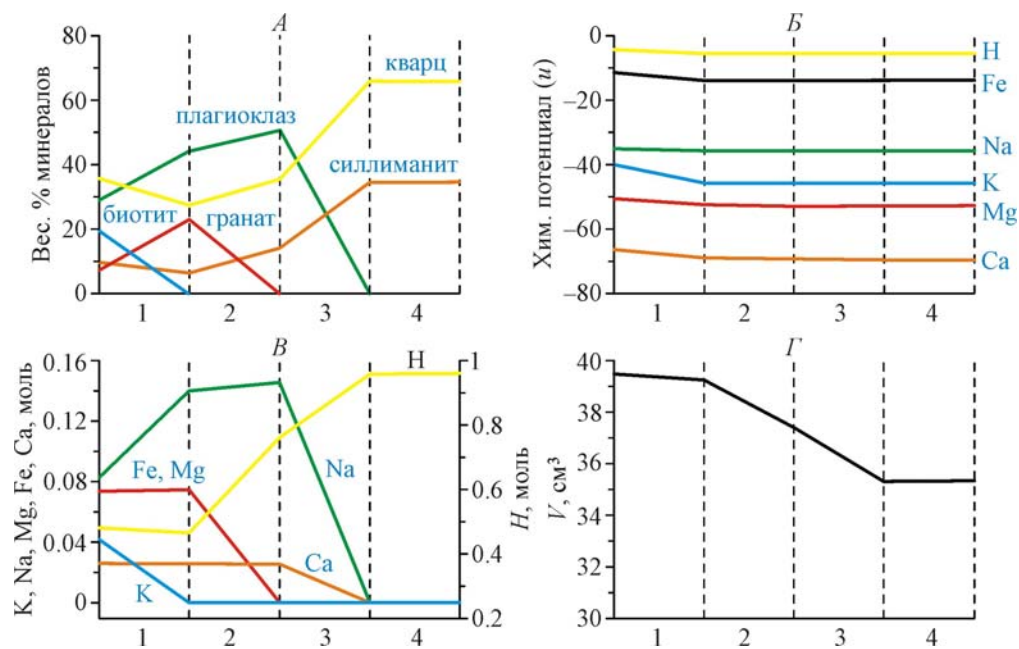


Рис. 24. Основные характеристики кислотного выщелачивания биотит-гранатового плагиогнейса на разных стадиях метасоматического процесса. А – количественные соотношения минералов в весовых процентах; Б – химические потенциалы вполне подвижных компонентов; В – мольные количества вполне подвижных компонентов; Г – объем породы. 1-4 – зоны метасоматической колонки.

- В процессе моделирования получена метасоматическая колонка по своим свойствам, отвечающая метасоматитам инфильтрационного типа: резкость фронтов замещения, ограниченная переменность состава минералов в пределах одной зоны, уменьшение числа сосуществующих минералов в зонах от фронтальной к тыловой с тенденцией к образованию мономинеральной зоны. Вынос из породы *K*, ведущий к разрушению биотита, а позднее *Fe* и *Mg*, сопровождающийся исчезновением граната, компенсируется увеличением количества *Na* и связанным с этим возрастанием в породе количества плагиоклаза. Последующий вынос *Na* и *Ca* приводит к формированию кварц-силлиманитовой породы тыловой зоны кислотного метасоматоза (**Рис. 24А и В**). Объем породы при минимизации изобарно-изотермического потенциала Коржинского не является фактором состояния. Полученное в результате моделирования уменьшение объема в тыловой зоне метасоматической колонки (**Рис. 24Г**) связано с возрастанием плотности конечных пород процесса кислотного выщелачивания – фибролитовых кварцитов вследствие контракции исходных гнейсов. Предложенный метод позволяет на новом уровне ставить и решать задачи физико-химических взаимодействий в естественных и искусственных средах. К таким задачам, относятся метасоматические превращения горных пород под воздействием глубинных постмагматических флюидов; проверки различных гипотез генезиса геологических объектов; исследования альтернативных сценариев рудообразования; изучения роли летучих при метаморфизме и т.д.
- Предложен статистический метод (*В.Л.Тасон*), позволяющий получать количественную информацию о распределении форм золота в минералах. Метод основан на анализе отдельных кристаллов в пробе и обработке полученных данных с учетом свойств распределения различных форм микроэлемента. Сопоставление результатов с прямым методом (РФЭС) для кристаллов золотосодержащего Ag_2S показало приемлемую точность (от ± 13 до ± 38 отн.% для разных форм, **табл. 2**), приближающуюся к показателям количественного анализа в случае наиболее равномерно распределенной структурной формы. Воспроизводимость данных по этой форме ($\pm 30\%$ отн.) приближается к величине естественной неоднородности твердых растворов, образующихся в гидротермальных системах. В кристаллах Ag_2S , полученных при замещении сульфидом серебра металлического Au в гидротермальных условиях, установлено три формы золота – металлическое $Au(0)$, более равномерно распределенное кластерное (или наночастицы) и $Au(I)$ в составе твердого раствора $(Ag,Au)_2S$ (**Рис. 25**). Предложен способ учета влияния на оценку содержания структурной формы Au маскирующей ее, равномерно рас-

пределенной по кристаллам, сорбционной составляющей примеси Au. Метод может быть распространен на другие микроэлементы.

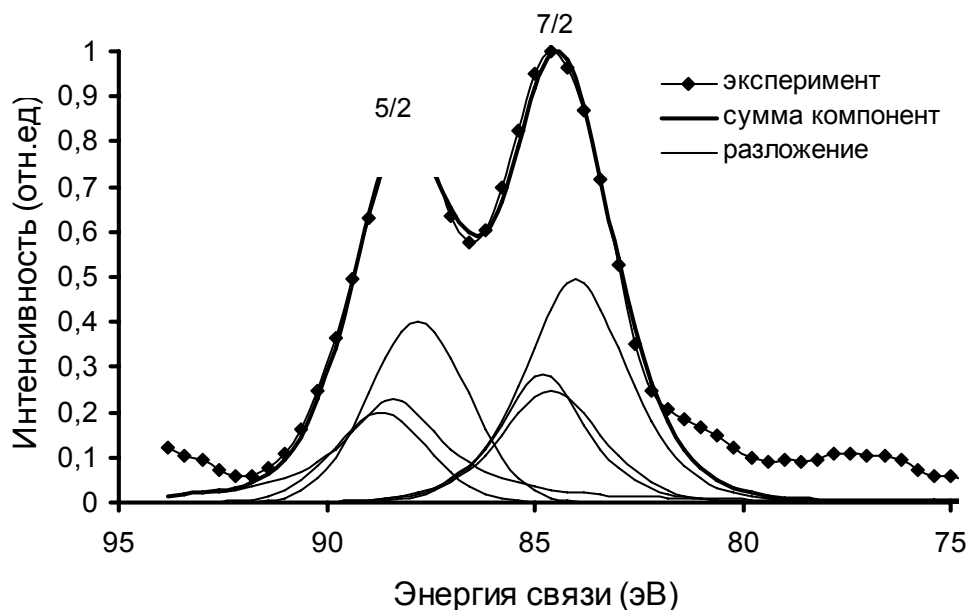


Рис. 25. Спектр РФЭС Au 4f кристаллов $\text{Ag}_2\text{S}:\text{Au}$, полученных замещением металлического золота сульфидом серебра в растворе 9% NH_4Cl + 1% Na_2S при 460 °С и давлении 1 кбар. Аппроксимация тремя дублетами (три формы нахождения Au).

Таблица 2. Параметры спектра РФЭС Au 4f, формы нахождения Au в золотосодержащем Ag_2S и сопоставление содержаний Au в различных формах с предлагаемым методом

Фото-электр. пик	Вклад Лоренциана ¹	Энергия связи, эВ	Полу-ширина, эВ ²	Форма золота ³	Содержание Au		
					ат. % ⁴ (РФЭС)	г/г ⁵ (РФЭС)	предл. метод
4f _{7/2}	0.66	84.0	3.0	Au(0)	48	2326	1647 ± 642
4f _{5/2}	0	87.8	2.8				(Δ=29%)
4f _{7/2}	0.47	84.6	3.0	Au _{класт.}	29	1405	1938 ± 914
4f _{5/2}	1	88.4	2.9				(Δ=38%)
4f _{7/2}	0.74	84.8	2.5	Au(I)	23	1114	1260 ± 407
4f _{5/2}	0.26	88.7	2.8				(Δ=13%)

¹Форма пика аппроксимируется смешанной функцией Лоренц+Гаусс.

²Ширина пика на половине его максимальной высоты.

³Au(0) – элементное (металлическое) золото, Au_{класт.} – золото в форме кластеров (наночастиц), Au(I) – одновалентное золото в структуре.

⁴По площадям под пиками РФЭС (сумма всех форм принята = 100 ат.%).

• Методами рентгеновской фотоэлектронной и оже-электронной спектроскопии, сканирующей зондовой микроскопии установлено присутствие пирротиноподобной неавтономной фазы на кристаллах гидротермального пирита, в их поверхностном слое примерно полумикронной толщины. Естественная поверхность гидротермального пирита, как синтетического, так и природного, химически модифицирована по сравнению с объемом кристалла в неавтономную фазу (НФ) переменного состава, подобную пирротину, но с большими вариациями состава в сторону FeS_2 . НФ способна включать в свой состав примесные элементы и окисульфидные компоненты (сульфит-, сульфат-, тиосульфат-ионы). Типохимизм поверхности пирита основывается на свойствах НФ отражать условия роста кристаллов в отношении двух основных факторов – чистоты системы (наличия дополнительных фаз, в том числе виртуальных, то есть потенциально возможных фаз примесных элементов) и летучести серы (влияющей на отношение S/S₂ в поверхности). Состав и свойства НФ отличаются для пиритов мезо-

термальных и эпитеpmальных золоторудных месторождений. В первом случае они близки к пирротиноподобной НФ, наблюдаемой на синтетических гидротермальных пиритах и содержащей дополнительный анион сульфит, а во втором – к сульфид-дисульфид-сульфатным композициям, в которых присутствует трехвалентное железо. Поглощение такой фазой примесных элементов, в том числе благородных металлов, может происходить за счет стабилизации в ее структуре кластерных образований с Fe^{3+} и SO_4^{2-} . Основные морфологические типы неавтономной фазы на пиритах различного генезиса показаны на рис. 26 а-в.

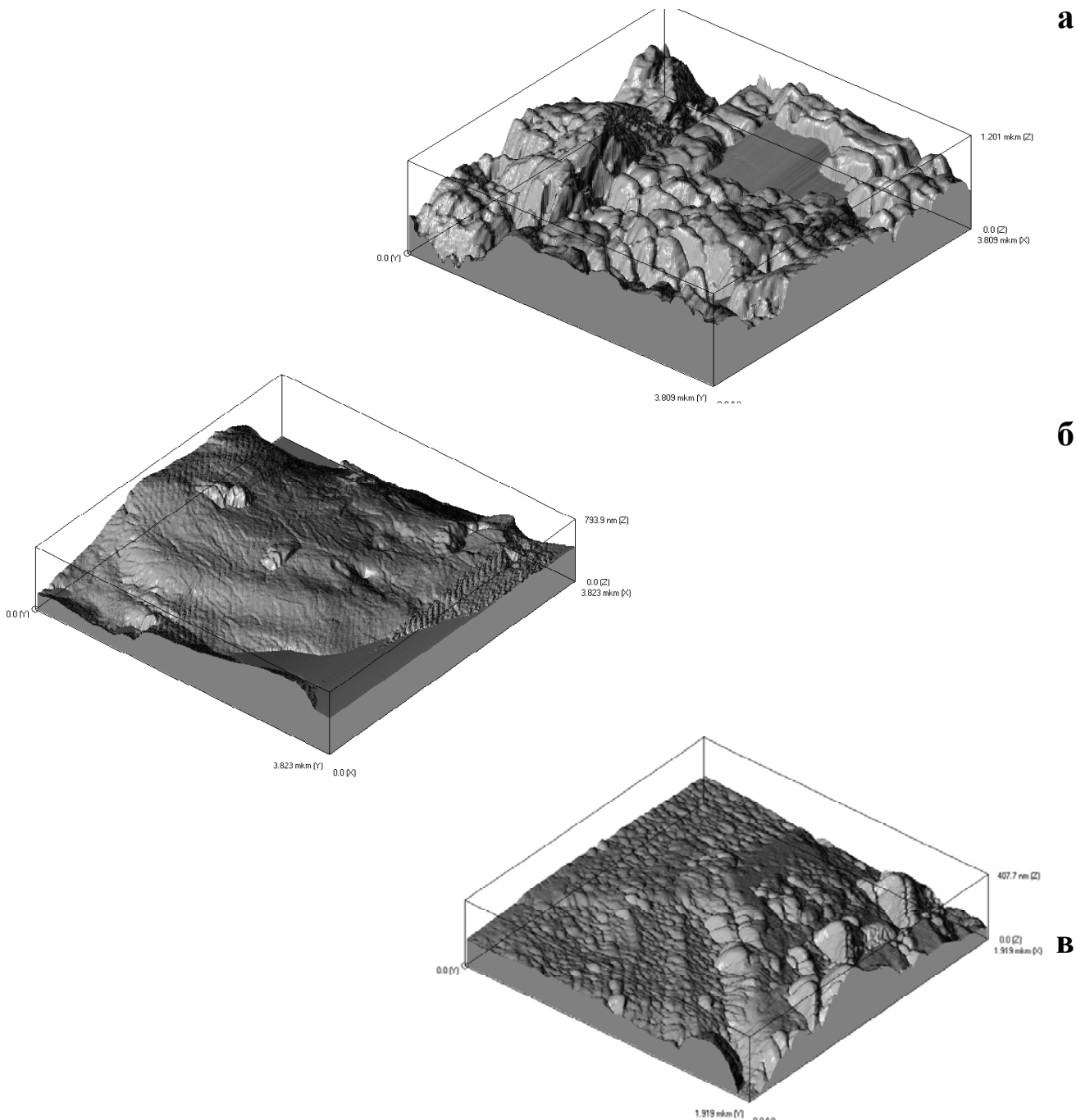


Рис. 26. Трехмерные изображения в атомно-силовом микроскопе поверхности кристаллов пирита с пирротиноподобной НФ (а) и перекрывающей оксидной пленкой (б) (Зун-Холба, Вост. Саян), с двухуровневой наноструктурой НФ (в) (Ороч, Сев. Приохотье).

Условия гипергенеза характеризуются присутствием оксигидроксидной или оксидной пленки FeIII на поверхности кристаллов, которая морфологически резко отличается от слоя пирротиноподобной неавтономной фазы (а,б). Неустойчивость процесса кристаллизации в эпитеpmальных условиях может вызывать образование двухуровневой наноструктуры (в).

- Условия гипергенеза характеризуются присутствием оксигидроксидной или оксидной

пленки Fe₃O₄ на поверхности кристаллов, которая морфологически резко отличается от слоя пирротиноподобной неавтономной фазы (**Рис. 26 а, б**). Неустойчивость процесса кристаллизации в эпитеpmальных условиях может вызывать образование двухуровневой наноструктуры (**Рис. 26в**) вследствие структурирования вицинальных поверхностей в систему упорядоченных доменов. Подобные системы стабилизируются за счет избыточного растворения примесей или перехода поверхностного слоя в другое фазовое состояние (вследствие процесса, подобного полиморфному превращению).