

На правах рукописи



Греку Евгений Дмитриевич

**ОРУДЕНЕНИЕ АКЖАЛ-БОКО-АШАЛИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО РАЙОНА
(ВОСТОЧНЫЙ КАЗАХСТАН): ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ, ЭТАПЫ И ВРЕМЯ
ФОРМИРОВАНИЯ**

1.6.10 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск -2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетной учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск.

Научный руководитель: **Калинин Юрий Александрович**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН) (г. Новосибирск).

Официальные оппоненты: **Фридовский Валерий Юрьевич**, член-корреспондент РАН, профессор, доктор геолого-минералогических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН) (г. Якутск).

Будяк Александр Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геохимии им. А.В. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН) (г. Иркутск).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ) (г. Москва).

Защита состоится «19» декабря 2025 года в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетной учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д.3.

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Котлярову А.В. Тел./факс: +7 (383) 373-05-18; +7(383) 373-05-61, e-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте: https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/greky/dis-Greky.pdf

Автореферат разослан «24» октября 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.1.050.01, к.г.-м.н.

А.В. Котляров

ВВЕДЕНИЕ

Месторождения золота, локализующиеся в метаморфических толщах, на западе классифицируемые как «орогенный» и связанный с восстановленной интрузией («Reduced Intrusion-related Gold Systems», далее – RIRGS) типы, играют ведущую роль в экономическом отношении, на них приходится более 40 % добычи золота в мире, за исключением россыпей и месторождения Витватерсранд (ЮАР) [Бортников и др., 2016; Чугаев, 2024; Frimmel, 2008; Phillips, 2013; Lipson, 2014; Goldfarb et.al., 2014]. Изучение генезиса руд является важным не только в понимании процессов образования месторождений, но и в выборе стратегии поисковых и геолого-разведочных работ. В настоящее время, разрабатывается две основные концепции, касающиеся генезиса «орогенных» месторождений: коровая метаморфогенная (crustal metamorphic model), которая является наиболее распространенной [Буряк, Хмелевская, 1997; Goldfarb, Groves, 2015] и магматогенно-гидротермальная (magmatic-hydrothermal model), имеющая меньшую популярность [Webber et.al., 2013; de Boorder, 2012]. В последнее время, вопросы, касающиеся источников вещества, геотектонических условий образования этих месторождений, генетической их связи с магматизмом и метаморфизмом широко обсуждаются в научной литературе [Буряк, 1987; Горячев, 2006; Кряжев, 2017; Савчук, Волков, 2020; Чугаев, 2024; Goldfarb, et.al., 2001; 2005; 2014; Goldfarb, Pitcairn, 2023; Groves, 1993; Groves et.al., 1998; 2018; Kerrich et.al., 2000; 2005; Large et.al., 2011; Phillips, Powell, 2010; Sillitoe, Thompson, 1998; Tomkins, 2013].

Промышленное освоение золоторудных месторождений Восточного Казахстана началось еще в XIX веке, когда впервые было открыто коренное месторождение золота Балажал, с того момента поисково-разведочные и эксплуатационные работы ведутся непрерывно. Изначально промышленный интерес был сосредоточен на месторождениях с золото-сульфидно-кварцевыми жилами, отработка которых ведется и на сегодняшний день, однако, во второй половине XX века, с открытием крупнообъемных месторождений «бакырчикского» типа, промышленный интерес сместился в сторону месторождений с залежами золота в виде минерализованных зон. К этому типу относятся месторождения Южные Ашалы, Васильевское и Акжал, расположенные в пределах исследуемого района. Генезис этих месторождений, источник рудного вещества и многие другие вопросы дискутируются уже многие десятилетия.

Объектом исследования являются золоторудные месторождения Акжал, Васильевское, и Южные Ашалы, Акжал-Бок-Ашалинского золоторудного района (Восточный Казахстан).

Целью работы является установление этапов рудообразования, выявление минералогическо-геохимических особенностей руд, а также определение их связи с магматизмом в пределах Акжал-Бок-Ашалинского золоторудного района (АБАЗР). Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**: 1) проанализировать и обобщить литературные данные по золоторудным объектам АБАЗР; 2) изучить минералогическо-геохимические особенности руд месторождений и рудопроявлений АБАЗР, с акцентом на «эталонные» месторождения Акжал и Южные Ашалы; 3) выявить закономерности в структурно-текстурных особенностях и микроэлементном составе пирита, марказита и арсенопирита при помощи СЭМ (SEM «MIRA 3LMU»), микрозондового (JXA-8230) и LA-ICP-MS iCAP Qc (Thermo Scientific) анализов; 4) определить и уточнить возраст циркона из магматических образований и слюды (серицита и фуксита) из рудных ассоциаций на месторождениях Акжал, Васильевское и Южные Ашалы; 5) определить изотопный состав $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов и $\delta^{13}\text{C}$ углеродистого вещества (УВ) отобранных в пределах месторождений и рудопроявлений рудного района; 6) создать концептуальную структурно-вещественную модель истории формирования месторождений АБАЗР на основе полученных минералогическо-геохимических, изотопно-геохронологических, изотопно-геохимических данных, с привлечением термобарогеохимических, структурно-тектонических и других материалов.

Фактический материал, методы и методика исследований. В основу работы положен материал, предоставленный научным руководителем и собранный автором при проведении полевых работ и лабораторных исследований в лаборатории прогнозно-

металлогенических исследований ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева в период с 2020 по 2025 гг., в процессе выполнения НИР по программе РАН, государственного задания «Металлогения рудных районов Азии: модели формирования месторождений благородных и цветных металлов, комплекс поисковых критериев» № 122041400237-8 и частично при финансовой поддержке проекта Российской Федерацией в лице Министерства образования и науки России (номер проекта 13.1902.24.44, номер соглашения 075-15-2024-641).

Автором проведены наблюдения и собран фактический и каменный материал из керна скважин, карьеров, геологических обнажений и канав месторождений Акжал, Васильевское, Колорадо, Женишке, Южное, Южные Ашалы, Балажал и рудопроявлений Сергей-1, Акшкола, Койтас, Аскар, Каражал.

В процессе работы было изучено более 500 образцов руд и пород, 250 аншлифов, 25 шлифов. Из образцов выделено более 100 мономинеральных проб пирита, арсенопирита, циркона, серицита, кварца и углеродистого вещества. Изготовлено более 30 аншлифов и 16 шашек. Исследован химический состав и зональность минералов при помощи сканирующей электронной микроскопии (более 2-х тыс. анализов) и микрозондового анализа (более 300 анализов и 45 поэлементных карт). При помощи ЛА-ИСП-МС определен микроэлементный состав пирита, марказита и арсенопирита различных генераций (> 100 анализов) из руд месторождений Акжал, Южные Ашалы. Установлен возраст циркона (U/Pb методом) из диорита (1 проба) и гранодиорит-порфира (2 пробы), а также слюд (серицита и фуксита, Ar/Ar методом) находящихся в ассоциации с рудной минерализацией (3 пробы). Определен изотопный состав серы ($\delta^{34}\text{S}$) пирита (10 проб), арсенопирита (5 проб), сфалерита (1), галенита (1), а также изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$) углеродистого вещества (3 пробы).

Для минералого-геохимического исследования руд применялись различные методы. Оптические исследования и фотодокументация аншлифов и пластинок выполнены на микроскопе «Olympus BX53P» с цифровой камерой DP72. Состав, зональность и взаимоотношение различных минеральных фаз определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «MIRA 3LMU» (Tescan, Чехия, аналитики Н.С. Карманов, М.В. Хлестов) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 450 XMax 80 (Oxford Instruments, Великобритания) в режимах вторичных (SE) и обратно-рассеянных электронов (BSE) при различных увеличениях. Картирование пирита и арсенопирита проведено в характеристическом излучении NiKa, AsLa, AuLa, AgLa, CoKa, FeKa, SKa, SbLa на электронно-зондовом микроанализаторе (PCMA) JXA-8230 (Jeol Ltd) (аналитик В.А. Даниловская). Содержания Au и Ag в породах и мономинеральных фракциях определены атомно-абсорбционным методом (аналитик В.Н. Ильина). Определение содержаний микроэлементов в пирите, арсенопирите и марказите проводилось методом масс-спектрометрии с лазерной абляцией (далее ЛА-ИСП-МС) с использованием квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой iCAP Qc (Thermo Scientific), объединённого с устройством лазерного пробоотбора NewWave Research 213 (Elemental Scientific) (лазер Nd:YAG; длина волны 213 нм) (аналитики И.С. Карпутин и А.Л. Рагозин). U/Pb-датирование зерен циркона было проведено методом LA-ICP-MS (аналитики Д.В. Семенова и А.В. Карпов). Определение $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраста серицита из рудных ассоциаций проводилось по методике ступенчатого прогрева (аналитики А.В. Травин и Д.С. Юдин). Изотопный состав $\delta^{34}\text{S}$ определялся в мономинеральных фракциях пирита, арсенопирита, галенита и сфалерита, отобранных под бинокулярной лупой с чистотой не ниже 95%, на масс-спектрометре Finnigan MAT Delta в режиме двойного напуска (аналитики В.Н. Реутский, М.Н. Колбасова). Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ УВ определялся на масс-спектрометре FINNIGAN MAT-453 с приставкой Flash EA 1112 (аналитик В.Н. Реутский). Обработка и анализ первичной полевой информации, а также графическое оформление итоговых материалов производились в программных комплексах AutoCAD, CorelDraw, Isoplot 3, ArcGIS, QGIS 3.24.3, Google Earth Pro и TriQuick, STATISTICA 10, LADR v1.1.07 (2021-11-23). Все аналитические исследования проводились в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Личный вклад автора заключается в организации и непосредственном участии в экспедиционных работах, а также в получении фактического материала в лабораторных условиях. Автором проведен анализ, интерпретация и обобщение полученных данных, а также сформулированы защищаемые положения, которые изложены в диссертационной работе.

Основные защищаемые положения.

1. В Акжал-Бок-Ашалинском золоторудном районе (Восточный Казахстан), выделяется два этапа рудообразования: золото-сульфидный (минерализованные зоны) – метаморфогенно-гидротермальный и золото-сульфидно-кварцевый (кварцевые жилы) – магматогенно-гидротермальный.

2. На месторождении Южные Ашалы, последовательные генерации осадочно-диагенетического (Ру-I), метаморфогенного (Ру-II, Ару-I) и гидротермального (Ру-III, Ару-II) пирита и арсенопирита различаются содержанием микроэлементов и характером микровключений. В осадочно-диагенетическом пирите накапливаются Au, As, Ag, Mo, Pb, Cu, Sb, Cr, Co. В метаморфогенном пирите от ядер к периферии увеличиваются концентрации As и Sb, при этом центр обогащен минеральными микровключениями (золота, халькопирита и блеклых руд), что связано с перераспределением элементов. В гидротермальном пирите повышены концентрации Ni и присутствуют микровключения хромита и сульфоарсенидов Fe-Ni-Co.

3. В Акжал-Бок-Ашалинском золоторудном районе золото-сульфидное оруденение сформировано на стадии орогенеза (до 315 млн лет), возраст золото-сульфидно-кварцевого оруденения оценивается в интервале 303-280 млн лет и близок времени гранитоидного и базитового магматизма – 309-292 млн лет.

Научная новизна. По результатам комплексного анализа минералого-геохимических, изотопно-геохимических, изотопно-геохронологических, геолого-структурных и термобарогеохимических данных впервые разработана концептуальная структурно-вещественная модель, которая отражает историю развития месторождений Акжал-Бок-Ашалинского золоторудного района (АБАЗР) и может послужить основой для выявления новых золоторудных объектов. В АБАЗР установлены и обоснованы два этапа рудообразования: золото-сульфидный – метаморфогенно-гидротермальный и золото-сульфидно-кварцевый – магматогенно-гидротермальный. Впервые для месторождений Акжал и Южные Ашалы применили методы ЛА-ИСП-МС (точечный) и микрозондового (картирование) анализа, что позволило выявить закономерности в геохимической эволюции пирита и арсенопирита. На месторождении Южные Ашалы выявлены различия по содержаниям микроэлементов и характеру минеральных включений в последовательных генерациях осадочно-диагенетического, метаморфогенного и гидротермального пирита и арсенопирита. Получены новые изотопно-геохронологические данные, U/Pb методом (по циркону) для магматических пород и Ag/Ag методом (по серициту и фукситу) для рудных образований, показывающие субсинхронное (на месторождении Акжал, Васильевское) и последовательное (на месторождении Южные Ашалы) формирование интрузий и рудоносных кварцевых жил.

Практическая значимость. Материалы диссертации вошли в итоговые отчеты по хозяйственным работам и используются производственными организациями (ТОО «GEO-KZ», «Goldstone Minerals», «К-ПЛЕЙСЕР») при проведении поисковых, разведочно-эксплуатационных работ на территории Акжал-Бок-Ашалинского золоторудного района. Полученные в работе данные существенно расширяют представления о механизмах формирования месторождений Акжал-Бок-Ашалинского золоторудного района и могут использоваться при разработке более рациональных схем извлечения золота при эксплуатации.

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 177 стр. состоит из введения, семи глав, заключения, 3 приложений, 60 рисунков, 17 таблиц, списка литературы из 242 источников.

Во **введении** определены цели и задачи исследования, сформулированы защищаемые положения. **Первая глава** содержит общие сведения по геологии, металлогении, а также

основным рудоконтролирующим факторам АБАЗР. Во **второй главе** приводится геологическая характеристика месторождений и рудопроявлений, кроме этого, дается детальное описание геологического строения основных месторождений – Акжал, Южные Ашалы, Васильевское. **Третья глава** посвящена описанию структурно-текстурных и минералого-геохимических особенностей руд «эталонных» месторождений Акжал и Южные Ашалы. В **четвертой главе** приведены данные по микроэлементному составу сульфидных минералов месторождения Акжал и Южные Ашалы. В **пятой главе** приведены данные геохронологических исследований. В **шестой главе** представлены результаты изучения изотопного состава серы сульфидов и углерода УВ. В **седьмой главе** приведены результаты анализа источников рудного вещества и генезиса рассмотренных месторождений. В **заключении** приведены основные результаты и выводы.

Апробация работы и публикации. По материалам диссертации опубликовано 3 статьи (в соавторстве) в журналах, включенных в Перечень ВАК, а также 6 тезисов российских и международных конференций. Основные результаты и защищаемые положения работы докладывались и обсуждались на Международных и Всероссийских научных конференциях, таких как: «Международная научная студенческая конференция», Новосибирск, НГУ, 2021, 2022; «X International Siberian Early Career GeoScientists Conference», Новосибирск, ИГМ СО РАН, 2022; «Металлогения древних и современных океанов», Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2023, 2025; «Новое в познании процессов рудообразования», Москва, ИГЕМ РАН, 2023; «XI Сибирская конференция молодых ученых по наукам о земле», Новосибирск, ИГМ СО РАН, 2024; «XIV международная научно-практическая конференция «геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов», Москва, ЦНИГРИ, 2025.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю д.г.-м.н., Калинину Ю.А. за помощь при обсуждении материалов, поддержку при проведении исследований в соответствии с поставленными задачами, критические замечания и советы в процессе написания диссертации. За всестороннюю помощь, поддержку и обсуждение материалов автор признателен Белогуб Е.В., Боровиков А.А., Брусницину А.И., Гаськову И.В., Гладкову А.С., Жмодику С.М., Жуковой И.А., Изоху А.Э., Кириченко И.С., Кобзевой А.В., Ковалеву К.Р., Конопелько Д.Л., Круку Н.Н., Куйбиде М.Л., Кукушкину К.А., Лавренчуку А.В., Лазаревой Е.В., Макарову В.А., Масленникову В.В., Мелекесцевой И.Ю., Наумову Е.А., Неволько П.А., Плотинской О.Ю., Сердюкову А.Н., Смирнову С.З., Сначеву А.В., Сухорукову В.П., Толстых Н.Д., Туркиной О.М., Хромыху С.В., Шавекиной А.Ш., Юдовской М.А., Яковлеву В.А. Особую благодарность автор выражает за аналитические исследования и обсуждение результатов Даниловской В.А., Ильиной В.Н., Карманову Н.С., Карпову А.В., Карпутину И.С., Колбасовой М.Н., Рагозину А.Л., Реутскому В.Н., Семенову Д.В., Травину А.В., Хлестову М.В., Юдину Д.С. Автор благодарит за помощь в проведении полевых исследований Волосова А.С., Зинякина С.С., Котлера П.Д., Кузьмину О.Н., Михеева Е.И., Мороз Е.Н., Нарыжнову А.В., Пенкину В.А., Цареву М.Д.

Изложение результатов в автореферате дается по защищаемым положениям.

Геологическое строение АБАЗР. Рудный район приурочен к юго-восточной части ЗКЗП (Рис. 1). АБАЗР протягивается в северо-западном направлении на расстояние примерно 100 км, при ширине около 25 км [Наливаев, 1980; Калинин и др., 2021]. Границы АБАЗР проходят по разломам северо-западного простирания: Горностаевско-Аркалыкско-Боконскому на юго-западе и Чарскому на северо-востоке. В центральной части проходит Сарыжальский (Южно-Акжальский) разлом субширотного простирания. Вышеперечисленные разломы считаются рудоконтролирующими, однако их роль в рудообразовании оценивается неоднозначно [Левин, 1968; Окунев и др., 1969; Наливаев, 1980; Беспаяев и др., 2013; Калинин и др., 2021]. В пределах АБАЗР выделяются месторождения с золото-сульфидно-углеродистой минерализацией (Южные Ашалы, Каражал), золото-кварцево-жильной минерализацией (Колорадо, Агдынгек, Красная и др.) и с совмещением их в пространстве (Васильевское, Акжал, Жолпак-Тобе).

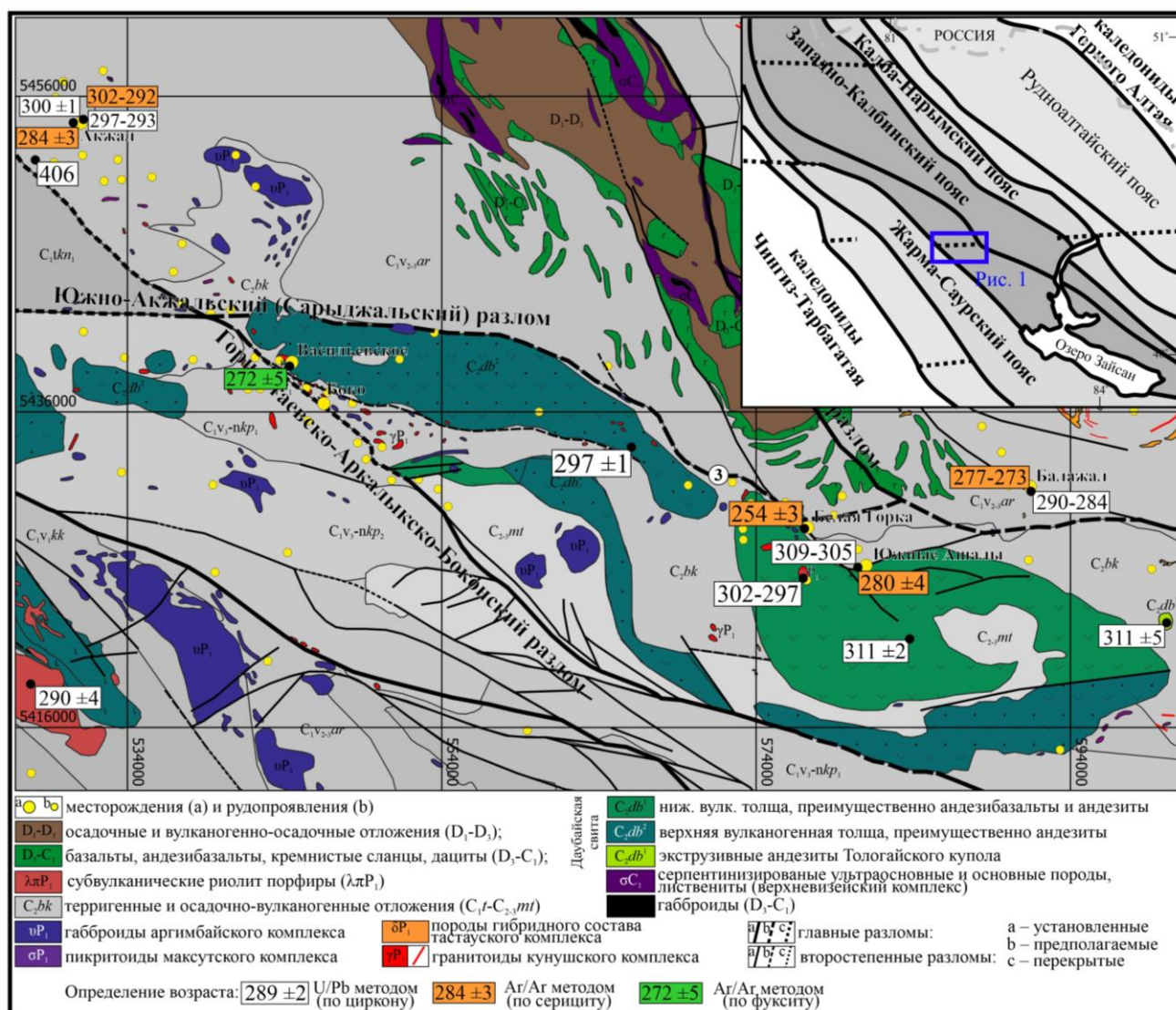


Рис. 1. Геологическая схема АБАЗР. На врезке (справа сверху) показано расположение АБАЗР в пределах Обь-Зайсанской складчатой системы. Схема составлена по данным [Ермолов и др., 1981; 1983; Государственная..., 1965; 1966; Safonova et.al., 2012; 2018; Бесплав и др., 2013; Хромых и др., 2013; 2020; Хромых, 2022] с изменениями автора. Использованы литературные [Наумов и др., 2012; Хромых и др., 2013; 2020; Хромых, 2022; Калинин и др., 2022; Греку и др., 2025; Safonova et.al., 2018; Kalinin et.al., 2021] и авторские возрастные данные.

На территории района распространены осадочные и вулканогенно-осадочные породы силурийской, девонской и карбоновой систем [Государственная..., 1965; 1966; Ермолов и др., 1981; 1983; Safonova et.al., 2012; 2018], слагающие Жарминский синклиниорий на юго-западе и Чарско-Горностаевский антиклинорий на северо-востоке (разделенные зоной Сарыджальского разлома). Магматизм в пределах района представлен разнообразно в широком возрастном диапазоне и соответствует доорогенной, позднеорогенной и посторогенной (внутриплитной) стадиям развития Алтайской аккреционно-коллизонной системы, рассмотренным в работе [Хромых, 2022]. Наиболее древними, доорогенными считаются породы Чарского офиолитового пояса: серпентинизированные ультраосновные и основные породы – габбро-диориты, микрогаббро (450-387 млн лет); вулканогенные образования – базальты, андезибазальты, андезиты и дациты (378-324 млн лет) [Ермолов и др., 1981; Safonova et.al., 2012; 2018]. В позднеорогенную стадию сформировались вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы Даубайской базальт-андезитовой ассоциации: нижняя толща – андезибазальты и андезиты (C_{db}^1 , 311 млн лет); верхняя толща – преимущественно андезиты

(C₂db², 297 млн лет) [Хромых и др., 2020], и, кроме этого, в эту стадию формировались породы кунушского комплекса (C₃-P₁, 310-298 млн лет) – плагиограниты, гранодиориты, диоритовые порфириды, гранит-порфиры и гранодиорит-порфиры [Наливаев, 1980; Дьячков и др., 2009; Куйбида и др., 2009; Беспаяев и др., 2013; Kuibida et.al., 2019]. В посторогенную стадию происходит формирование аргимбайского комплекса (P₁, 293 млн лет) – щелочные габбро-диабазы, габбро-эссекситы, габбро, базальтоидные порфириды, сиениты [Ермолов и др., 1983; Наливаев, 1980; Хромых и др., 2009; 2013]; максутского комплекса (P₁, 280-278 млн лет) – оливиновые долериты (пикродолериты), плагиоклазовые перидотиты (пикриты) и тастауского массива (P₁, 289-280 млн лет) – многофазные габбро-гранитные интрузии [Ермолов и др., 1983; Докукина и др., 2010; Наумов и др., 2012; Хромых и др., 2013; Хромых, 2022]. Кроме этого, в районе Тюрешокинской мульды отмечается вулканогенный аналог аргимбайского комплекса – субвулканические риолит-порфиры (Ермолов и др., 1983; Хромых и др., 2013; 2020; Хромых, 2022).

Для АБАЗР определены литолого-стратиграфический, метаморфический, структурный и магматический рудоконтролирующие факторы, совместное проявление которых положительно характеризует потенциальную рудоносность отдельных участков. Рудовмещающими отложениями на месторождениях и рудопроявлениях АБАЗР являются вулканогенно-осадочные породы девонской и карбоновой систем. Среди этих образований по условиям образования выделяются морские – аркалыкская свита, например, месторождение Акжал (Приложение 1), лагунно-континентальные – буконьская свита, и существенно континентальные отложения – даубайская свита, например, месторождение Южные Ашалы (Приложение 2) [Левин, 1968¹; Калинин и др., 2017_ф]. Оруденение, преимущественно, локализуется в углеродсодержащих алевролитах и песчаниках, претерпевших региональный метаморфизм не выше зеленосланцевой фации [Любецкий, Любецкая, 1984; Ананьев, 1999; Греку и др., 2024]. Значительную роль в локализации оруденения имеют пликативные структуры, в которых золоторудные узлы тяготеют к периклинальному замыканию небольших антиклинальных складок, к перегибам их осей или их крыльям, и к крупным флексурам, осложненным разломами и надвигами [Государственная..., 1980; Марченко, 1984]. Также, важным структурным фактором является приуроченность оруденения к узлам сочленения субширотных, северо-западных и северо-восточных нарушений [Наливаев, Павлова, 1986; Свиридов и др., 1999]. Рудолокализирующими структурами, к которым приурочены минерализованные зоны, являются зоны рассланцевания, будинажа и динамометаморфизма углеродистых пород, прилегающих к поверхности надвига [Марченко, 1984]. Важным критерием при поисках промышленного оруденения является тесная возрастная и пространственная связь месторождений с контрастным по составу магматизмом аргимбайского (например, месторождение Васильевское, Приложение 2) [Наливаев, 1980] и кунушского (например, месторождение Акжал) комплексов [Государственная..., 1980; Наливаев, Павлова, 1986; Свиридов и др., 1999]. Кроме этого, существует ряд локальных факторов, которые в автореферате не рассматриваются.

Первое защищаемое положение.

В Акжал-Бок-Ашалинском золоторудном районе (Восточный Казахстан), выделяется два этапа рудообразования: золото-сульфидный (минерализованные зоны) – метаморфогенно-гидротермальный и золото-сульфидно-кварцевый (кварцевые жилы) – магматогенно-гидротермальный.

В геологическом строении месторождений и рудопроявлений АБАЗР принимают участие углеродсодержащие терригенно-осадочные породы буконьской и аркалыкской свит, в которых локализуются рудные тела в виде минерализованных зон, перекрывающиеся вулканогенными образованиями даубайской свиты. Вулканиды, в свою очередь, прорываются массивами и дайками базитового и гранитоидного состава, а последние секутся кварцевыми и кварц-карбонатными жилами с золото-сульфидной и золото-полисульфидной минерализацией. В отдельных случаях, например, на месторождении Акжал, золотосодержащие кварцевые

жилы пересекают гранитоидный массив, но при этом секутся дайками гранодиорит-порфиров. Углеродсодержащие терригенно-осадочные породы, в которых локализуются минерализованные зоны с залежами сульфидов стратиформного облика, претерпевают региональный метаморфизм зеленосланцевой фации, пликативные деформации (складкообразование) и динамометаморфизм – все эти признаки указывают на до- и синдеформационное рудообразование в обстановке сжатия, которая соответствует стадии орогенеза. На основании выше изложенного можно сделать вывод о принадлежности минерализованных зон и кварцевых жил к разным этапам рудообразования.

Основываясь на минералого-геохимических данных, выделено два гипогенных этапа рудообразования (Рис. 2): золото-сульфидный (ранний) и золото-сульфидно-кварцевый (поздний). На каждом этапе выделяется по две стадии, на раннем: 1) пиритовая, 2) пирит-арсенопиритовая; а на позднем: 1) сульфидная; 2) полиметаллическая. Кроме этого, на месторождениях нередко проявлен гипергенный этап, с которым связано образование зоны окисления. Для минерализованных зон (раннего этапа) характерны вкрапленные, гнездовые, прожилковые и прожилково-вкрапленные текстуры руд, тогда как для кварцевых жил (позднего этапа) типичны массивные, брекчиевые, гнездовые, гнездово-вкрапленные, прожилковые, прожилково-вкрапленные, и вкрапленные текстуры руд.

Этап Стадия Минерал	Золото-сульфидный		Золото-сульфидно-кварцевый	
	Пиритовая	Пирит-арсенопиритовая	Сульфидная	Полиметаллическая
Кварц (Qz)				
Доломит (Dol)				
Сидерит (Sd)				
Альбит (Ab)				
Углеродистое вещество				
Серицит (Ms)				
Пирит (Py)	Py-Ia Py-Iб Py-Iв	Py-II-я Py-IIа Py-IIб	Py-III	Py-IV
Арсенопирит (Apy)		ЗОЛОТОНОСНЫЙ		
Пирротин (Pyh)				
Рутил (Rt)				
Золото (Au ⁰)				
Глаукодот (Gl)				
Герсдорфит (Gdf)				
Халькопирит (Ccp)				
Сфалерит (Sph)				
Галенит (Gn)				
Тетраэдрит (Ttd)				
Бурнонит (Bnn)				
Марказит (Mrc)				

Рис. 2. Схема последовательности рудообразования месторождения Южные Ашалы. Толщина линии соответствует относительной распространенности минерала.

На пиритовой стадии золото-сульфидного этапа образуются три морфологические разновидности пирита-I (фрагментального, округлого и удлиненного облика), золото-I,

халькопирит-I, тетраэдрит-I и сидерит (Рис. 3а, б). На пирит-арсенопиритовой стадии кристаллизуются золотоносный арсенопирит-I, пирит-II (субгедральные и эвгедральные кристаллы), золото-I, халькопирит-I, тетраэдрит-I, пирротин. Эти минералы повсеместно распространены в пределах месторождения, а среди нерудных минералов установлены кварц, доломит, сидерит, альбит, серицит и углеродистое вещество (Рис. 3в-ж). Рудные минералы данного этапа приурочены к терригенным породам буконьской свиты, редко встречаются в виде захваченных реликтов и обломков в кварцевых жилах и гидротермальных брекчиях.

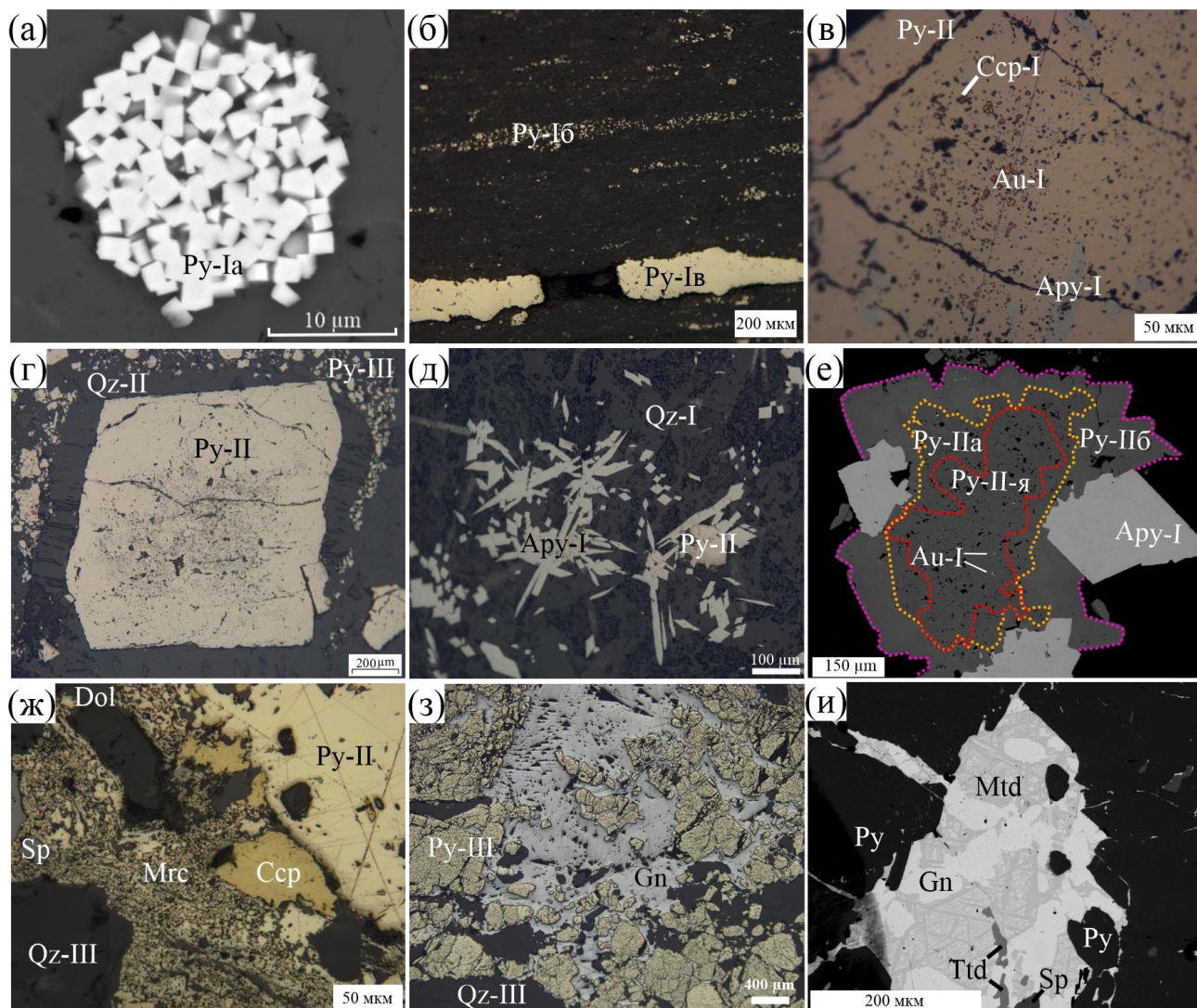


Рис. 3 Рудная минерализация АБАЗР. а – фрамбоид пирита; б – вкрапленность и удлиненные зерна пирита-I в углеродсодержащем сланце; в – зональный кристалл пирита в сростании с арсенопиритом и с включениями золота и халькопирита; г – зональный пирита-II с кварцевыми тенями давления вокруг кристалла и каемкой пирита-III в измененном алевролите; д – звездчатый агрегат арсенопирита и кристаллы пирита в углеродистом алевролите; е – зональный пирит в сростании с арсенопиритом и минеральными включениями в ядерной части; ж – халькопирит, сфалерит и пирит-II обрастают марказитом; з – обломки пирита цементируются кварц-галенитовым цементом; и – структуры твердого распада матильдита и галенита с прожилками тетраэдрита. Примечание: месторождения: Акжал – в-д, з-и; Южные Ашалы – а-б, е-ж.; Метод исследования: СЭМ, ЭДС (режим BSE) – а, е, и; поляризационный микроскоп – б-д, ж-з.

Минерализация пиритовой стадии образуется в процессе седиментогенеза и/ или раннего диагенеза, о чём свидетельствуют залежи сульфидов стратиформного облика и их структурно-текстурные особенности (рис. 3б), изотопный состав серы пирита ($\delta^{34}\text{S} = -7 \text{ ‰}$), а также

характерный микроэлементный состав пирита, изученный ЛА-ИСП-МС методом. В пирите установлены повышенные содержания халькофильных (Cu, As, Ag, Sb, Au, Tl, Pb, Bi), сидерофильных (Co, Ni, Mo) и литофильных (V, U, Cr, W, Mn, Mg) элементов. Минерализация пирит-арсенопиритовой стадии образуется в процессе позднего диагенеза и метаморфизма, что подтверждается пликативными деформациями с согласным залеганием сульфидов, тенями давления кварца вокруг пирита (Рис. 3г), уменьшением концентраций микроэлементов в пирите от центра к периферии и обилием минеральных микровключений в ядрах вкрапленников, указывающих на перекристаллизацию (Рис. 3е), а также приуроченностью рудных тел к сдвиговым зонам (Приложение 2). Формирование руд раннего этапа – метаморфогенно-гидротермального типа, происходило в результате процессов позднего диагенеза и метаморфизма.

На сульфидной стадии золото-сульфидно-кварцевого этапа образуются пирит-III, арсенопирит-II, золото-II, анатаз (или рутил), глаукоцит, герсдорфит, доломит и серицит, приуроченные к кварцевым жилам (Рис. 3з), которые секут породы даубайской и буконьской свиты. На полиметаллической стадии кристаллизуются пирит-IV, халькопирит-II, галенит, сфалерит, золото-II, марказит, тетраэдрит-II и бурнонит, в кварц-доломитовых прожилках (Рис. 3и). Последние в пространстве совмещены с жилами сульфидной стадии и зачастую выполняют центральные их части. Отмечаются различного рода признаки, указывающие на связь этого типа оруденения с гранитоидным магматизмом: пространственно-временные взаимоотношения, минералогическая (смена высокотемпературных минеральных ассоциаций низкотемпературными по мере удаления от массива) и температурная (уменьшение температуры по мере удаления от интрузива) зональность относительно Акжальского массива. В пользу этого также свидетельствует проявленность Ag-Bi-Sb-Hg и субэкономической полисульфидной (галенит, сфалерит, халькопирит) минерализации, с повышенными концентрациями Bi (до 935 г/т), Pb (> 1 мас. %), Sb (до 124 г/т), Zn (> 1 мас. %) в рудах позднего этапа месторождения Акжал, а также Au-Bi-Mo геохимическая специализация магматических пород. Формирование руд позднего этапа – магматогенно-гидротермального типа, происходит в результате внедрения гранитоидов и отделения гидротермального раствора от них.

Второе защищаемое положение.

На месторождении Южные Ашалы последовательные генерации осадочно-диагенетического (Ру-I), метаморфогенного (Ру-II, Ару-I) и гидротермального (Ру-III, Ару-II) пирита и арсенопирита различаются содержанием микроэлементов и характером микровключений. В осадочно-диагенетическом пирите накапливаются Au, As, Ag, Mo, Pb, Cu, Sb, Cr, Co. В метаморфогенном пирите от ядер к периферии увеличиваются концентрации As и Sb, при этом центр обогащен минеральными микровключениями (золота, халькопирита и блеклых руд), что связано с перераспределением элементов. В гидротермальном пирите повышены концентрации Ni и присутствуют микровключения хромита и сульфоарсенидов Fe-Ni-Co.

На месторождении Южные Ашалы установлено семь разновидностей пирита, объединенные в три генерации: осадочно-диагенетическую (Ру-I), метаморфогенную (Ру-II) и гидротермальную (Ру-III), для каждой из которых характерны определенные геохимические черты. Осадочно-диагенетический пирит включает разновидности фрамбоидального (Ру-Ia) округлого (Ру-Iб) и удлиненного (Ру-Iв) облика. Метаморфогенный пирит характеризуется зональным строением, имеет пористое ядро (Ру-II-я) и однородную кайму, состоящую из субгедральных (Ру-IIa) и эвгедральных (Ру-IIб) кристаллов. Гидротермальный пирит образует зерна субгедрального облика. Микроэлементы в пирите золоторудного месторождения Южные Ашалы, в основном, встречаются в двух формах: в виде твердых растворов и невидимых частиц (нано- и микровключений). Немногочисленные данные по составу пирита месторождения Акжал обнаруживают сходство с месторождением Южные Ашалы. Округлый пирит Акжала (Ру-Iб) обогащен рядом микроэлементов – Ag, Pb, Bi, Mo, W, V, Mg, Mn, Cr, Co

(Рис. 5) относительно других разновидностей. По результатам ЛА-ИСП-МС анализа, распределение элементов в минерале относительно равномерное, что подтверждается плоским характером графиков на временных развертках (Рис. 4а) с относительно узким диапазоном значений (Приложение 3). Удлиненный пирит (Py-Iв) имеет повышенные концентрации Cu и пониженные содержания As, Cr, Ni, V, Mn, Mg относительно других разновидностей (Рис. 5), при этом на временных развертках установлен относительно плоский характер распределения элементов (Рис. 4б) с узким диапазоном значений (Приложение 3).

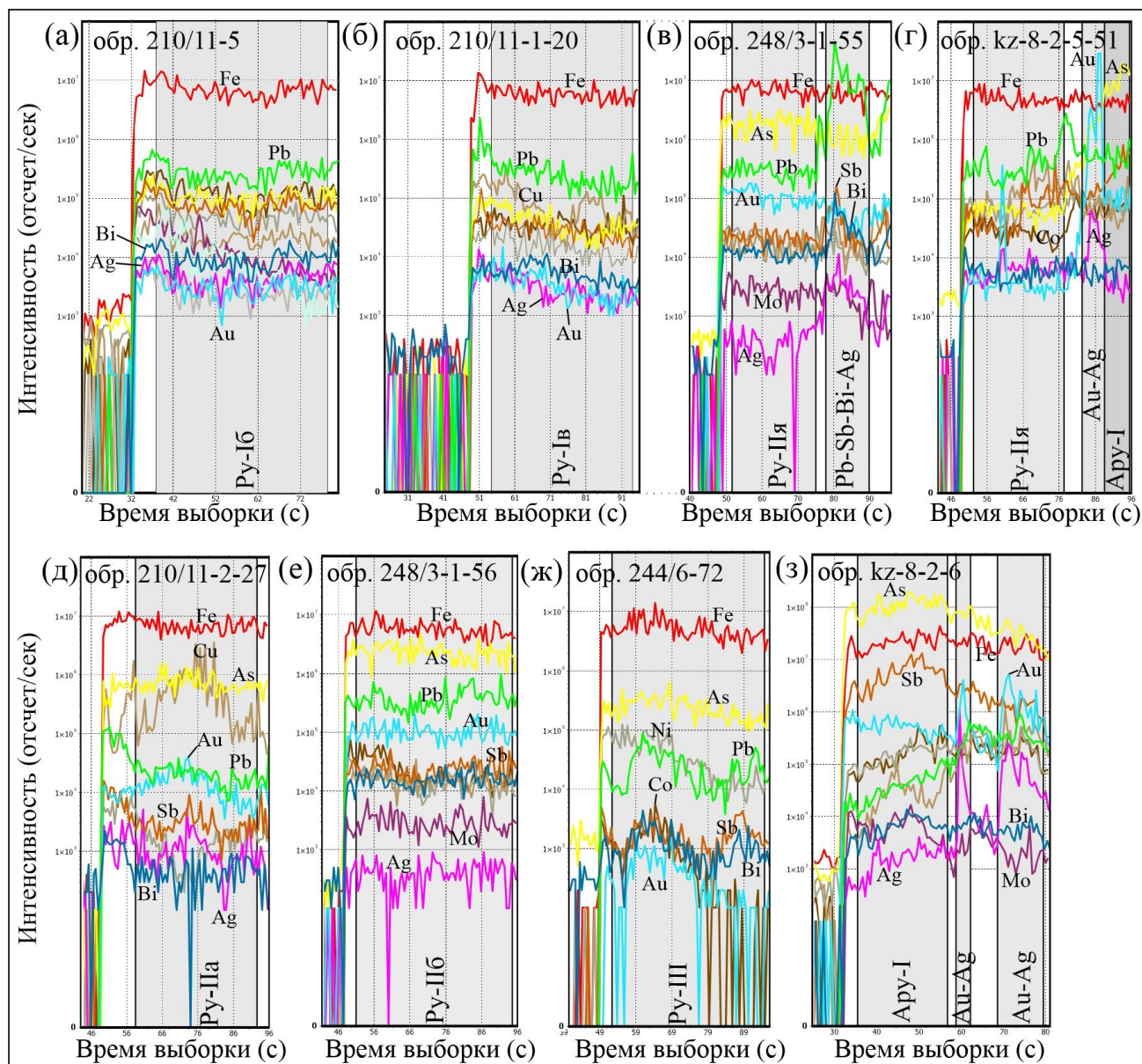


Рис. 4. Изменение интенсивности со временем в точке анализа (временные развертки). а, б, е – плоский характер распределения элементов: а – округлый пирит (Py-Iб); б – удлиненный пирит (Py-Iв); эвгедральный пирит (Py-IIб); в, г – плоский характер распределения элементов с резкими всплесками (микровключениями), пористый пирит из ядер вкрапленных кристаллов (Py-IIя); д – плоский характер распределения элементов с плавным повышением и понижением концентраций Cu и Au, субгедральный пирит (Py-IIа); ж – неравномерное распределение элементов, эвгедральный пирит (Py-III). Примечание: измерение образца начинается с 35 сек.

В пирите пористого строения из ядер вкрапленников (Py-II-я) и субгедрального облика (Py-IIа) на графиках изменения интенсивности со временем (Рис. 4в-д) отмечаются «аномальные»

всплески (экстремумы), что указывает на наличие микровключений халькопирита, золота и блеклых руд, кроме этого отмечаются повышенные содержания Au и As относительно осадочно-диагенетических разностей (Приложение 3). Пирит эвгедрального облика (Py-IIб) характеризуется повышенными содержаниями As относительно других разновидностей (Рис. 5), при этом на графиках (Рис. 4е) отмечается преимущественно «плоское» плато – указывающее на равномерное распределение элементов в сульфиде, редки всплески, интерпретируемые нами как микровключения халькопирита и других минералов. Пирит эвгедрального и субгедрального облика из кварцевых жил характеризуется повышенными содержаниями Ni – с равномерным распределением элемента (например, Рис. 4ж) и всплесками Cr, Mn, Mg – указывающих на наличие микровключений хромита, карбонатов и других минералов.

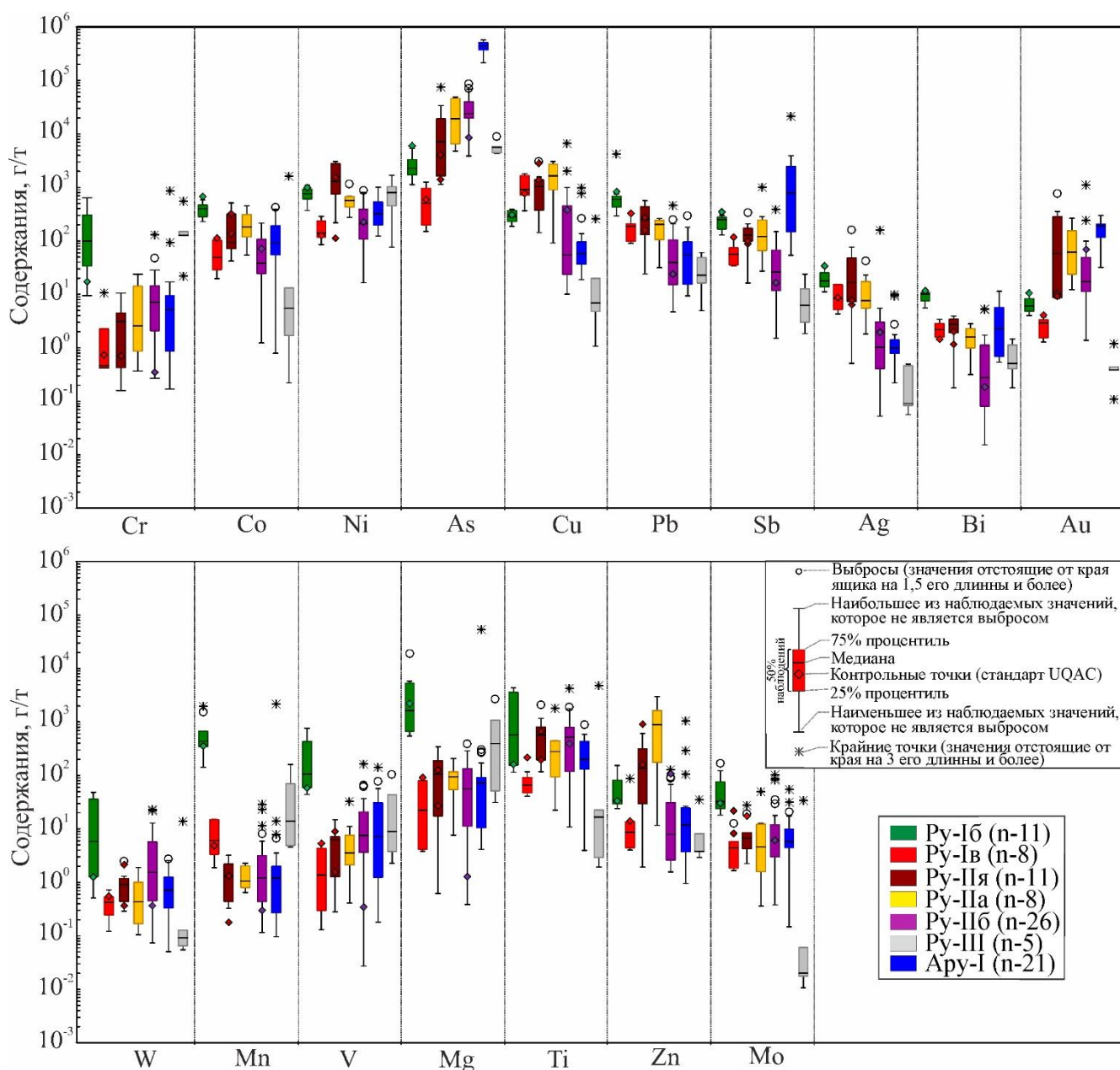


Рис. 5. Диаграмма изменчивости микроэлементного состава пирита и арсенопирита месторождения Южные Ашалы.

Изначально осадочно-диагенетический пирит и углеродсодержащая терригенная толща на месторождении Южные Ашалы были источником различных микроэлементов и содержали большое количество Cu, As, Ag, Sb, Au, Tl, Pb, Bi, Co, Ni, Mo, V, Cr, W, Mn, Mg. Далее, в

процессе позднего диагенеза¹, метаморфизма и деформационных процессов, происходит перераспределение микроэлементов, в результате чего их концентрации в пирите уменьшаются (за исключением As – содержания увеличиваются) от центра к периферии, при этом на ранних стадиях (центр) образуется большое количество микровключений (в том числе и золото).

Впервые на месторождении Южные Ашалы локальным анализом в точке методом ЛА-ИСП-МС определены медианные содержания золота и серебра в различных генерациях пирита и арсенопирита (г/т): в Ру-Іб – 6,1 и 18,1; в Ру-Ів – 2,9 и 8,7; в Ру-ІІ-я – 58,7 и 16,6; в Ру-ІІа – 61,6 и 7,7; в Ру-ІІб – 17,2 и 1; в Ру-ІІІ – 0,4 и 0,1; а в арсенопирите-І составляет – 190,1 и 1 соответственно (Приложение 3). На месторождении золото отмечается в виде микро- и нановключений в Ру-Ів, Ру-ІІ-я, на контакте Ру-ІІ и Ару-І и в виде прожилок в Ару-І – поверхностно-связанное (Рис. 4в-г, з). Кроме этого, в сульфидрах (Ру-Іб, Ру-Ів, Ру-ІІ-я, Ру-ІІа, Ру-ІІб, Ару-І) фиксируется «невидимое» золото, формы нахождения которого пока не ясны (Рис. 4а-б, д-ж).

Соотношение совместимых элементов Со и Ni в пирите на месторождении Южные Ашалы укладывается в область $Co/Ni < 1$ (от 0,002 до 0,96), что отчетливо указывает на осадочный источник сульфида, в то время как на месторождении Акжал соотношение Co/Ni варьирует от 0,05 до 2,5 и попадает в область осадочного и гидротермального происхождения.

Третье защищаемое положение.

В Акжал-Бок-Ашалинском золоторудном районе золото-сульфидное оруденение сформировано на стадии орогенеза (до 315 млн лет), возраст золото-сульфидно-кварцевого оруденения оценивается в интервале 303-280 млн лет и близок времени гранитоидного и базитового магматизма – 309-292 млн лет.

Принимая во внимание все выше перечисленные аргументы, формирование руд раннего золото-сульфидного этапа – метаморфогенно-гидротермального типа происходит в обстановке сжатия, которая соответствует орогенной стадии [по Хромых, 2022]. Вулканогенные образования даубайской свиты считаются индикатором смены обстановки сжатия на обстановку растяжения, что интерпретируется в литературе как коллапс орогенного сооружения [Хромых и др., 2020]. Таким образом, верхней возрастной границей рудообразования раннего этапа будут возраст вулканогенных образований (или коллапса орогена), что по данным [Хромых, 2022], соответствует ~315 млн лет.

По геологическим данным, дайки, малые интрузии и массивы гранитоидного и базитового состава АБАЗР, прорывают вмещающие терригенные, вулканогенные и терригенно-вулканогенные породы (например, даубайской свиты – C_2db). Время образования отложений Даубайского прогиба (C_2db_1), нижней вулканогенной толщи андезитов и андезибазальтов, распространенных в пределах Даубай-Ашалинского рудного поля, оценивается в 311 ± 2 млн лет, а возраст образования отложений Сарыжальского прогиба (C_2db_2), верхней вулканогенной толщи андезитов, распространенных в пределах Акжальского и Бок-Васильевского рудных полей, оценивается в 297 ± 1 млн лет (Хромых и др., 2020). Соответственно, прорывающие их магматические образования являются более молодыми. Для уточнений возраста, было проведено датирование цирконов из диоритов и гранодиорит-порфиров (3 пробы), расположенных в пределах месторождений (Приложение 1, 2).

¹ **Диагенез** – сумма всех стадий (и процессов) преобразования – и осадков и осадочных пород, т. е. в понятие Д. включаются также катагенез и метагенез; в таком широком толковании Д. обычно понимается в иностранной литологической литературе.

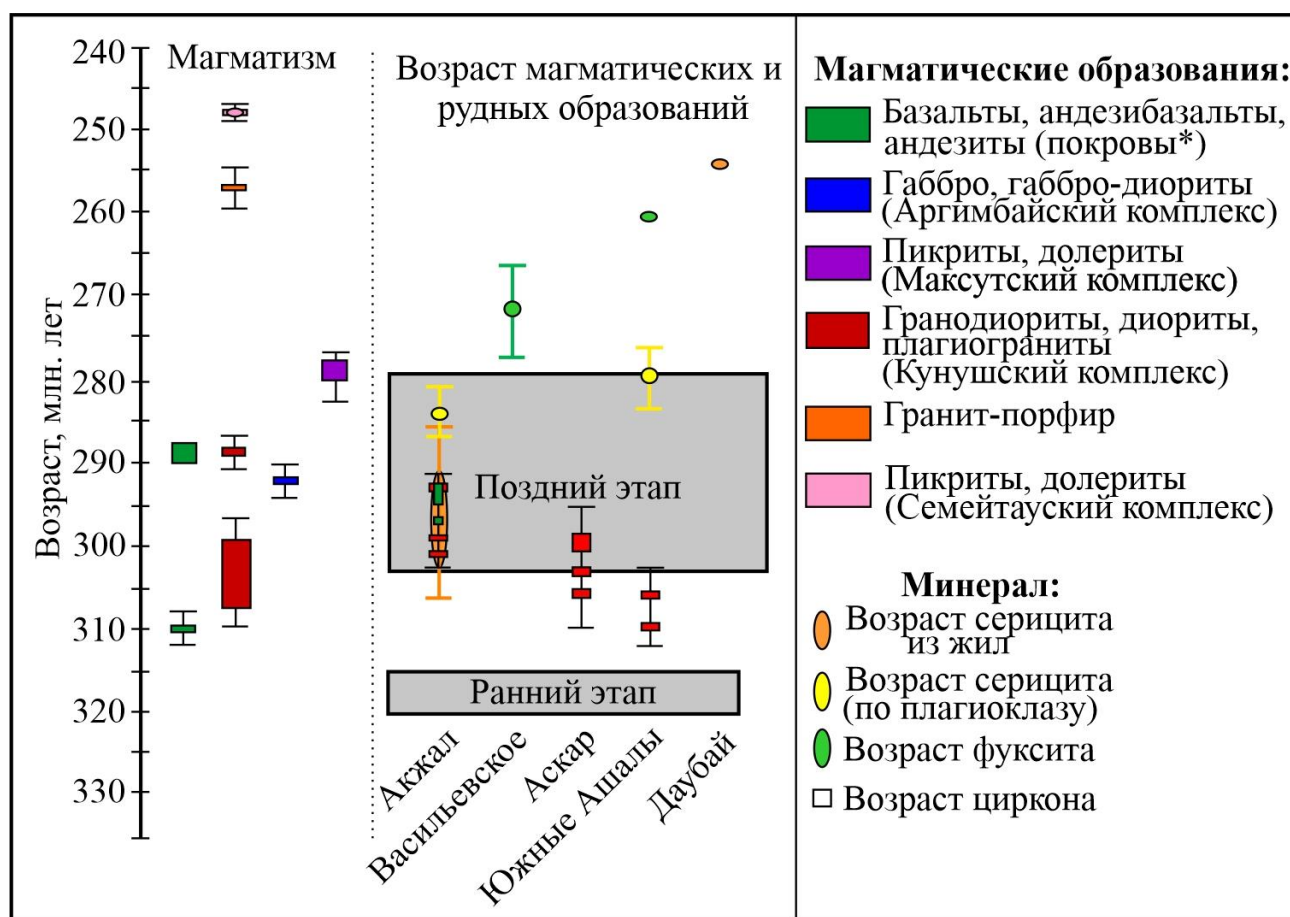


Рис. 6. Схема возрастной последовательности магматических и рудно-метасоматических событий ЗКЗП. В схеме использованы авторские и литературные данные [Хромых и др. 2013; 2020; Куйбида и др., 2009; Калинин и др., 2021; Хромых, 2022; Греку и др., 2025; Naumov et.al., 2010 и неопубликованные данные Ю.А. Калинина]. Примечание: в серых рамках показаны этапы рудообразования.

U-Pb методом (LA-ICP-MS) определен возраст цирконов интрузивных и гипабиссальных образований, парагенетически связанных с золоторудными месторождениями АБАЗР. На месторождении Акжал определен возраст цирконов магматических пород: диорита ($301,1 \pm 1,7$ млн лет) из краевой части Акжальского массива и из дайки гранодиорит-порфира (с двумя конкордантными возрастами – $308,4 \pm 2,8$ и $294,4 \pm 1,8$ млн лет) (Приложение 1). На месторождении Южные Ашалы определен возраст цирконов гранодиорит-порфира ($309,0 \pm 2,1$ млн лет) из гранодиорит-сиенит-порфирового массива (Приложение 2). Кроме этого, Ar/Ar методом уточнен и определен возраст серицита из рудных ассоциаций. На месторождении Акжал возраст серицита из (золоторудной) жилы составляет – $298,0 \pm 5,3$ млн лет (Приложение 1), на месторождении Васильевское возраст фуксита из кварц-карбонатного метасоматита (лиственита с рудной вкрапленностью) составляет – $272,6 \pm 5,1$ млн лет, а на месторождении Южные Ашалы возраст серицита из кварц-серицитового метасоматита (с рудной минерализацией) составляет – $279,8 \pm 4,3$ млн лет (Приложение 2). Таким образом, на месторождении Акжал рудообразование позднего этапа происходит субсинхронно с гранитоидами, тогда как на месторождении Южные Ашалы оруденение оторвано от гранитоидов по времени в 30 млн лет. Исходя из имеющихся данных, формирование позднего рудного этапа – магматогенно-гидротермального типа (на месторождениях Акжал, Васильевское и Южные Ашалы) связано с субсинхронным пульсационным внедрением золотоносных кварцевых жил во временном интервале 300–275 млн лет.

Заключение

Проведенные исследования на месторождениях и рудопроявлениях Акжал-Бок-Ашалинского золоторудного района (Акжал, Сергей-I, Акшкола, Васильевское, Южное, Женишке, Койтас, Аскар, Южные Ашалы, Каражал, Балажал) позволяют говорить о схожих металлогенических, геологических особенностях, рудоконтролирующих факторах, рудовмещающих толщах, типах оруденения и других характеристиках этих золоторудных объектов.

На месторождениях АБАЗР выделяется два типа руд: золото-сульфидный (минерализованные зоны) и золото-сульфидно-кварцевый (кварцевые жилы). Руды сопровождаются гидротермально-метасоматическими и динамометаморфическими преобразованиями, контролируемые зонами тектонических нарушений. Установлены золото-сульфидный (ранний) – метаморфогенно-гидротермальный и золото-сульфидно-кварцевый (поздний) – магматогенно-гидротермальный этапы рудообразования, включающие в себя несколько стадий. На раннем этапе вкрапленные сульфиды, в углеродсодержащей толще, зачастую стратиформного облика – залегают согласно с вмещающими их породами. Также, установленные тени давления кварца вокруг вкрапленников пирита, указывают на до- или синметаморфическое образование сульфидов. Установлены вкрапленные, гнездовые, прожилковые и прожилково-вкрапленные текстуры руд, характерные для минерализованных зон (локализирующихся во вмещающих углеродисто-терригенных толщах). На позднем этапе минерализация проявлена в виде жил и прожилок, прорывающих вмещающие терригенные породы, при этом выделяется золото-сульфидная и полиметаллическая стадии. Для сульфидно-кварцевых жил характерны массивные, брекчивые, гнездовые, гнездово-вкрапленные, прожилковые, прожилково-вкрапленные, и вкрапленные текстуры. Этап сопровождается богатой V_i минерализацией (матильдит, галенит с примесями V_i , бенлеонардит), а также минералого-геохимической зональностью.

На месторождениях Акжал и Южные Ашалы впервые приведена детальная характеристика основных сульфидных минералов (пирита и арсенопирита), а также охарактеризованные второстепенные и редкие минералы. Кроме этого, на месторождении Акжал впервые установлены – полибазит и матильдит, а на месторождении Южные Ашалы – марказит, хромит, сульфоарсениды (герсдорфит, глаукоdot) и сульфосоли Pb и Cu (бурнонит-зелигманитового и тенантит-тетраэдритового рядов).

Самородное золото (гипогенного происхождения) на месторождениях АБАЗР двух генераций, при этом раннее – в виде микровключений и тонких прожилок в сульфидах (пирите, арсенопирите, марказите), установлено в сростании с халькопиритом и минералами группы тетраэдрита, пробность золота в диапазоне 650-950 ‰; а позднее – в виде трещинных, прожилковых форм в сростании с кварцем, сфалеритом, галенитом, халькопиритом, блеклыми рудами, пиритом, с широким диапазоном пробности от 300 до 1000 ‰.

Образование месторождений и рудопроявлений АБАЗР, таких как Южные Ашалы, Каражал, Васильевское, Южное связано преимущественно с метаморфогенно-гидротермальным этапом, тогда как на Акжале, Сергей-I, Колорадо и других широко проявлен магматогенно-гидротермальный этап.

Методами СЭМ/ ЭДС и РСМА установлены существенные различия в составе основных элементов различных генераций пирита и определен нестехиометрический состав золотоносного арсенопирита на месторождениях Акжал и Южные Ашалы. При помощи РСМА были получены поэлементные карты Ni, Co, As, Au, Ag, Fe, Cu, S, Sb, которые отражают зональный характер распределения элементов в исследованных сульфидах (пирите, арсенопирите и марказите) на месторождениях Акжал и Южные Ашалы. На примере месторождения Южные Ашалы установлено семь разновидностей пирита объединенные в три генерации: осадочно-диагенетическую (Py-I), метаморфогенную (Py-II) и гидротермальную (Py-III), каждой из которых характерны определенные геохимические особенности. Осадочно-диагенетический пирит включает разновидности фрамбоидального (Py-Ia) округлого (Py-I) и удлиненного (Py-Ib) облика. Метаморфогенный пирит, зонального строения имеет пористое

ядро (Ру-II-я) и однородную кайму, состоящую из субгедрольных (Ру-IIа) и эвгедральных (Ру-IIб) кристаллов. А гидротермальный пирит имеет зерна субгедрального облика. Микроэлементы пирита золоторудного месторождения Южные Ашалы в основном встречаются в двух формах: в виде твердых растворов и в виде невидимых частиц или микровключений.

Изначально осадочно-диагенетический пирит и углеродсодержащая терригенная толща на месторождении Южные Ашалы были источником различных микроэлементов и содержали повышенное количество Cu, As, Ag, Sb, Au, Tl, Pb, Bi, Co, Ni, Mo, V, Cr, W, Mn, Mg. Далее, в процессе позднего диагенеза, метаморфизма и деформационных процессов, происходит перераспределение микроэлементов, в результате чего их концентрации в пирите по мере его преобразования уменьшаются (за исключением As – содержания увеличиваются), а на ранних стадиях преобразования образуется большое количество микровключений (в том числе и золото).

Впервые для месторождения Южные Ашалы определены средние (медиана) содержания золота и серебра, точным методом ЛА-ИСП-МС, в различных генерациях пирита и арсенопирита (г/т): в Ру-Iб – 6,1 и 18,1; в Ру-Iв – 2,9 и 8,7; в Ру-II-я – 58,7 и 16,6; в Ру-IIа – 61,6 и 7,7; в Ру-IIб – 17,2 и 1; в Ру-III – 0,4 и 0,1; а в арсенопирите-I составляет – 190,1 и 1 соответственно. На месторождении золото отмечается в виде микро- и нановключений в Ру-Iв, Ру-II-я, на контакте Ру-II и Ару-I, Ару-I и в виде прожилок в Ару-I – поверхностно-связанное. А также в сульфидах фиксируется «невидимое» золото в Ру-Iб, Ру-Iв, Ру-II-я, Ру-IIа, Ру-IIб, Ару-I, формы нахождения которого слабо изучены. Для месторождения Акжал были получены только предварительные данные, которые в дальнейшем необходимо пополнить, для более корректной интерпретации. Однако, можно говорить о значительном сходстве структурно-текстурных и минералого-геохимических особенностей с месторождением Южные Ашалы.

U-Pb методом (LA-ICP-MS) определен возраст цирконов интрузивных и гипабиссальных образований, парагенетически связанных с золоторудными месторождениями АБАЗР. На месторождении Акжал определен возраст цирконов магматических пород: диорита ($301,1 \pm 1,7$ млн лет) из краевой части Акжальского массива и из дайки гранодиорит-порфира (с двумя конкордантными возрастами – $308,4 \pm 2,8$ и $294,4 \pm 1,8$ млн лет). На месторождении Южные Ашалы определен возраст цирконов гранодиорит-порфира ($309,0 \pm 2,1$ млн лет) из гранодиорит-сиенит-порфирового массива.

Ar/Ar методом уточнен и определен возраст слюд из рудных ассоциаций. На месторождении Акжал возраст серицита из (золоторудной) жилы составляет – $298,0 \pm 5,3$ млн лет, на месторождении Васильевское возраст фуксита из кварц-карбонатного метасоматита (лиственита с рудной вкрапленностью) составляет – $272,6 \pm 5,1$ млн лет, а на месторождении Южные Ашалы возраст серицита из кварц-серицитового метасоматита (с рудной минерализацией) составляет – $279,8 \pm 4,3$ млн лет.

На месторождениях АБАЗР предполагается по меньшей мере два источника: осадочный и магматический. На осадочный источник указывают повышенные содержания Au, As и ряд микроэлементов в пирите, стратиформное залегание сульфидов, соотношение $Co/Ni < 1$ в пирите, изотопный состав $\delta^{34}S$ (от -7,0 до 4,3 ‰) сульфидов и $\delta^{13}C$ (от -20,9 до -17,7 ‰) УВ. Тогда как, на магматический источник указывают схожая геохимическая специализация руд и магматических пород, а также некоторые признаки месторождения RIRGS типа.

В углеродсодержащих терригенных породах установлено, что ранний диагенетический пирит (Ру-I) на месторождении Южные Ашалы с значением $\delta^{34}S$ (-7 ‰), образуется на стадии осадконакопления в результате сульфат редукции. Соотношение совместимых элементов Ni и Co в пирите на месторождении Южные Ашалы укладывается в область Co/Ni от 0,96 до 0,002, что также указывает на осадочный источник сульфида. Углеродистое вещество, с отрицательными значениями $\delta^{13}C$ от -20,9 до -17,7 ‰, отобранное из вмещающих углеродистых терригенных толщ месторождений Васильевское, Южные Ашалы и рудопоявления Каражал является осадочным, биогенного происхождения. Данные по изотопному составу вкрапленников эвгедрального пирита и игольчатого арсенопирита

месторождений Южные Ашалы, Васильевское и Южное ложатся в узкий диапазон значений $\delta^{34}\text{S}$ от 0,1 до 4,3. Изотопный состав $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов (пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит) из кварцевых жил, березитов и гранодиорит-порфиров месторождений Акжал и Балажал ложатся в диапазон значений от -2,7 до 1,8 ‰, что соответствует магматическому источнику.

Построена схематическая структурно-вещественная модель образования месторождения Южные Ашалы, в которой выделяется шесть этапов: 1 – седиментогенный (~325-320 млн лет); 2 – метаморфогенный (~320-315 млн лет); 3 – вулканогенный (~315-310 млн лет); 4 – плутоногенный (~310-298 млн лет); 5 – гидротермальный-I (~284-276 млн лет); 6 – гидротермальный-II (~260-254). Сопоставимое по ряду признаков с типичными месторождениями «орогенного» типа месторождение Южные Ашалы имеет и некоторую специфику (перенос и переотложение рудообразующих компонентов разнообразными типами флюидов при формировании рудных залежей, значительный временной отрыв гидротермального оруденения от проявлений магматизма и др.), что позволяет относить его к метаморфогенно-гидротермальному генетическому классу.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах ВАК

1. Калинин Ю.А., Ковалев К.Р., Сердюков А.Н., Гладков А.С., Сухоруков В.П., Наумов Е.А., Травин А.В., Семенова Д.В., Серебряков Е.В., Греку Е.Д. Возрастные рубежи и металлогеническое прогнозирование золоторудных месторождений Акжал-Бок-Ашалинской рудной зоны (Алтайская аккреционно-коллизонная система) // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. №. 2. С. 392–408. DOI: 10.5800/GT-2021-12-2-0530.

2. Греку Е.Д., Калинин Ю.А., Сердюков А.Н., Наумов Е.А., Боровиков А.А., Рагозин А.Л., Гладков А.С. Минералого-геохимические особенности и золотоносность пирита и арсенопирита золоторудного месторождения Южные Ашалы (Восточный Казахстан) // Руды и металлы. 2024. № 4. С. 5–36. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-100016.

3. Греку Е.Д., Калинин Ю.А., Гладков А.С., Наумов Е.А., Сердюков А.Н., Боровиков А.А. Условия формирования и изотопно-геохронологические характеристики золоторудного месторождения Южные Ашалы (Восточный Казахстан) // Руды и металлы. 2025. № 1. С. 54–82. DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10004.

Материалы конференций и тезисы докладов

4. Греку Е.Д. Последовательность рудообразования месторождения Акжал (Восточный Казахстан) // Материалы 58-й Международной научной студенческой конференции, 13-15 апреля 2021 г. Секция: Геология. Новосибирск: Издательско-полиграфический центр НГУ. 2021. С. 67.

5. Греку Е.Д. Последовательность рудообразования месторождения Аномального (Восточный Казахстан) // Материалы 59-й Международной научной студенческой конференции, 10-20 апреля 2022 г. Секция: Геология. Новосибирск: Издательско-полиграфический центр НГУ. 2022. С. 74.

6. Greku E.D. The sequence of ore formation of the Anomalous deposit (East Kazakhstan) // Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (IGM SB RAS). X International Siberian Early Career GeoScientists Conference Novosibirsk, 13-17 June 2022. – Novosibirsk. 2022. P. 65–66.

7. Калинин Ю.А., Сердюков А.Н., Наумов Е.А., Соловьев С.Г., Ковалев К.Р., Семенова Д.В., Юдин Д.С., Гладков А.С., Хусаинова А.Ш., Греку Е.Д. Месторождение золота Балажал Западно-Калбинского золотоносного пояса: геологическое строение, минералого-геохимические особенности и изотопно-геохронологические характеристики // Петрология и рудоносность магматических формаций: материалы науч. конф., посв. памяти чл.- корр. АН СССР и РАН Г. В. Полякова и проф. А. Г. Владимирова. 25–29 апреля 2022 г. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2022. С. 90–93.

8. Греку Е.Д. Золоторудное месторождение Аномальное (Восточный Казахстан): геологическое строение и возрастные рубежи формирования // Металлогения древних и

современных океанов-2023. Минералогия и геохимия рудных месторождений: от теории к практике. Научное издание. – Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. 2023. С. 150–153.

9. Греку Е.Д., Калинин Ю.А., Сердюков А.Н. Геологическое строение и последовательность рудообразования на золоторудном месторождении Южные Ашалы (Восточный Казахстан) // Новое в познании процессов рудообразования: двенадцатая российская молодёжная научно-практическая школа Москва, 27 ноября – 01 декабря 2023 г. – М.: ИГЕМ СО РАН. 2023. с. 45–47.

10. Греку Е.Д. Золоторудное месторождение Акжал (Восточный Казахстан): Новые минералогические и изотопно-геохронологические данные // XI Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: Материалы конференции. Новосибирск, 23–29 сент. 2024 г. / ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева; ИНГГ СО РАН им. А.А. Трофимука – Новосибирск: ИПЦ НГУ. 2024. С. 57–59.

11. Греку Е.Д. Микроэлементный состав пирита и арсенопирита золоторудного месторождения Южные Ашалы (Восточный Казахстан) // Металлогения древних и современных океанов-2025. От гипотез рудогенеза к критериям прогнозирования. Научное издание. – Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. 2025. С. 149–153.

12. Калинин Ю. А., Греку Е.Д., Боровиков А.А., Рагозин А.Л., Сердюков А.Н., Гладков А.С., Наумов Е.А. Геолого-генетическая модель формирования золото-сульфидных месторождений Акжал-Боко-Ашалинского рудного района (Восточный Казахстан) // XIV международная научно-практическая конференция «геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов», посвящённая 90-летию ЦНИГРИ (1935–2025) 15-18 апреля 2025 г., ФГБУ «ЦНИГРИ, г. Москва»

Приложение 1

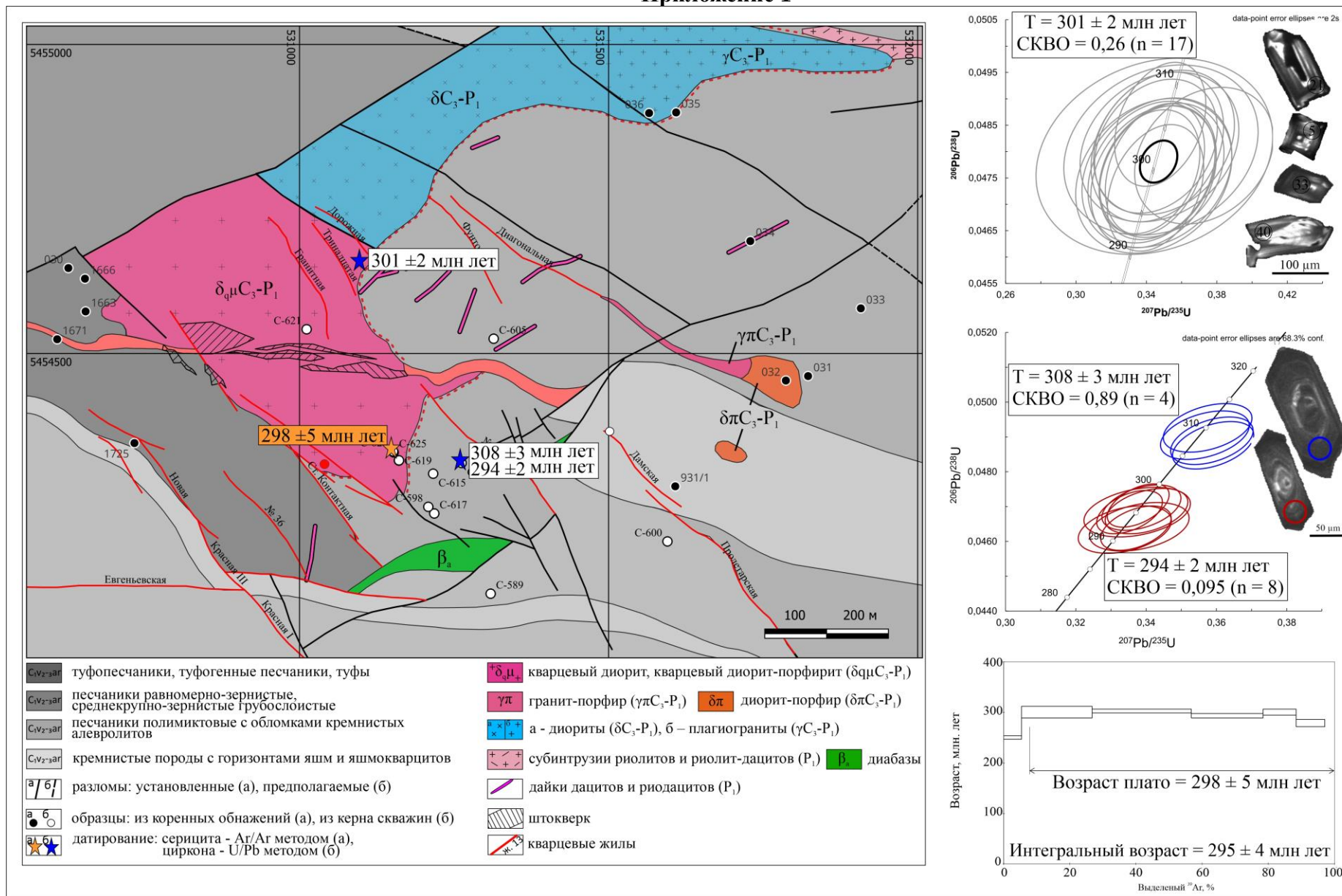


Рис. 7. Геологическое строение и возрастные данные месторождения Акжал.

Приложение 1

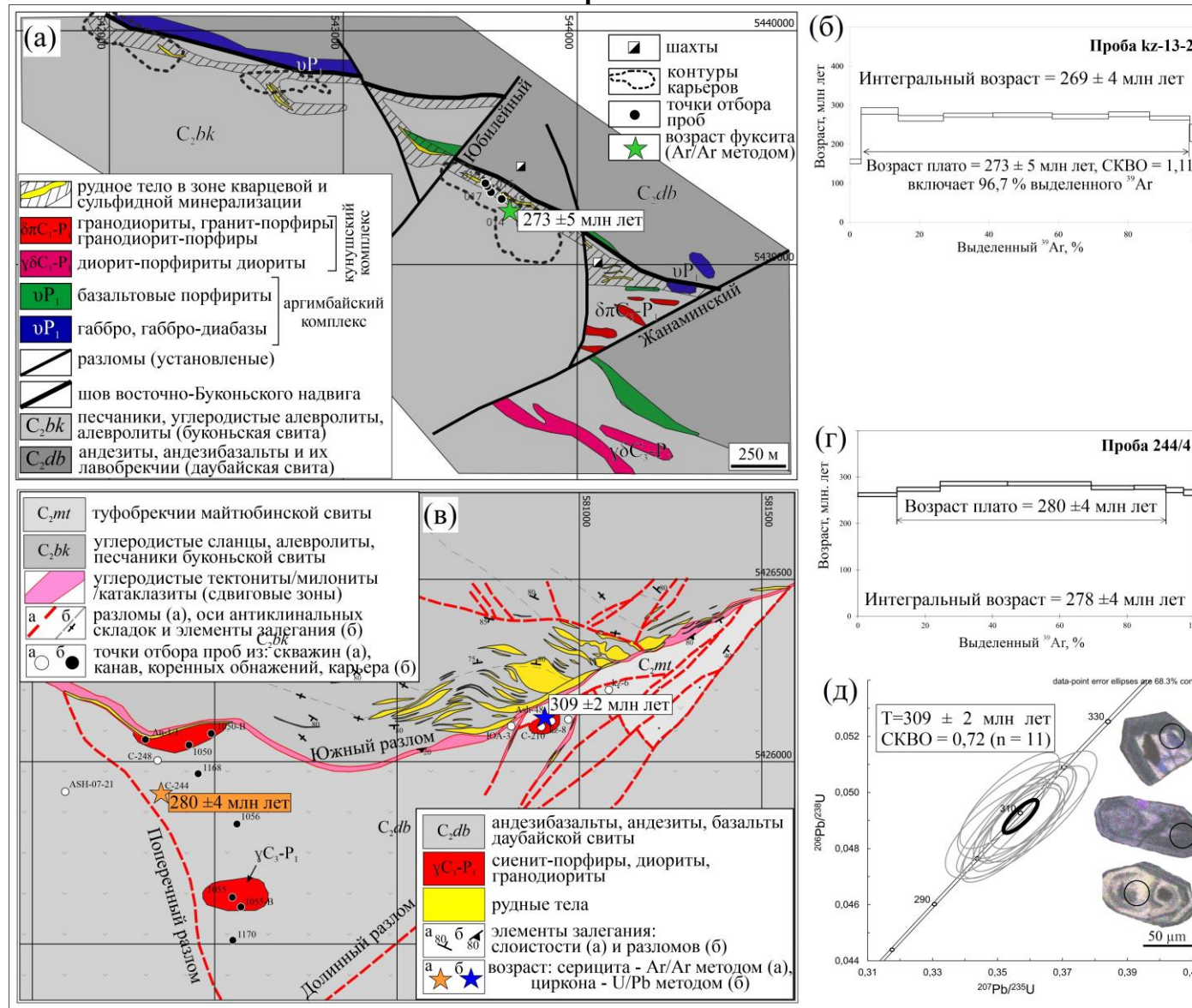


Рис. 8. Геологическое строение и возрастные данные месторождений Васильевское (а-б) и Южные Ашалы (в-д).

Приложение 3

Таблица 1 – Результаты LA-ICP-MS анализа, микроэлементный состав пирита и арсенопирита золоторудного месторождения Южные Ашалы, содержания в г/т.

Разновидность	Значение	Mg	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Ag	Sn	Sb	Te	Ba	Ta	W	Au	Tl	Pb	Bi
Py-Iб (n =	Min	605,1	120,8	46,77	9,5	149,2	229,2	369,7	186,3	19,3	1122,1	19,15	11,2	0,59	129,4	*0,4	152,08	*0,002	0,5	4,0	0,245	292,5	5,57
	Мах	21279,5	4577,0	805,82	633,8	2060,0	581,0	1085,7	385,5	122,8	5294,9	178,50	32,0	7,78	300,3	10,7	2297,72	0,525	51,1	10,6	2,852	4146,7	12,08
	Медиана	1831,8	608,0	111,49	99,0	460,0	392,7	759,8	285,5	27,4	2245,6	34,35	18,1	1,53	248,5	3,3	398,81	0,065	6,2	6,1	1,000	593,9	10,05
	Среднее	4129,8	1650,9	255,72	193,6	686,8	389,2	771,1	294,3	51,2	2551,3	59,54	20,2	2,92	234,9	4,1	781,10	0,192	18,0	6,6	1,130	884,4	9,31
	CO	6063,6	1783,4	276,07	212,0	596,9	107,8	209,2	69,1	38,2	1198,0	51,58	6,8	2,65	58,8	3,4	799,65	0,219	20,3	2,0	0,780	1091,2	2,08
Py-Iв	Min	4,2	43,0	0,14	*0,4	2,0	19,7	85,2	367,3	3,2	150,7	1,76	4,3	*0,05	34,0	0,5	0,30	0,005	0,1	1,3	*0,004	90,1	1,40
	Мах	504,2	1330,9	37,65	92,2	42,4	111,8	478,0	3801,0	69,8	10247,5	43,45	23,9	0,90	113,4	5,7	77,39	0,228	24,3	41,8	0,119	322,6	3,40
	Медиана	51,8	71,6	1,61	0,5	8,5	55,2	157,8	1242,5	8,4	534,0	5,19	8,7	0,13	60,5	1,2	4,61	0,015	0,5	2,9	0,039	190,0	2,42
	Среднее	101,9	230,3	6,50	13,4	12,7	61,8	204,3	1443,1	20,4	1776,3	10,19	11,2	0,23	64,4	1,6	14,97	0,040	3,4	7,5	0,045	181,3	2,36
	CO	167,3	445,5	12,76	32,0	13,2	32,8	129,1	1083,6	25,9	3443,5	13,92	6,6	0,28	26,1	1,7	26,06	0,076	8,4	13,9	0,039	72,6	0,76
Py-II-я	Min	*0,7	124,4	0,30	*0,2	0,3	41,9	216,6	142,2	1,6	1133,9	2,38	0,5	*0,06	16,4	*0,1	0,39	0,009	0,3	8,4	0,011	24,1	0,18
	Мах	380,9	2183,7	15,82	10,6	3,4	509,1	3035,8	3040,6	489,1	73169,6	28,97	161,2	0,53	334,0	6,1	44,68	0,113	2,7	769,1	0,085	561,9	3,95
	Медиана	117,5	603,1	6,57	3,1	1,4	94,6	1298,1	1036,9	108,6	7090,5	7,14	16,6	0,23	127,1	1,8	13,49	0,029	1,0	58,7	0,046	249,2	2,76
	Среднее	128,3	669,5	6,10	3,0	1,5	190,3	1504,5	1104,2	142,1	14740,1	9,45	35,5	0,26	138,5	2,2	15,80	0,045	1,0	167,5	0,046	286,5	2,50
	CO	115,0	608,4	4,29	3,1	1,0	156,5	1022,9	788,8	154,8	21628,3	8,00	47,4	0,16	86,5	1,9	12,21	0,033	0,7	237,6	0,026	177,8	1,12
Py-IIа	Min	8,4	23,5	0,44	*0,4	0,7	54,1	275,8	91,9	9,4	4761,4	0,38	1,8	*0,06	27,3	0,4	0,63	*0,001	0,1	12,3	0,019	31,6	0,32
	Мах	229,8	1888,7	34,54	23,9	2,4	451,5	1158,2	3051,9	2376,3	48417,1	52,60	42,5	0,38	1005,2	3,8	79,93	0,170	2,0	264,5	0,051	262,8	2,83
	Медиана	104,4	294,2	3,79	2,6	1,1	182,8	566,4	1642,3	714,1	18962,4	4,90	7,7	0,20	120,7	1,1	8,95	0,020	0,5	61,6	0,024	202,4	1,60
	Среднее	103,4	454,3	7,90	7,5	1,4	215,3	595,2	1702,3	836,4	24372,2	11,51	13,2	0,21	237,2	1,5	18,89	0,037	0,7	94,6	0,030	173,9	1,62
	CO	67,8	608,1	11,28	10,0	0,7	135,2	268,2	1078,2	812,9	19644,2	17,35	13,4	0,11	322,1	1,2	26,06	0,056	0,7	96,7	0,013	90,9	0,86
Py-IIб	Min	*0,5	11,5	*0,03	*0,3	*0,1	1,2	16,6	10,2	1,3	3844,7	0,40	*0,1	*0,04	1,5	*0,1	0,03	*0,002	0,1	1,4	*0,003	4,7	*0,02
	Мах	530,7	4424,2	171,50	128,7	30,4	215,0	875,7	6616,3	101,5	85494,3	108,63	158,2	1,70	383,4	4,7	213,39	0,502	24,1	1105,2	0,185	459,2	5,39
	Медиана	75,0	544,6	7,97	7,1	1,3	38,4	207,0	54,8	6,4	23642,4	6,39	1,0	0,20	26,1	1,1	10,75	0,046	1,6	17,2	0,034	39,3	0,28
	Среднее	115,5	757,2	21,57	14,6	4,2	64,5	270,3	511,8	19,4	30597,4	18,83	7,8	0,33	53,5	1,3	32,63	0,077	4,9	76,4	0,047	82,7	0,86
	CO	133,7	935,9	35,79	25,7	7,5	60,0	222,0	1322,5	27,0	21260,9	29,62	30,7	0,38	78,4	1,0	49,52	0,106	6,8	215,3	0,047	103,9	1,41
Py-III	Min	34,5	2,0	2,42	22,0	4,8	0,2	76,1	1,1	2,4	4264,2	*0,01	*0,1	*0,05	1,9	*0,2	0,52	*0,001	0,1	0,1	*0,004	5,0	0,18
	Мах	3018,3	4998,5	110,57	553,7	169,9	1606,7	1676,0	259,5	28,4	8802,1	35,92	0,5	1,48	24,0	17,1	240,39	0,242	14,5	1,2	0,325	60,5	1,47
	Медиана	440,5	17,6	9,53	127,7	14,8	5,5	795,5	6,9	3,1	5543,2	0,02	0,1	0,08	6,3	4,4	7,50	0,001	0,1	0,4	0,033	22,9	0,51
	Среднее	950,7	1009,0	34,42	195,8	53,6	325,5	804,7	58,5	8,7	5761,3	7,21	0,2	0,35	9,6	5,4	57,92	0,050	3,0	0,5	0,089	30,7	0,74
	CO	1248,7	2230,2	46,08	206,1	71,0	716,3	604,7	112,6	11,2	1823,9	16,05	0,2	0,63	9,1	6,9	103,33	0,108	6,5	0,4	0,135	23,1	0,54
Apy-I	Min	4,5	4,2	0,19	*0,2	*0,1	0,8	123,1	18,8	0,8	101921,6	*0,16	*0,2	*0,02	53,6	*0,1	0,40	*0,001	0,1	31,8	*0,007	9,4	0,54
	Мах	60611,9	943,5	148,21	860,2	2283,6	421,2	1009,9	975,9	841,4	565715,9	58,00	9,9	3,50	21117,2	497,9	147,15	0,108	2,9	298,6	0,406	295,6	11,44
	Медиана	80,1	209,3	7,61	5,3	1,3	91,4	322,5	57,5	9,5	434940,2	6,12	1,0	0,16	783,1	0,5	16,60	0,021	0,8	190,1	0,058	55,1	2,31
	Среднее	2974,2	294,5	24,05	50,1	111,0	134,2	403,3	146,9	62,5	420063,3	10,64	1,9	0,47	2228,5	28,5	27,80	0,030	1,0	165,7	0,116	70,6	3,63
	CO	13206,9	240,4	36,21	186,7	497,8	121,3	257,5	249,7	185,5	112727,6	13,39	2,6	0,80	4544,1	108,5	36,09	0,028	0,9	74,1	0,124	71,7	3,43

Примечание: Min – минимум; Мах – максимум; CO – стандартное отклонение; n – количество проанализированных точек; «*» – половина предела обнаружения (ППО).