

На правах рукописи

КРЯЖЕВ Сергей Гаврилович

**ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И КРИТЕРИИ ПРОГНОЗА
ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
В УГЛЕРОДИСТО-ТЕРРИГЕННЫХ КОМПЛЕКСАХ**

Специальность: 25.00.11 — геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГУП ЦНИГРИ)

Официальные оппоненты: **Гамянин Геннадий Николаевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории минералогии имени академика Ф.В.Чухрова ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН)».

Горячев Николай Анатольевич, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор ФГБУН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А.Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук (СВКНИИ ДВО РАН)».

Калинин Юрий Александрович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований ФГБУН «Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН)».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова», Геологический факультет. Кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых.

Защита состоится 12 сентября 2017 г., в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 216.016.01 на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГУП ЦНИГРИ)

Адрес: 117545, Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1

С диссертацией можно ознакомиться в геолфонде ФГУП ЦНИГРИ (по адресу: г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1) и на сайте Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» http://www.tsnigri.ru/disser/kryazhev/Kryazhev_dis.pdf

Автореферат разослан «29» июня 2017 г.

И.о. ученого секретаря диссертационного совета

 Барышев А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В углеродисто-терригенных комплексах локализованы крупнейшие золоторудные месторождения России - Сухой Лог, Олимпиадинское, Нежданинское, Майское и др. В них заключено более половины всех запасов золота нашей страны, и именно они определяют генеральное направление производства этого металла на ближайшие десятилетия. Основные перспективы расширения отечественной минерально-сырьевой базы золота в первую очередь связаны с вероятностью обнаружения аналогичных рудных объектов в пределах обширных площадей распространения продуктивных толщ. Поэтому решение вопросов генезиса месторождений данного типа и научное обоснование обстановок их локализации весьма актуальны, поскольку выбор адекватного комплекса прогнозно-поисковых критериев и методов их выявления существенно влияет на результативность поисковых работ. Большое значение имеет также разработка и внедрение новых эффективных поисковых технологий, основанных на современных методах анализа минерального вещества. Опережающее выделение участков с возможной промышленной золотоносностью на больших территориях развития углеродисто-терригенных комплексов по комплексу количественных минералого-геохимических, изотопно-геохимических и термобарогеохимических признаков позволит значительно сократить площади для постановки геологоразведочных работ. Особую актуальность имеет решение проблем предварительной оценки перспектив известных проявлений золота, разбраковки многочисленных геохимических аномалий и прогноза скрытого оруденения.

Состояние проблемы. Происхождение крупных концентраций золота в углеродисто-терригенных комплексах остается предметом постоянных дискуссий, что в первую очередь связано с неоднозначностью оценки роли конседиментационных и эпигенетических процессов в рудообразовании. Предложенные для одного и того же месторождения генетические модели часто охватывают весь возможный диапазон мнений, от ортодоксальной плутоногенно-гидротермальной с признанием коллизионных гранитоидов как единственной рудогенерирующей формации, до осадочно-метаморфогенной при полном отрицании рудогенерирующей роли магматизма. В определенной мере это обусловлено двойственным характером размещения рудных концентраций, которые в большинстве случаев приурочены к определенным литолого-стратиграфическим уровням, но при этом обнаруживают тесную пространственно-временную связь с гранитными массивами и дайками пестрого состава. Поэтому большинством исследователей принята модель полигенно-полихронного рудообразования, включающая первичное накопление золотоносных осадков и последующее перераспределение и концентрирование металла в магматогенно-метаморфогенных системах. Эта модель устраняет существующие противоречия, однако не дает ответ на главные вопросы: насколько

важна роль конседиментационных процессов в формировании крупных месторождений, как искать области первичного рудонакопления на огромных территориях развития черносланцевых толщ, каковы масштабы и условия эффективного перераспределения и концентрирования золота метаморфогенными и магматогенными флюидными системами.

Цель исследований – решение проблемы генезиса золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах на основе изотопно-геохимических и термобарогеохимических данных с разработкой соответствующих прогнозно-поисковых критериев.

Задачи исследований:

1. Определить наиболее информативные изотопно-геохимические и термобарогеохимические показатели, разработать методы их определения и принципы интерпретации аналитических данных.

2. Разработать модели формирования золоторудных месторождений в различных геологических обстановках на основе анализа минералого-геохимической, изотопно-геохимической и термобарогеохимической зональности с учетом пространственно-временных взаимоотношений оруденения с процессами осадконакопления, метаморфизма и магматизма.

3. Выявить возможные источники флюидных компонентов и рудного вещества в рудообразующих системах на основе данных по изотопному составу серы, углерода, кислорода, свинца, аргона и гелия. Оценить вклад мантийных и коровых источников, в первую очередь – пород рудовмещающих углеродисто-терригенных комплексов. Рассмотреть возможность использования изотопных показателей как критериев оценки масштабов оруденения.

4. Обосновать и апробировать комплекс изотопно-геохимических и термобарогеохимических прогнозно-поисковых критериев, в том числе:

- выявить изотопно-геохимические индикаторы обстановок, благоприятных для накопления потенциально продуктивных отложений;
- выявить отличительные признаки рудообразующих флюидных систем, сформировавших крупные золоторудные месторождения.

Фактический материал, методы исследования, личный вклад автора.

В основу работы положены результаты полевых и лабораторных исследований пород и руд крупных золоторудных месторождений Средней Азии (Мурунтау, Кумтор) и Байкало-Патомского нагорья (Сухой Лог, Вернинское, Высочайшее), выполненных лично автором в период с 1984 по 2009 гг. Исследования проводились в рамках ряда госбюджетных и договорных тем, в которых автор принимал участие в качестве ответственного исполнителя.

Месторождения Енисейского кряжа (Олимпиадинское, Советское и др.) изучены на основе представительных коллекций каменного материала, в различные годы отобранного А.М.Гавриловым, О.В.Русиновой, А.П.Глуховым, С.В.Кузнецовой и другими геологами.

Месторождения Верхояно-Колымской провинции изучены по образцам, отобраным С.Ф.Стружковым, В.В.Аристовым, Ч.Х.Арифуловым, М.В.Наталенко, Л.А.Остапенко, О.Б.Рыжовым (ЦНИГРИ), Е.М.Никитенко (ОАО «Рудник им. Матросова»), Н.В.Цымбалюком (ООО «СТАННОЛИТ»). По ряду объектов (Сухой Лог, Наталкинское, Нежданинское и др.) изучен также материал крупнообъемных технологических проб.

Большое значение для понимания особенностей рудообразования в углеродисто-терригенных комплексах составил опыт, полученный автором при изучении золоторудных месторождений в других геологических обстановках (Березовское, Дарасун, Дукат, Зод, Восток-2, Новогоднее-Монто и др.).

Кроме того, в работе учтены и использованы данные из многочисленных отечественных и зарубежных публикаций. Всего с той или иной степенью детальности автором рассмотрены 30 месторождений и рудопроявлений.

Петрографические, минераграфические и рентгеноструктурные исследования проводились автором вместе с С.С.Двуреченской, А.М.Гавриловым и О.В.Русиновой.

Анализы изотопного состава благородных газов и рудного свинца выполнены в ЦИИ ФГУП ВСЕГЕИ. Содержания золота и других элементов определены в Аналитическом центре ФГУП ЦНИГРИ методами ICP MS и ИНАА.

Лично автором осуществлялась постановка цели и задач, специализированное минералогическое картирование горных выработок и керн скважин с отбором минералого-геохимических проб, выполнение изотопных масс-спектрометрических анализов серы, углерода и кислорода, исследование и микротермометрический анализ индивидуальных флюидных включений, разработка методики и проведение валового анализа флюидных включений, интерпретация всех полученных результатов и формулировка выводов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Руды всех крупных золоторудных месторождений по сравнению с породами вмещающих углеродисто-терригенных комплексов характеризуются высокой изотопной гомогенностью серы сульфидов ($\delta^{34}\text{S} \pm 3\%$). Следовательно, привнос золота осуществлялся эндогенными флюидами при обязательном участии серы, что подтверждает представления о ведущей роли этого элемента в гидротермальном транспорте благородного металла. Таким образом, изотопно-геохимическую зональность можно рассматривать как признак инфильтрации золотоносных растворов и использовать для определения их возможного источника.

Поступление серы и золота из эндогенных источников и формирование золото-сульфидных руд происходило как в период осадконакопления, так и синхронно с коллизионным магматизмом.

2. Золоторудные месторождения, образовавшиеся в результате функционирования гидротермально-осадочных палеосистем (сухоложский тип), по условиям локализации и параметрам изотопно-геохимической зональности сопоставимы с колчеданными. Они представлены залежами слоистых, линзовидно-пластовых и послойно-вкрапленных золотоносных пиритовых руд, накопление которых происходило в конседиментационных впадинах вблизи рудоподводящих разломов.

На коллизионном этапе гидротермально-осадочные залежи подвергались частичной регенерации с образованием метаморфогенных прожилково-вкрапленных руд и золотоносных кварцевых жил за счет локального переотложения сульфидов под действием градиента давления. В областях ультраметаморфизма и гранитизации полностью регенерированные гидротермально-осадочные сульфиды могли служить источником золота в плутоно-метаморфических рудообразующих системах.

3. При формировании золоторудных месторождений, парагенетически связанных с коллизионным магматизмом (мурунтауский тип), мобилизация и транспорт рудного вещества осуществлялись флюидами, поступающими из глубинных магматических очагов и наследующими их изотопно-геохимические характеристики. Вещественный вклад углеродисто-терригенных пород как источника серы и золота в таких системах был незначительным. В то же время на размещение месторождений в пределах рудных полей определяющее влияние оказывали активизированные разломы фундамента, что проявлено в закономерном совмещении центров повышенной эндогенной активности конседиментационного и коллизионного этапов.

4. Формирование месторождений происходило в условиях глубинного гидродинамического режима. Эффективный перенос серы и золота осуществлялся в гетерогенной среде независимо от водно-солевого раствора при участии подвижной углекислотно-метановой фазы, поступающей из рудогенерирующего очага. Основной причиной рудоотложения служил распад комплексных соединений золота вследствие связывания серы в сульфидных минералах.

Масштабы оруденения зависят от длительности процесса рудообразования, что отражено в степени насыщенности жильного кварца углекислотно-метановыми включениями.

5. Околорудные изотопно-геохимические и термобарогеохимические ореолы в рудоносных углеродисто-терригенных комплексах являются критериями прогноза скрытых и слабоэродированных месторождений.

На ранней стадии геологоразведочных работ на площади выявляют зоны развития гидротермально-осадочных сульфидов как потенциальные рудные поля.

По результатам изотопного анализа серы выделяют и прослеживают потенциально продуктивные литолого-стратиграфические уровни (участки разреза, характеризующиеся минимальной дисперсией $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов при максимальной обогащенности серы тяжелым изотопом).

В пределах выделенных площадей по сумме содержаний CO_2 и CH_4 в жильном кварце выявляют газогеохимические аномалии. На основе карт распределения $\delta^{34}\text{S}$ и CO_2+CH_4 оконтуривают и ранжируют по степени перспективности поисковые участки. Комплексное использование независимых количественных показателей (например, $\text{CO}_2*\text{CH}_4*\delta^{34}\text{S}$) повышает надежность прогнозных построений.

Научная новизна. Впервые для ряда крупных месторождений четырех золоторудных провинций на целенаправленно подобранном и представительном каменном материале получены и систематизированы данные по геохимии изотопов серы, углерода, кислорода, свинца, гелия и аргона, а также по составу и свойствам флюидных включений. В результате обоснованы генетические модели конкретных рудных объектов, которые служат эталонами при разработке теории рудообразования в углеродисто-терригенных комплексах и являются предметом острых дискуссий – Мурунтау, Сухой Лог, Кумтор, Олимпиадинское и др. Установлены основные источники рудного вещества и рудоносных флюидов, уточнена роль процессов осадконакопления, метаморфизма и магматизма в рудообразовании. Получены доказательства того, что крупные и сверхкрупные золоторудные месторождения в углеродисто-терригенных комплексах не обязательно имеют полигенно-полихронную природу, они могут быть как метаморфизованными эксгаляционно-осадочными (SEDEX), так и плутоногенно-гидротермальными (Intrusion related). При этом выявлены свидетельства пространственного совмещения центров эндогенной активности конседиментационного и коллизионного этапов в крупных рудных полях, что объясняет неоднозначность взаимоотношений разновозрастной минерализации при ее различном вкладе в золотоносность руд. На природных объектах получены экспериментальные доказательства ведущей роли гидросульфидных комплексов в транспорте золота. Предложена модель массопереноса в гетерогенной минералообразующей среде с участием углекислотно-метановой фазы, объясняющая различную подвижность химических элементов во флюидных системах и механизм сосредоточенной инфильтрации золотоносных растворов в условиях глубинного гидродинамического режима.

Практическая значимость заключается в возможности расширении прогнозно-поискового комплекса путем включения эффективных изотопно-геохимических и термобарогеохимических критериев, обеспечивающих выявление и оконтуривание потенциальных рудных полей уже на ранних стадиях геологоразведочных работ, а также позволяющих проводить разбраковку известных рудопроявлений и геохимических аномалий на основе комплекса количественных показателей.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается большим объемом согласующихся фактических данных, полученных при исследовании эталонных месторождений четырех золотоносных провинций комплексом минералого-геохимических, изотопно-геохимических и термобарогеохимических методов. Массив использованной аналитической информации включает более 1 тыс. изотопных определений, свыше 1 тыс. микротермометрических измерений, 180 анализов состава включений. Изучено более 500 шлифов и аншлифов.

Результаты исследований докладывались автором:

- на XV–XXI Симпозиумах по геохимии изотопов (1998–2016 гг);
- на XIII–XVI конференциях по термобарогеохимии (2008–2014 гг);
- на годичной сессии МО РМО «Роль минералогии в познании процессов рудообразования», ИГЕМ РАН, 2007; на Всероссийских конференциях «Проблемы геологии рудных месторождений, минералогии, петрологии и геохимии», ИГЕМ РАН, 2008; «Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования», ИГЕМ РАН, 2010; «Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований», ИГЕМ РАН, 2010; «Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений», ИГЕМ РАН, 2013; на научно-практических конференциях «Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири» СНИИГГиМС, 2014; «Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных и цветных металлов — состояние и перспективы», 2015-2016 гг.

Разработанные прогнозно-поисковые критерии апробированы при проведении геологоразведочных работ на поисковых площадях в Иркутской области и Чукотском АО.

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 60 научных работ, в том числе 2 монографии (одна в соавторстве) и 20 статей в журналах, включенных в Перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация общим объемом 288 стр. состоит из введения, пяти глав, заключения, 82 рисунков и фотографий, 56 таблиц, сопровождается списком литературы из 295 источников.

Во введении отмечена актуальность работы, определены цель и задачи исследования.

В 1-й главе кратко рассмотрены современные представления о генезисе, условиях локализации и составе руд золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах, основанные на результатах комплексных исследований практически всех месторождений России и ближнего зарубежья и изложенные в работах Ч.Х.Арифурова, А.С.Борисенко, Н.С.Бортникова, В.А.Буряка, Б.Я.Вихтера, А.В.Волкова, А.М.Гаврилова, Г.Н.Гамянина, А.Д.Генкина, В.И.Гончарова, Д.И.Горжевского, Н.А.Горячева, Н.М.Заири, П.Ф.Иванкина, А.И.Иванова,

М.М.Константинова, А.Ф.Коробейникова, Н.К.Курбанова, В.А.Нарсеева, Ю.И.Новожилова, В.Ю.Прокофьева, Ю.Г.Сафонова, А.А.Сидорова, С.Г.Соловьева, Н.А.Фогельман, С.Д.Шера, В.М.Яновского и многих других геологов.

В углеродисто-терригенных толщах выделяются две группы месторождений, которые рассматриваются либо как рудные формации, либо как субформации и соответствующие им геолого-промышленные типы в рамках единой золото-углеродистой формации. *Золото-сульфидные* месторождения (Кумтор, Олимпиадинское, Даугызтау, Кокпатас, Бакырчик, Нежданинское, Сухой Лог, Вернинское и др.) представлены жильно-прожилковыми зонами, залежами и штокверками с пирит-(пирротин)-арсенопиритовой минерализацией, содержащей субмикроскопическое, реже свободное золото. В *золото-кварцевых* месторождениях (Мурунтау, Наталкинское, Советское и др.) при относительно низком количестве сульфидов преобладает свободное золото. В зарубежной литературе перечисленные месторождения классифицируются как «орогенные» (ogogenic) мезотермальные (мезозональные), сформировавшиеся в условиях относительно высоких давлений (1–3 кбар) и температур (200–400°C) вдоль конвергентных окраин при аккреции или коллизии террейнов (Groves et al., 1998; Ridley, Diamond, 2000; Goldfarb et al., 2005).

В отечественных публикациях отмечена закономерная приуроченность рассматриваемой группы золоторудных месторождений к осадочным формациям, сформированным в обстановках шельфа и континентального склона пассивных окраин: молассоидной, флишоидной, аспидной. При всем многообразии состава и внутреннего строения рудовмещающих толщ их объединяет обязательное присутствие углеродисто-терригенных пород при переменной роли карбонатных и вулканогенных разностей, что позволяет выделять рудовмещающие формации в целом как *углеродисто-терригенные комплексы*.

Золоторудные месторождения не обнаруживают предпочтительной приуроченности к толщам какого-либо определенного возраста и к подстилающим формациям определенного состава. Вместе с тем в каждой золоторудной провинции отмечается закономерная локализация месторождений в относительно узких интервалах разреза, которые выделяются как продуктивные литолого-стратиграфические уровни. По характеру переслаивания, ритмичности, мощности, гранулометрии осадков породы этих уровней в целом весьма разнообразны. Они не отличаются от безрудных толщ по содержанию углеродистого вещества (от десятых долей процента до первых процентов) и мало отличаются от подстилающих или перекрывающих толщ по содержанию «фоновое» золота (преимущественно от 3–5 до 5–7 мг/т). Значительное повышение «фоновых» содержаний золота (до сотых, реже десятых долей г/т) является признаком рудных полей.

В большинстве случаев доказана пространственно-временная связь оруденения с коллизионным (орогенным) магматизмом, преимущественно с поздне-постколлизионными (позднеорогенными) гранитоидами, комплексами малых

интрузий и даек пестрого состава габбро-диорит-гранодиоритовой формации. При этом на ряде месторождений установлено присутствие конседиментационной гидротермально-осадочной сульфидной минерализации, несущей повышенные содержания золота.

В зависимости от той роли, которую исследователи отводят первичному обогащению осадков золотом, рудогенетические концепции разделяются на гидротермально-осадочную (с последующей частичной или полной регенерацией руд), метаморфогенно-гидротермальную (с концентрированием рассеянного золота из значительных объемов пород), плутоногенно-гидротермальную (допускающую влияние структурно-вещественных особенностей углеродисто-терригенных толщ на локализацию оруденения) и полигенно-полихронную как сочетание нескольких из перечисленных рудообразующих факторов.

На дискуссионность и неоднозначность применения той или иной модели к конкретному рудному объекту указывает то, что в качестве эталонов авторы различных концепций приводят одни и те же месторождения. Показательно в этом отношении месторождение Мурунтау. Решение данной проблемы невозможно без определения главных источников золота в рудообразующих системах, что определило одно из основных направлений диссертационного исследования.

2-я глава посвящена методологии исследования. Описаны использованные автором методы и методики изотопно-геохимического и термобарогеохимического анализа. Отдельное внимание уделено способам оценки давления по флюидным включениям и изотопам серы как потенциальным индикаторам источников рудного вещества. Обобщены данные по изотопному составу серы пород и руд крупных золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах. На основе интерпретации этих данных сформулировано 1-е защищаемое положение.

В 3-й главе представлены геолого-генетические модели изученных автором эталонных золоторудных месторождений Байкало-Патомского нагорья (Сухой Лог, Вернинское, Высочайшее), Центрально-Колымского региона (Наталка, Дегдекан и др.), Енисейского края (Олимпиадинское, Советское и др.) и Средней Азии (Мурунтау, Кумтор и др.). Охарактеризованы особенности геологического строения объектов, вещественный состав руд, параметры изотопно-геохимической зональности, состав и свойства флюидных включений. По результатам исследований сформулированы 2-е и 3-е защищаемые положения.

В 4-й главе обобщены результаты выполненных автором термобарогеохимических исследований. Сопоставлены диапазоны температур и давлений, осуществлен поиск факторов, определяющих золотоносность флюидных систем. Выявлены источники газовых компонентов флюида. Рассмотрены вероятные причины рудоотложения. Предложена модель массопереноса в термостатированной гетерогенной минералообразующей среде (4-е защищаемое положение).

5-я глава включает формулировку прогнозно-поисковых изотопно-геохимических и термобарогеохимических критериев, результаты их апробации при

геологоразведочных работах и рекомендации по совершенствованию прогнозно-поискового комплекса (5-е защищаемое положение).

В заключении изложены основные выводы диссертационного исследования.

Благодарности. Выполненная работа не могла состояться без многолетней активной поддержки руководства института ЦНИГРИ. Автор глубоко признателен И.Ф.Мигачеву, А.И.Кривцову, Б.К.Михайлову, А.И.Иванову, С.С.Вартаняну за постоянную всестороннюю помощь, консультации и конструктивные советы. Автор искренне благодарит Н.М.Заири, инициатора, идейного вдохновителя и организатора проведенных исследований.

Долгие годы автор находится в творческом содружестве с С.Г.Соловьевым, энциклопедические знания которого и огромный практический опыт изучения рудных месторождений автор с благодарностью использовал в процессе своих исследований.

Большую благодарность автор выражает Ю.В.Васюте за высокий профессионализм и повседневный кропотливый труд, без которого выполнение валовых анализов включений было бы невозможно.

Автор благодарит руководство ЗАО «Полнос» за предоставленную возможность работы на подведомственных территориях. Особую благодарность он выражает Генеральному директору ОАО «Высочайший» С.А.Васильеву, главному геологу ООО «ЛЗРК» В.Г.Мартыненко, Генеральному директору ООО «Артель старателей Чукотка» Н.Н.Ларкину, которые любезно предоставили все необходимые геологические материалы и оказали неоценимую помощь в выполнении полевых исследований. При изучении месторождения Мурунтау автор пользовался помощью и поддержкой со стороны руководителей и сотрудников геологических организаций Республики Узбекистан: Р.В.Цоя, И.М.Голованова, Г.В.Касавченко, Ю.Н.Шашорина и многих других.

Неоценимую помощь при минералого-петрографических исследованиях оказали С.С.Двуреченская, А.М.Гаврилов и О.В.Русинова. Автор благодарит Ю.А.Костицына, В.А.Гриненко, В.И.Устинова, Э.М.Прасолова, М.И.Розинова, С.А.Сергеева, Р.Ш.Крымского за плодотворное обсуждение проблем изотопной геологии, Г.В.Ручкина и В.В.Масленникова за ценные консультации по вопросам генезиса колчеданных руд. Автор выражает благодарность всем сотрудникам отдела минералогии и изотопной геохимии ФГУП ЦНИГРИ, вложившим большой труд в подготовку проб для исследований.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Положение 1. Руды всех крупных золоторудных месторождений по сравнению с породами вмещающих углеродисто-терригенных комплексов характеризуются высокой изотопной гомогенностью серы сульфидов ($\delta^{34}S \pm 3\%$). Следовательно, привнос золота осуществлялся эндогенными флюидами при обязательном участии серы, что подтверждает представления о ведущей роли этого элемента в гидротермальном транспорте благородного металла. Таким образом, изотопно-геохимическую зональность можно рассматривать как признак инфильтрации золотоносных растворов и использовать для определения их возможного источника.

Поступление серы и золота из эндогенных источников и формирование золото-сульфидных руд происходило как в период осадконакопления, так и синхронно с коллизионным магматизмом.

Как было отмечено выше, генезис любого месторождения в углеродисто-терригенных комплексах остается дискуссионным без определения основных источников золота. Автор предлагает максимально приблизиться к решению данной проблемы путем изучения распределения изотопов серы – элемента, без которого в восстановительной среде при относительно низких температурах (400–200°C) в гидротермальных системах невозможен эффективный транспорт благородного металла (Pokrovski et al., 2014; и ссылки в этой работе). Предположение об общности геохимической истории серы и золота при формировании золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах подтверждается наличием в рудах субмикроскопического золота, сингенетичного с сульфидами (Генкин и др., 2002; Новожилов, Гаврилов, 1999; и др.).

Научно-методические основы интерпретации изотопных данных автор изучил по работам (Гриненко, Гриненко, 1974; Виноградов В.И., 1980; Омото, Рай, 1982). Изотопный состав серы выражают величиной $\delta^{34}\text{S}$, которая показывает степень его отклонения от серы метеоритов, в которой $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}=22.22$. Точность определения $\delta^{34}\text{S}$ составляет $\pm 0.2\%$, а геохимически значимыми считаются вариации более 1%.

Изотопный состав серы в мантии и в глубинных магмах близко соответствует метеоритному ($\delta^{34}\text{S} = 0 \pm 3\%$). Главной причиной вариаций изотопного состава серы в природе является восстановление сульфатных ионов анаэробными бактериями, живущими в морских отложениях. Эти бактерии выделяют H_2S , обогащенный ^{32}S относительно сульфата. В результате осадочно-диагенетические сульфиды, генетически связанные с этим сероводородом, характеризуются отрицательными значениями $\delta^{34}\text{S}$ (от 0 до -30%), а в морской воде и в эвапоритах накапливается тяжелый изотоп ^{34}S . Морской сульфат может восстанавливаться до H_2S термохимическим путем в гидротермально-осадочных системах с обогащением пород изотопно-тяжелыми сульфидами. Сера из всех перечисленных источников в различных пропорциях может поступать в рудообразующие гидротермальные системы путем ее заимствования из осадочных толщ магмами или флюидами.

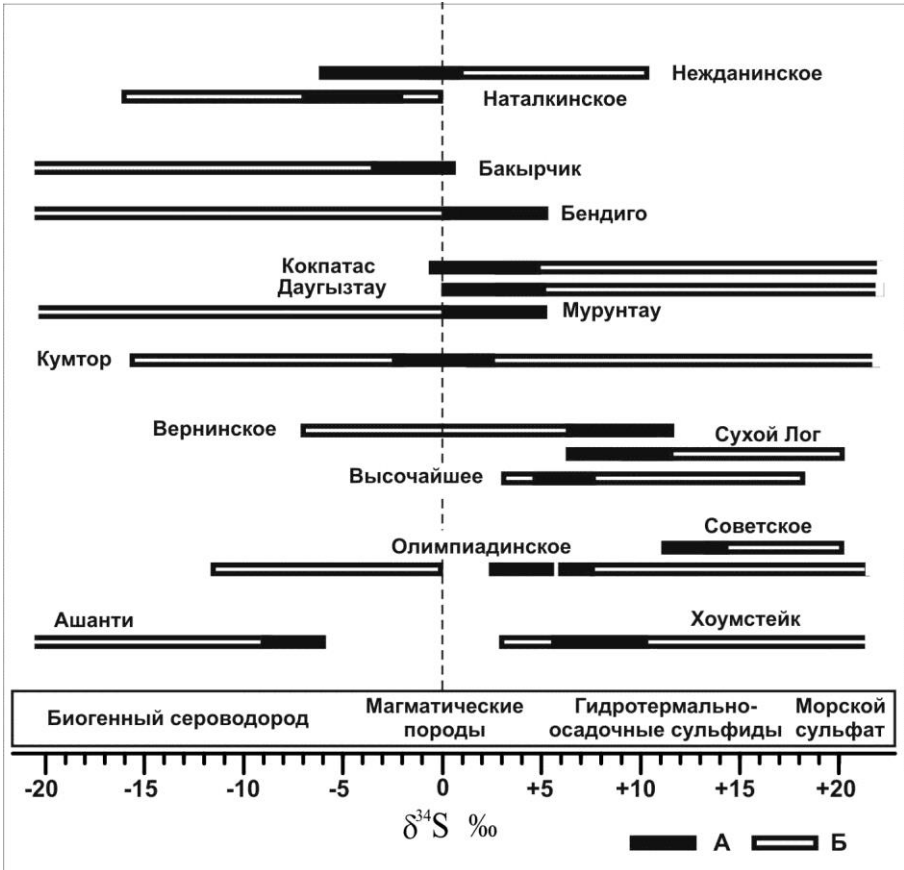
Поскольку процессы смешения могут породить серу самого разнообразного изотопного состава, сами по себе измеренные значения $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ (и величина $\delta^{34}\text{S}$), как и любые другие типоморфные отношения элементов (Rb/Sr, Co/Ni и т.п.), не дают достаточных оснований для генетических выводов без информации о происхождении проанализированного минерала и его окружении. Поэтому при изучении процессов рудообразования важны не столько абсолютные значения $\delta^{34}\text{S}$ в образце, сколько закономерности изменения этой величины в пространстве-времени, т.е. **изотопно-геохимическая зональность** рудных тел, месторождений и рудных полей.

В восстановительной среде углеродистых пород вся сера находится в форме H_2S , поэтому измеряемые значения $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов отражают изотопный состав серы гидротермальных растворов ($\delta^{34}\text{S}_{\text{сульфид}} \cong \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} \cong \delta^{34}\text{S}_{\text{флюид}}$) и могут служить характеристикой изотопного состава источников серы (Heinrich, Eadington, 1986; Омото Х., Рай, 1982). В качестве возможных источников автор в первую очередь рассматривает два: (1) – сульфиды в породах конкретной рудовмещающей формации (доступные для непосредственного анализа) и (2) – эндогенные флюиды. Общим признаком последних является изотопная гомогенность серы, обусловленная ее интенсивным перемешиванием в условиях высоких температур в магмах и/или на путях миграции гидротермальных растворов.

Отношение $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ в закрытой системе является постоянной величиной. Любое изменение $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов всегда является следствием привноса-выноса вещества (а повышение – только привноса). Другими словами, поступление «инородной» серы и золота из внешнего источника, отличающегося по изотопному составу серы, неизбежно должно сопровождаться формированием изотопно-геохимической зональности. Последняя является частным проявлением инфильтрационного метасоматизма (по Д.С.Коржинскому). Поскольку золото в гидротермальных растворах количественно является резко подчиненным компонентом, транспорт его значительных масс должен быть связан с перемещением большого количества серы, что неминуемо отразится в изотопно-геохимических особенностях оруденения.

На рисунке 1 показаны диапазоны вариаций $\delta^{34}\text{S}$ для некоторых наиболее полно изученных месторождений различного возраста, локализованных в углеродисто-терригенных комплексах (по каждому месторождению выполнены десятки и сотни определений). Независимо от взглядов на генезис оруденения для всех объектов характерна общая закономерность, которая служит экспериментальным подтверждением изложенных выше теоретических положений. По сравнению с вмещающими породами руды содержат более изотопно-гомогенную серу, вариации $\delta^{34}\text{S}$ золотоносных сульфидов не превышают 6‰ даже при наличии нескольких стадий и этапов оруденения. Эта особенность может являться следствием поступления серы и золота в руды из общего гомогенного источника (например, магматического очага), либо следствием гомогенизации серы в процессе масштабной миграции рудоносных флюидов.

В породах же, как видно, сохраняются первично-осадочные изотопно-геохимические неоднородности. Причем эти неоднородности присутствуют и в многочисленных реликтах неизмененных пород в рудных телах, что исключает предположение о наложенном характере самородного золота по отношению к сульфидам продуктивных (по Н.В.Петровской) ассоциаций.



Использованы данные из работ: Гамянин, Бортников, Алпатов, 2000; Константинов, 2009; Гончаров, Ворошин, Сидоров, 2002; Заири, 1992; Гаврилов, Гриненко, 1980; Jia, Li, Kerrich, 2001; Oberthuer, Mumm, Votter et al., 1996; Rye D., Rye R., 1974; Заири, Шер, Стрижов и др., 1977; Дистлер, Митрофанов, Немеров, 1996; Константинов, Косовец, Кряжев и др., 2002; Chang, Large, Maslennikov, 2008; Русинов, Русинова, Кряжев и др., 2008; Кряжев, Устинов, Гриненко, 2009; Дубинина, Иконникова, Чугаев, 2010; Кряжев, Ганжа, Двуреченская, 2010; Кряжев и др., 2003; Кряжев, 2002; Кряжев, 2007; Кряжев, 2016⁶.

Рис. 1. Диапазоны вариаций изотопного состава серы сульфидов в рудах (А) и во вмещающих породах (Б) золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах (Кряжев, 2017).

Следует также отметить, что в большинстве случаев по изотопным данным сера в рудах не могла быть получена путем «усреднения» серы из вмещающих пород. Следовательно, она была привнесена из внешних по отношению к месторождениям источников. Судя по приближению значений $\delta^{34}\text{S}$ к «метеоритному» уровню – из источников преимущественно глубинной природы.

Таким образом, закономерная геохимическая связь серы и золота при формировании его месторождений, очевидная для сульфидных руд с субмикроскопическим золотом, на изотопном уровне подтверждается для всех золото-сульфидных и золото-кварцевых месторождений. Общий характер выявленной закономерности, которая согласуется с существующими экспериментальными и термодинамическими данными, позволяет утверждать, что привнос золота в руды инфильтрационными потоками флюидов должен быть обязательно проявлен в изотопно-геохимической зональности. В осевой (золотоносной) зоне $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов определяется источником рудоносных растворов, во внешней – вмещающей средой. Отсутствие зональности, даже при наличии рассланцевания, прожилков, изменений минеральных форм серы, свидетельствует о метаморфической природе эпигенетических процессов.

Все сказанное в целом справедливо и в отношении изотопов углерода (Галимов, 1968, 1973; Омото, Рай, 1982; Кулешов, 1986) и кислорода (Тейлор, 1982), которые мы использовали в качестве дополнительных элементов-индикаторов.

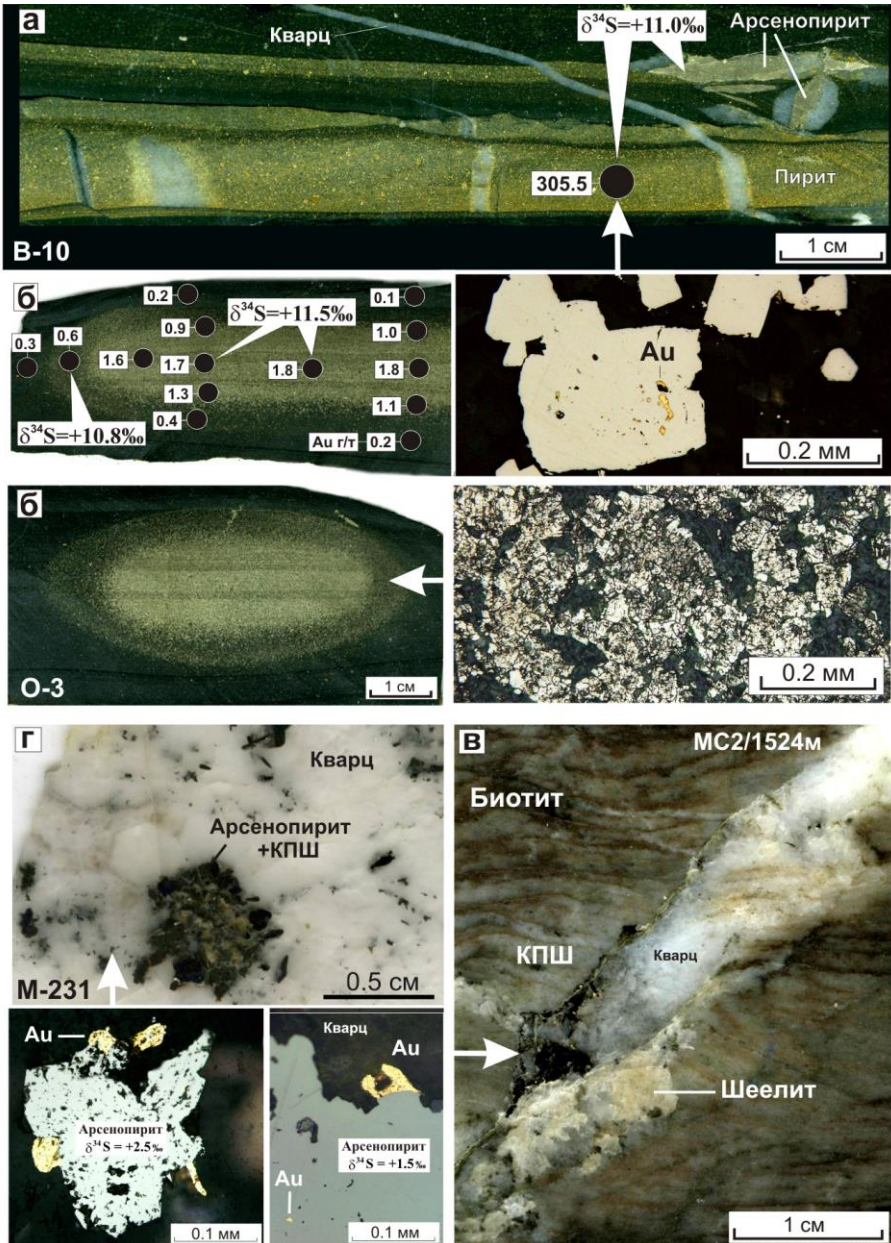
Рассмотрим два примера применения предлагаемого методологического подхода для определения источников рудного вещества (рис. 2).

На рисунке 2а,б представлены типичные осадочно-диагенетические образования, широко распространенные на Вернинском месторождении (С.Д.Шер и др., 1984ф, образцы из коллекции Г.Б.Ганжи). «Облачное» скопление пирита имеет отчетливо диагенетическую природу (видны следы слоистости) и по данным радиохимического анализа точечных проб содержит равномерно распределенную примесь Au (до 2 г/т). Видимые в оптический микроскоп ($> 1\text{мкм}$) выделения самородного золота в пирите нами не обнаружены. По представлениям Н.В.Петровской, подобное распределение золота является наиболее убедительным признаком его сингенетичного с сульфидами характера. Вмещающая порода сложена кварцем (25%), калиевой диоктаэдрической слюдой (35%) и карбонатом анкерит-доломитового ряда (40%). Присутствует примесь $\text{C}_{\text{орг}}$ (до 1 мас. %).

В слоистых рудах (см. рис. 2б) пирит-карбонатные прослои перемежаются с углеродистыми ($\text{C}_{\text{орг}}$ 2.3 мас.%) кварц-слюдистыми сланцами с небольшой примесью карбоната. Самородное золото образует сингенетичные микровключения в центральных зонах кристаллов пирита, содержание Au в слое по данным ICP MS составило 305.5 г/т.

По изотопному составу серы обе разновидности пирита не различаются. Одинаковыми оказались и изотопно-геохимические характеристики карбонатов: ($\delta^{13}\text{C} = -5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = +19.0\text{‰}$).

Таким образом, в рассматриваемом случае прослои и «облачные» конкреционные стяжения пирита формировались на границе вода-осадок, а также в толще нелитифицированного осадка при участии единого золотоносного гидротермального раствора с $\delta^{34}\text{S} = +11 \pm 0.5\text{‰}$.



а – пересечение слоистых золото-пиритовых руд кварцевыми прожилками;
б – конкреционное стяжение пирита с субмикроскопическим сингенетичным золотом.
Кружками отмечены места отбора точечных проб, рядом указаны содержания Au.

Рис. 2. Золото-сульфидная минерализация месторождений Вернинское (а, б), Мурунтау (в, г)

Обогащение слоистых руд золотом теоретически можно связать с дополнительным привнесом металла при образовании кварцевых прожилков. Однако при этом придется допустить, что золото в значительном количестве транспортировалось без участия воды (не изменился изотопный состав кислорода карбоната), углекислоты (не изменился изотопный состав углерода карбоната) и серы (не изменился изотопный состав пирита и новообразованного арсенопирита). Следует также отметить полное отсутствие каких-либо метасоматических изменений вблизи прожилков и в образце в целом (по минеральному составу порода идентична обычным сланцам месторождения). Поэтому в данном конкретном случае первично высокие концентрации сингенетического Au в слоистых рудах, по мнению автора, являются наиболее вероятными.

На рис. 2 в, г приведены фотографии типичных золотоносных образований месторождения Мурунтау. Изохронный Rb-Sr возраст калишпат-кварцевых метасоматитов с шеелит-золото-сульфидной минерализацией (рис. 2в) составляет 272.6 ± 3.8 млн. лет (Костицын, 1994), золото-арсенопирит-калишпат-кварцевой жилы (обр.М231, рис. 2г) 230.2 ± 3.5 млн. лет (Костицын, 1993). Время их формирования отвечает завершающим фазам коллизионного (Соловьев, 2014) магматизма, которые на месторождении проявлены в форме многочисленных даек субщелочных гранитоидов (274.1 ± 3.9 млн лет., Костицын, 1996) и лампрофиров (256–247 млн. лет, Кряжев, 2002).

Доказательствами парагенетической связи рудоносных растворов с магматическими породами служат не только близость их Rb-Sr возрастов, но и идентичность изотопно-геохимических параметров ($\delta^{34}\text{S} +2.5 \pm 1.5\%$, $\delta^{18}\text{O} = +7 \pm 1\%$). В арсенопирите из обр.М231 нами установлен также «магматогенный» свинец.

Во вмещающих углеродисто-терригенных биотитизированных породах содержится изотопно-легкий пирротин ($\delta^{34}\text{S} -0.5 \dots -3.5\%$, Au < 0.01 мкг/г). Заимствование серы и золота из этих пород при рудообразовании практически исключено.

Для доказательства *реальности* процессов конседиментационного или гидротермально-метасоматического рудообразования достаточно представленных образцов. Однако для доказательства *отсутствия* других источников золота в месторождениях необходимы обширные и детальные минералого-геохимические исследования с анализом изотопно-геохимической зональности в масштабе рудных тел и месторождений. Этому посвящены два следующих защищаемых положения.

В заключение следует отметить, что изотопная гомогенность серы в рудах крупных месторождений не может служить основанием для использования этого признака как критерия масштаба оруденения, она является следствием *транспорта* золота эндогенными флюидами от источника металла к участкам его накопления.

Положение 2. Золоторудные месторождения, образовавшиеся в результате функционирования гидротермально-осадочных палеосистем (сухоложский тип), по условиям локализации и параметрам изотопно-геохимической зональности сопоставимы с колчеданными. Они представлены залежами слоистых, линзовидно-пластовых и послойно-вкрапленных золотоносных пиритовых руд, накопление которых происходило в конседиментационных впадинах вблизи рудоподводящих разломов.

На коллизионном этапе гидротермально-осадочные залежи подвергались частичной регенерации с образованием метаморфогенных прожилково-вкрапленных руд и золотоносных кварцевых жил за счет локального переотложения сульфидов под действием градиента давления. В областях ультраметаморфизма и гранитизации полностью регенерированные гидротермально-осадочные сульфиды могли служить источником золота в плутоно-метаморфических рудообразующих системах.

Модель гидротермально-осадочного рудообразования рассмотрена нами главным образом на примере крупнейшего в России золото-сульфидного месторождения Сухой Лог и его аналогов – месторождений Вернинское и Высочайшее. Месторождения расположены в северной части Бодайбинского (Ленского) рудного района Байкало-Патомской золотоносной провинции. Они представлены стратоидными зонами прожилково-вкрапленной сульфидной и сульфидно-кварцевой минерализации в породах углеродисто-карбонатно-терригенной формации верхнего протерозоя (Ленский..., 1971; Буряк, 1982; Иванов и др., 1995; Буряк, Хмелевская, 1997; Лаверов и др., 2000; Вуд, Попов, 2006; Карпенко и др., 2006; Иванов, 2014; и др.) На примере месторождения Сухой Лог и его аналогов была разработана модель метаморфогенно-гидротермального рудообразования (Буряк, 1982), которая в том или ином варианте и сейчас принимается многими исследователями. Догранитный возраст руд (439–447 млн. лет) и сингранитный возраст (около 320 млн.лет) кварцевых жил (в большинстве своем безрудных), предполагаемый по геологическим наблюдениям, подтвержден современными геохронологическими методами (Чугаев, 2007; Юдовская и др., 2011). Сухоложские руды, таким образом, были окончательно сформированы на этапе линейного складкообразования до зонального регионального метаморфизма, гранито-гнейсовых куполов (430–405 млн.лет) и последующего внедрения коллизионных гранитоидов (Иванов, 2014). Именно поэтому золото-сульфидные месторождения Ленского золотоносного района можно с полным основанием считать эталонами объектов, сформированных в обстановках осадконакопления, диагенеза и зеленосланцевого метаморфизма. Предполагается поступление золота из магматических, в т.ч. мантийных источников (Заири и др., 1977; Дистлер и др., 1996; Юдовская и др., 2011; Иванов, 2014).

При этом в рудах рассматриваемых месторождений присутствует золотоносный гидротермально-осадочный пирит (см. рис. 2а,б). Вопрос заключается в количестве первично-осадочного и привнесенного на коллизионном этапе золота. Он решается нами на основе анализа изотопно-геохимической зональности месторождения Сухой Лог.

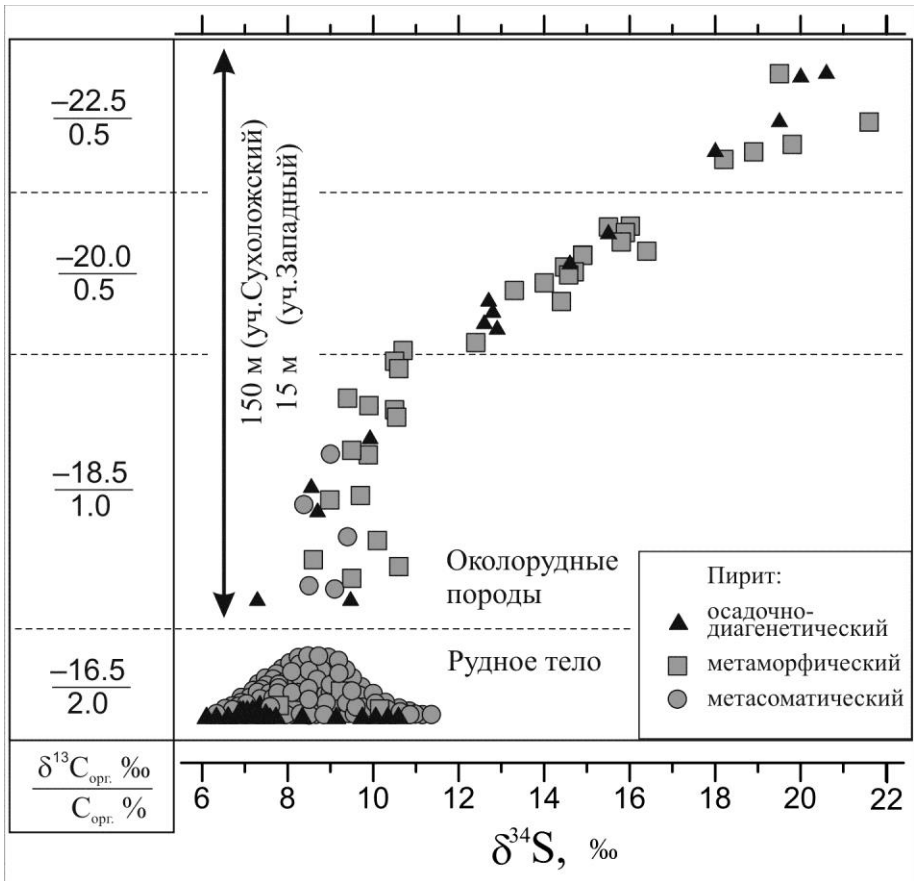
На месторождении Сухой Лог выделяются три главных морфогенетических типа пирита (Шер и др., 1984ф; Буряк Хмелевская, 1997; Large et al., 2007; Русинов и др., 2008): (1) - *осадочно-диагенетический* (рассеянные в породах глобулы и фрамбоиды, конкреции, массивные и слоистые линзовидно-пластовые тела); (2) - *метаморфический* (преимущественно метакристаллы, образующиеся путем собирательной перекристаллизации рассеянного пирита) и (3) – *метасоматический*, который ассоциирует с кварцем и входит в состав кварцевых прожилков и жил.

На месторождении Сухой Лог широко распространены вкрапленность и конкреции осадочно-диагенетического пирита. Кроме того, присутствуют серноколчеданные тела значительных размеров. В.В.Масленниковым (устное сообщение) в разрезе скважины №1 был отмечен 10-метровый интервал практически сплошных тонкослоистых пиритовых руд с субмикроскопическим золотом. При первичной документации керна (1962 г.) порода была описана как слоистый коричневый алевролит, содержания Au по опробованию - до 4.5 г/т.

Нами на западном фланге месторождения (карьер уч. Западный) была изучена слоистая серноколчеданная залежь общей мощностью около 15 м и протяженностью свыше 100 м. Она сложена серией послонных скоплений пирита разной густоты (вплоть до массивных) мощностью до 2-3 см, которые, как и на месторождении Вернинское (Шер, 1984ф, см. рис. 2а), прослеживаются на десятки метров, мало изменяясь по мощности и густоте насыщения. В замках микроскладок послонные скопления изгибаются вместе с вмещающими их слоями и разбиваются кливажем. Пирит представлен мелкокристаллическими выделениями. В верхней части залежи он находится в виде отдельных конкреций и вкрапленности. Содержания Au в пирите растут сверху вниз от 0.5 до 15 г/т.

В центральной части месторождения (Сухоложский участок) золотоносность подобных образований увеличивается на порядок (до 350 г/т по Буряку и Хмелевской (1997), до 330 г/т по нашим данным). Близкие концентрации золота установлены в глобулярном пирите, рассеянном во вмещающих породах (Шер и др., 1984ф; Ганжа, Развозжаева, 2014), но *только в пределах месторождений* (на флангах рудных полей они снижаются до 0.5–2 г/т).

Распределение изотопов серы в осадочно-диагенетическом пирите независимо от форм его нахождения подчиняется единой изотопно-геохимической зональности: в нижней части разреза значения $\delta^{34}\text{S}$ составляют $+8.5\pm 2.5\%$, выше монотонно увеличиваются до $+21\%$ (рис. 3).



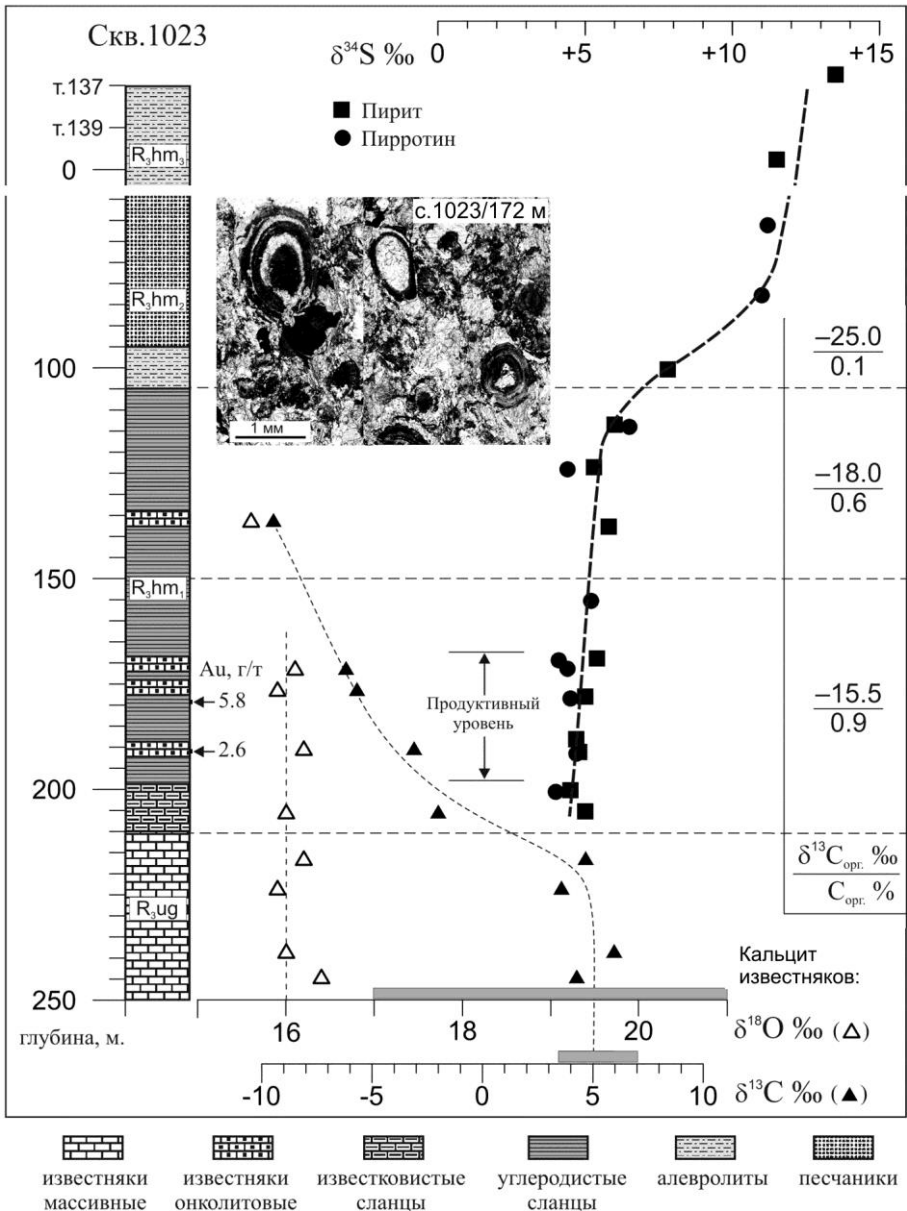
По работам: Заири, Шер, Стрижов и др., 1977; Дистлер, Митрофанов, Немеров и др., 1996; Константинов, Косолец, Кряжев и др., 2002; Русинов, Русинова, Кряжев и др., 2008; Кряжев, Устинов, Гриненко, 2009. Слева – средние (по литопачкам) характеристики углеродистого вещества в породах Сухоложского участка.

Рис. 3. Изотопно-геохимическая зональность в разрезе месторождения Сухой Лог.

Вертикальный «размах» этой зональности снижается от 150 м в центральной наиболее богатой части месторождения до 15 м на фланге.

Аналогичная изотопно-геохимическая зональность выявлена на месторождении Высочайшее (рис. 4). Причем в обоих случаях параллельно с ростом $\delta^{34}\text{S}$ наблюдается закономерное изменение изотопного состава углерода рассеянного в породах органического вещества, что является дополнительным указанием связи выявленного распределения изотопов серы с условиями осадконакопления.

На Вернинском месторождении изотопно-геохимическая зональность существенно отличается (Кряжев и др., 2010).



Справа – средние характеристики углеродистого вещества в породах выделенных пачек. Серыми прямоугольниками показаны изотопные характеристики известняков в фоновом разрезе данного стратиграфического уровня (по Покровскому и др., 2006).

Рис. 4. Изотопно-геохимическая зональность в разрезе скважины 1023 (месторождение Высочайшее).

Золотоносный осадочно-диагенетический пирит в рудных телах характеризуется тем же интервалом $\delta^{34}\text{S}$, что и пирит в рудах Сухого Лога (от +6 до +11.5%). Однако в перекрывающих углеродистых сланцах средней подсвиты аунакитской свиты значения $\delta^{34}\text{S}$ пирита достаточно резко снижаются (до -7.5%), одновременно падает его золотоносность. Эта инверсия, вероятно, связана с коренной перестройкой бассейна в аунакитское время (Ленский...1971; Иванов, 2014).

Выявленные элементы изотопно-геохимической зональности характерны для месторождений колчеданного семейства (Гриненко, Гриненко, 1974; Заири, 1985; Ковалев и др., 1991; Gadd et al., 2017), а также для современных гидротермально-осадочных систем (Виноградов, 1980). Данная в целом фундаментальная закономерность главным образом обусловлена разбавлением, снижением температуры эндогенных гидротермальных растворов по мере удаления от подводящих каналов (а также по мере затухания эндогенной активности во времени) и ростом доли сероводорода, возникающего за счет термохимического восстановления морского сульфата или биогенной сульфатредукции.

Примечательно, что по параметрам изотопно-геохимической зональности месторождение Сухой Лог практически не отличается от другого золоторудного гиганта – месторождения Хоумстейк (см. рис. 1), которое служит эталоном метаморфизованных эксгальационно-осадочных руд (Rye, Rye, 1974; Cameron, 1983).

Как известно, наибольшую мощность гидротермально-осадочные залежи имеют вблизи рудоподводящих каналов (Кривцов и др., 2002). С этой точки зрения изотопные данные согласуются с отмеченной приуроченностью наиболее мощных серноколчеданных тел к центральной части месторождения Сухой Лог. Здесь же фиксируется и наибольшая золотоносность осадочно-диагенетического пирита.

Идентичность вектора изотопно-геохимической зональности ($\delta^{34}\text{S}+6\rightarrow+20\%$) на Западном и Сухоложском участках при сильно различающемся ее вертикальном размахе (15 и 150 м) свидетельствует о на порядок более длительном функционировании гидротермально-осадочной системы в центральной части месторождения. Именно с этим фактором, по нашему мнению, можно связать различный масштаб оруденения на двух изученных участках рудного поля.

Формированию руд, очевидно, способствовало накопление золотоносных растворов в рифтогенных впадинах, наличие которых доказано результатами детальных литолого-фациальных исследований (Буряк, 1982; Коткин, Станников, 1983ф). В пределах этих структур исключительным развитием пользуется пирит, содержащий изотопно-тяжелую (т.е. гидротермально-осадочную) серу. От месторождения Сухой Лог ореол этого пирита прослежен нами (с учетом складчатости) на расстояние до 10 км (Кряжев, 2010).

Месторождения сухоложского типа можно рассматривать как «удаленный» аналог колчеданно-полиметаллических месторождений Забайкалья, таких как Холоднинское и Озерное, первое из которых локализовано на том же уровне разреза, что и Сухой Лог (Ручкин, Конкин, 2010; Иванов, 2014; Будяк, Горячев,

Скузоватов, 2016). Особенностью суходожских руд является полное отсутствие их обогащения цветными металлами, равно как и другими рудогенными элементами, за исключением As, при высоком содержании золота в пирите (Гаврилов, Кряжев, 2008). По этому признаку данные месторождения отличаются от других золотоносных субмаринных залежей (Emsbo, 2000; Melekestseva et al., 2017; и др.).

К числу главных факторов, определивших указанную особенность суходожских руд, следует отнести источник и состав рудоносных растворов. В этом сложном вопросе мы можем опираться только на полученные изотопные данные. Во-первых, повышение $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов и снижение их золотоносности по мере развития системы позволяет считать, что сера в рудоносном растворе ($\delta^{34}\text{S} +9\pm 3\%$) имела смешанный источник, причем один из компонентов смеси (изотопно-легкий) имел глубинное происхождение. Во-вторых, нами установлено, что золотоносные сульфиды ассоциируют с аномально тяжелым органическим углеродом, $\delta^{13}\text{C}$ которого выходит за диапазон составов органического вещества в морских осадках (Галимов, 1968). Такие аномалии $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ отмечаются только в пределах месторождений. Анализ данных, представленных на рис. 4, приводит нас к выводу о поступлении в область рудонакопления, наряду с эндогенной серой, восстановленного углерода с $\delta^{13}\text{C}$ около -15% . Наиболее вероятным носителем такого углерода является эндогенный метан (Галимов, 1973). И в третьих, замещение известняков золотоносными сульфидами не отражается на изотопном составе кислорода кальцита. Следовательно, поступление метана и сероводорода при рудообразовании не сопровождалось движением термальных вод. Таковы особенности формирования изученных осадочно-диагенетических руд.

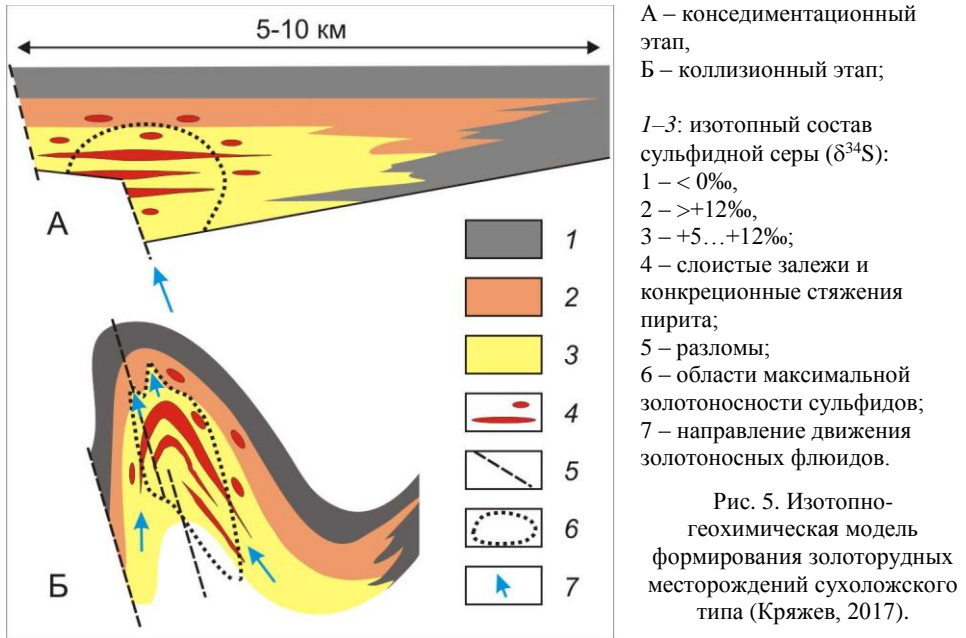
Синккладчатый метаморфический и метасоматический пирит наследует изотопно-геохимическую зональность конседиментационного этапа (рис. 3). Исключений из этой закономерности нами не установлено ни на Вернинском месторождении (см. рис. 2), ни на Высочайшем. Равенство средних значений $\delta^{34}\text{S}$ присутствующих на месторождении Сухой Лог разновидностей пирита на большом материале показано в работе (Chang, Large, Maslennikov, 2008). Некоторое усреднение изотопного состава серы в процессе ее переотложения, очевидно, происходит, но только в достаточно локальном пространстве. Ее привнос из удаленного источника можно исключить, опираясь на весьма представительные данные, полученные Н.М.Заири с соавторами (1977). Изучив суходожское рудное поле в полном объеме, исследователи пришли к выводу о существовании латеральной изотопно-геохимической зональности, выраженной в увеличении $\delta^{34}\text{S}$ прожилково-вкрапленного золотоносного пирита от $+6$ до $+11\%$ с востока на запад. Авторы связали зональность с кислотно-щелочной эволюцией магматогенного раствора, поступающего с востока вдоль оси антиклинали. С нашей точки зрения, эта зональность является отражением роста доли тяжелого изотопа в мобилизованной из пород сульфидной сере *вверх по разрезу* хомолхинской свиты.

Масштабы перераспределения рудного вещества при метаморфизме нами оцениваются в первые десятки метров. Нередко фиксируется перекристаллизация осадочно-диагенетического пирита практически *in situ*. Максимальное достоверно установленное расстояние перемещения серы и золота составляет 150-200 м. Если принять во внимание время, прошедшее с момента осадконакопления (700–600 млн.лет) до складчатости (440–450 млн.лет) и составляющее около 200 млн.лет, максимальная скорость миграции этих элементов оценивается в 0.001мм/год. По нашему мнению, для столь медленного движения вещества достаточно градиента давления при образовании складки (Основные проблемы... 1955). Исследование изотопного состава кислорода в кварце и во вмещающих породах также подтвердило метаморфогенную природу прожилков (Кряжев, Устинов, Гриненко, 2009). В то же время мы не исключаем вероятность более масштабной миграции вещества в составе метаморфогенных флюидов вдоль относительно проницаемых зон расщепления с формированием геохимических аномалий над залежами гидротермально-осадочных руд.

При смене обстановки сжатия обстановкой растяжения трещины в породах также заполнялись минералами, переотложенными из вмещающих пород и руд (в том числе сульфидами с самородным золотом). Изотопные данные свидетельствуют о сохранении «метаморфической» обстановки на этом этапе (Кряжев, Устинов, Гриненко, 2009; Мансуров, Кряжев, Зеликсон, 2017). По способу образования подобные кварцевые жилы и прожилки можно сопоставить с жилами альпийского типа, при формировании которых основным движущим фактором также служил перепад давления (Основные проблемы... 1955).

В то же время нельзя не отметить две особенности: (1) – поздние кварцевые жилы в большом количестве наблюдаются только на месторождениях; (2) – в процессе метаморфизма сульфидов на отдельных участках происходит весьма резкое обогащение руд самородным золотом, что существенно повышает их качество (Буряк, Хмелевская, 1997).

По результатам исследования автором составлена модель формирования золотоносных конседиментационных залежей, которые целесообразно выделить в отдельный геолого-генетический тип, названный сухоложским по его наиболее крупному представителю (рис. 5). Отметим, что (1) – зоны первичного обогащения осадков серой и золотом пересекают литологические границы и при оконтуривании по бортовому содержанию будут выделены как секущие рудные тела; (2) – при наличии долгоживущего источника вещества и энергии подобные объекты могут формироваться на разных стратиграфических уровнях разреза, что следует трактовать как ярусное размещение оруденения в пределах единой рудоносной углеродисто-карбонатно-терригенной формации. Принятие данной модели, на наш взгляд, позволит решить также сложный и остро дискуссионный вопрос о составе метасоматических ореолов, сопровождающих сухоложские руды (Ленский..., 1971; Буряк, 1982; Русинов и др., 2008; Кучеренко и др., 2011, 2012; и др.).



Представляется очевидным, что при более напряженных условиях метаморфизма первичные золото-сульфидные руды могут быть в большей степени преобразованы, вплоть до полной регенерации. В Ленском районе за изоградой граната они не известны, но здесь находятся месторождения золото-кварцевого типа (Иванов, 2014). Можно предположить, что по крайней мере часть металла в рудах этих объектов была унаследована из «древних» золото-сульфидных залежей.

Многими авторами отмечалась приуроченность промышленно-значимых золоторудных объектов Центральной Колымы к единому (пермскому) литолого-стратиграфическому уровню (Константинов, 2009; и др.). Эта закономерность позволяла *предполагать*, что в пермских толщах присутствует также оруденение сухоложского типа - в различной степени регенерированные залежи золотоносных гидротермально-осадочных сульфидов (Буряк, Михайлов, Цымбалюк, 2002). Такое оруденение было впервые изучено и описано нами в Хатыннах-Олботском рудном узле (Кряжев и др., 2014). Оно локализовано в породах атканской свиты и представлено измененными углеродистыми туфами, содержащими рассеянную вкрапленность и конкреции высокозолотоносного пирита и арсенопирита. Их обломки (рудокласты) распространены в перекрывающих отложениях. Весьма вероятно, что подобные руды на коллизионном этапе могли быть вовлечены в плутоно-метаморфические (по Н.А.Горячеву, 2003) системы, что и привело к формированию наиболее крупных золоторудных объектов. Это предположение

подтверждается существующими для Наталкинского месторождения изотопными данными (Гончаров, Ворошин, Сидоров, 2002; Кряжев и др., 2014).

Согласно существующим представлениям, одним из главных факторов, определяющих $\delta^{34}\text{S}$ коровых магм и связанных с ними рудных месторождений является состав субстрата, вовлеченного в магматическую систему (Ishihara, Sasaki 1989, 2002). При этом не исключается и поступление некоторой части серы из мантии с формированием ряда корово-мантийных смесей с непрерывным диапазоном вариаций $\delta^{34}\text{S}$. В частности, развитие рудно-магматических систем в углеродисто-терригенных комплексах приводит к обогащению магм и соответственно месторождений легким изотопом серы за счет осадочно-биогенных сульфидов. Это показано на примере золоторудных месторождений Северо-Востока России (Гамянин, Горячев, Бахарев, 2003; и др.) и золото-вольфрамовых месторождений Сихоте-Алиня (Soloviev, Kryazhev, Dvurechenskaya, 2017; и др.). По нашим данным (Стружков и др., 2008, Soloviev, Kryazhev, 2017) магматогенные флюиды в подобных системах имели существенно метановый состав.

Закономерная ассоциация низких значений $\delta^{34}\text{S}$ с восстановленными флюидами, однако, в ряде случаев нарушается, что мы рассматриваем как указание на вероятное вовлечения в рудно-магматический процесс древних гидротермально-осадочных руд суходожского типа, обогащенных тяжелым изотопом серы. В качестве примера можно привести месторождение Советское. Нами установлено (Кряжев и др., 2003), что золотоносный существенно метановый флюид, сформировавший золото-полисульфидную ассоциацию в рудах этого крупного объекта, характеризовался весьма высоким и достаточно «уникальным» значением $\delta^{34}\text{S} +12.5\pm 1\%$. К примеру, Удерейское золото-сурьмяное месторождение, локализованное в породах той же формации, отличается значительно более низкими величинами $\delta^{34}\text{S} (+5.5\pm 1.5\%)$ при отсутствии метана в рудообразующих флюидах.

Таким образом, между плутоно-метаморфическими и плутоногенно-гидротермальными системами, вероятно, не существует четкой границы.

Положение 3. При формировании золоторудных месторождений, парагенетически связанных с коллизионным магматизмом (мурунтауский тип), мобилизация и транспорт рудного вещества осуществлялись флюидами, поступающими из глубинных магматических очагов и наследующими их изотопно-геохимические характеристики. Вещественный вклад углеродисто-терригенных пород как источника серы и золота в таких системах был незначительным. В то же время на размещение месторождений в пределах рудных полей определяющее влияние оказывали активизированные разломы фундамента, что проявлено в закономерном совмещении центров повышенной эндогенной активности конседиментационного и коллизионного этапов.

Плутоногенно-гидротермальная модель разработана нами на примере месторождений Средней Азии (Мурунтау, Кумтор и др.). Их парагенетическая связь с коллизионным (постколлизионным) магматизмом подтверждена геологическими и геохронологическими данными (Кудрин и др., 1990; Костицын, 1993, 1994, 1996) Yakubchuk et al, 2005; Mao et al., 2004; Коробейников и др., 2012; Соловьев, 2014). Однако роль магматизма как источника золота до настоящего времени дискутируется (Барышев, 2013; Арифуров, 2014; и др.).

Крупнейшее месторождение **Мурунтау** расположено в Южно-Тамдытауском рудном районе золоторудной провинции Южного Тянь-Шаня. Основные сведения о его геологическом строении, истории формирования, составе и условиям формирования руд содержатся в монографии автора (Кряжев, 2002).

По морфологическим признакам месторождение представляет собой весьма крупный по размерам секущий штокверк, локализованный во флишеидной толще (O–S). Основная масса руд связана с объемными калишпат-кварцевыми метасоматитами, содержащими сульфидно-кварцевые прожилки и вкрапленную сульфидную минерализацию (см. рис. 2в, г). Руды визуальнo выделяются на фоне вмещающих пород за счет «выгорания» углеродистого вещества при рудообразовании. Они сложены кварцем, полевыми шпатами и слюдами. Из рудных минералов присутствуют арсенопирит, пирит, пирротин и шеелит, в виде примеси молибденит, висмутин, тетрадимит. Золото преимущественно свободное.

Процессы гидротермального минералообразования в рудном поле протекали синхронно с эволюцией герцинского постколлизионного магматизма и оторваны во времени от регионального метаморфизма на 128 млн.лет.

Дорудный этап (286 млн. лет назад) включает внедрение гранитного массива, штокообразных тел и даек субщелочных диоритов, магнезиально-железистый метасоматоз магматической стадии (биотитизацию и пирротинизацию), формирование комплекса высоко- и среднетемпературных постмагматических кальциевых метасоматитов (авторреакционные скарны, эпидот-актинолитовые пропилиты) и образование безрудных кварцевых жил и прожилков.

На дорудном этапе процессы регенерации и переотложения вещества углеродисто-терригенной толщи протекали наиболее интенсивно. Конвективные гидротермальные потоки взаимодействовали с рудовмещающими и подстилающими породами во всем объеме вплоть до кровли гранитного массива. Однако, в биотитизированных и пирротинизированных породах отсутствуют кварц-сульфидные образования с повышенным содержанием золота. Дорудные пирротин и пирит, основная масса которых приурочена к углеродистым сланцам, характеризуются широкой дисперсией изотопного состава серы с преобладанием отрицательных значений $\delta^{34}\text{S}$, что указывает на первично биогенно-осадочную природу их серы. Золото в дорудных сульфидах находится на уровне 0.1 г/т (более 100 анализов).

Рудообразование началось через 13 млн. лет после становления гранитного массива. На раннем этапе (273 млн.лет назад) синхронно с внедрением даек субщелочных гранитоидов сформировались золотоносные калишпат-кварцевые метасоматиты и кварцевые прожилки с шеелитом и сульфидами. В течение позднего этапа образовались альбит-кварцевые метасоматиты, золото-сульфидно-кварцевые жилы и прожилки. Минералообразование имело импульсный характер и продолжалось в период от 256 до 230 млн.лет, интрузивные породы этого этапа представлены лампрофирами (керсантитами-спессартитами).

В отличие от месторождений сухоложского типа изотопно-геохимическая зональность, фиксирующая неоднократность поступления золотоносных растворов в область рудоотложения, проявлена практически во всем объеме месторождения (нами детально исследовано более 10 тыс.м. скважин и горных выработок (рис.6). Все без исключения рудные тела приурочены к метасоматитам и содержат пирит-(пирротин)-арсенопиритовую минерализацию с $\delta^{34}\text{S} = +2.5 \pm 3\%$.

Единство изотопных параметров *магматических пород* всех интрузивных фаз ($\delta^{18}\text{O} = +7 \pm 1\%$, $\delta^{34}\text{S} = +3 \pm 1\%$) и *гидротермальных растворов* всех стадий рудообразования при близости изотопных возрастов однозначно свидетельствует о парагенетической связи магм и флюидов с общим долгоживущим глубинным очагом. По изотопным данным $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0.707$, $\delta^{18}\text{O} = +7 \pm 0.5\%$ очаг не был контаминирован веществом палеозойских терригенных пород, поэтому предположение о вовлечении обогащенных золотом осадочных пород в рудно-магматическую систему не имеет оснований. Источником серы, а тем более золота во флюидах не могли служить и находящиеся во вмещающих и подстилающих породах изотопно-легкие сульфиды. Таким образом, результаты изотопно-геохимических исследований рудного поля Мурунтау указывают на неоднократный привнос золота и серы в составе магматогенных флюидных систем, что отвечает ортодоксальной магматогенно-гидротермальной модели рудообразования.

Существующие данные позволяют предполагать, что аналогичный генезис имеют и другие золоторудные месторождения провинции. Об этом свидетельствует идентичный изотопный состав сульфидной серы в рудах месторождений Мурунтау, Даугызтау и Кокпатас (рис. 7). Как видно, золотоносные сульфиды, генетически связанные с общим (или однотипным) эндогенным источником серы, проявлены на огромной территории (от 30 до 100 км), что свидетельствует о мантийном уровне зарождения этого источника (Барышев, 2013). При этом эндогенные флюиды сохраняют неизменными свои изотопно-геохимические характеристики независимо от количества и изотопного состава осадочно-диагенетической серы во вмещающих породах. В этом аспекте особое значение имеет золото-сульфидное месторождение Кокпатас. Как и месторождение Мурунтау, Кокпатас локализован в надинтрузивном пространстве гранитоидного массива в поле развития даек «пестрого» состава, в том числе лампрофиров, но при этом приурочен к осадочно-вулканогенной толще карбона, т.е. породам верхнего структурного этажа.

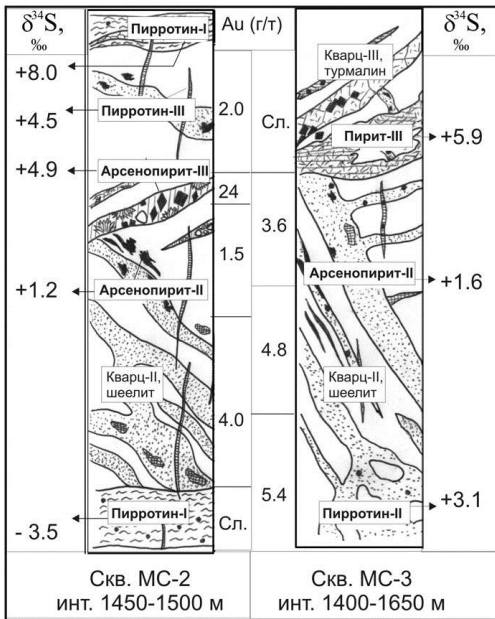


Рис. 6. Изотопно-геохимическая зональность в рудных телах месторождения Мурунтау

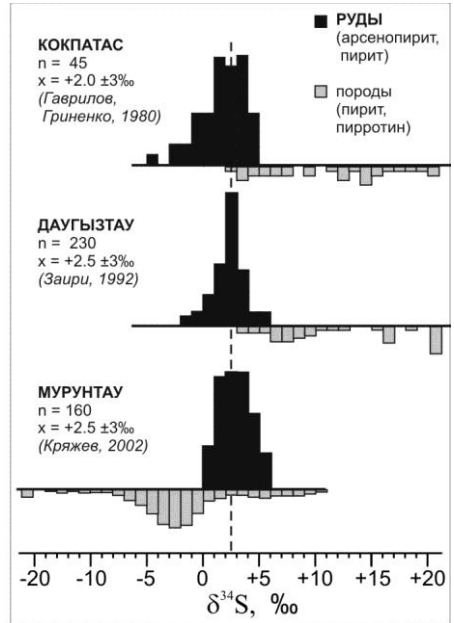


Рис. 7. Изотопный состав серы сульфидов золоторудных гигантов Средней Азии

В породах Даугызтауского рудного поля распространены золотосодержащие пиритовые конкреции (Au 0.05—0.90, до 5 г/т). Предполагается (Арифуров, 2014), что на Мурунтау подобные образования были полностью растворены и перетолжены в процессе герцинского рудогенеза. Однако, пирит этих конкреций аномально обогащен тяжелым изотопом серы (Заири, 1992: $\delta^{34}\text{S}$ от +8 до +35‰), поэтому вовлечение таких сульфидов в рудно-магматическую систему Мурунтау полностью исключено.

Изотопные данные свидетельствуют о возникновении магм и связанных с ними флюидов, сформировавших рассмотренные золоторудные гиганты, за счет вещества глубинных магматических пород. В этом состоит их отличие от рассмотренных выше рудно-магматических систем Центральной Колымы и Енисейского кряжа. Вместе с тем, по нашему мнению, разделение магматогенно-гидротермальных рудообразующих систем по данному признаку нецелесообразно, т.к. независимо от предшествующей геохимической истории, сера, прошедшая изотопную гомогенизацию в рудно-магматической системе и находящаяся в рудах, должна определяться как «эндогенная». Поэтому мы относим все месторождения, связанные с привносом рудного вещества из глубинных эндогенных источников, к *мурунтаускому* типу, названному по его наиболее крупному представителю.

В зависимости от соотношения мантийного и корового вещества, а также особенностей состава последнего, при формировании месторождений мурунтауского типа каждый рудогенерирующий очаг приобретает характерный только для него изотопный состав серы, который можно использовать в качестве изотопной «метки» при идентификации источников рудной минерализации.

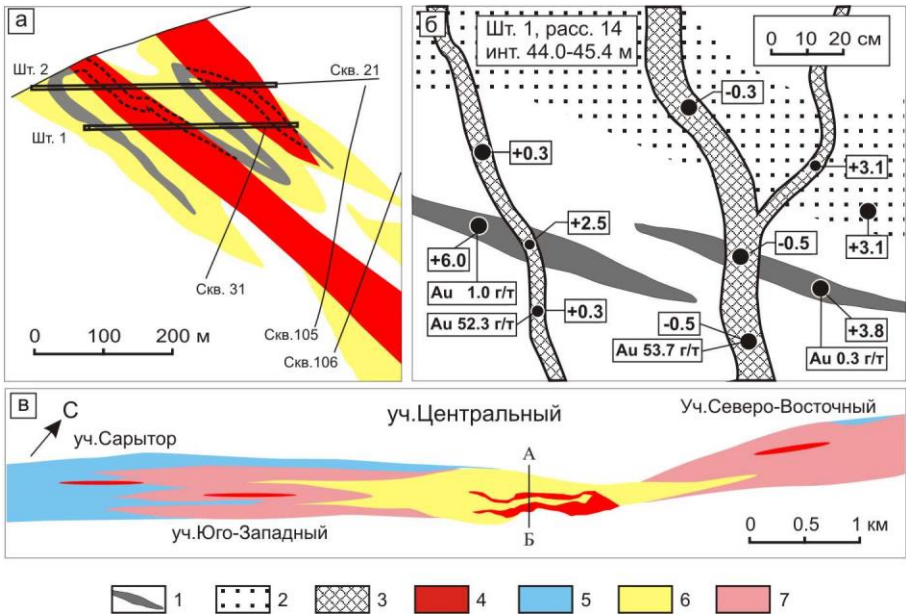
Месторождение **Кумтор**, расположенное в Срединном Тянь-Шане, является ярким примером наложения магматогенно-гидротермальной золото-сульфидной минерализации на конседиментационные пиритовые руды (рис. 8) и может служить иллюстрацией устойчивости последних в области гидротермально-метасоматического рудообразования. Примечательно, что по своему позднедокембрийскому возрасту осадочные сульфиды близки рассмотренным выше сухоложским рудам, а наложенное оруденение, как и на месторождении Мурунтау, связано с постколлизийным карбон-пермским магматизмом (Мао et al., 2004).

Кумтор относится к числу весьма крупных золоторудных объектов. Месторождение локализовано в зоне крупного разлома среди углеродисто-терригенных отложений венда (Никоноров, 1993; Новожилов, Гаврилов, 1999). Интрузивные образования в рудном поле представлены редкими дайками «пестрого» состава, на глубине около 3 км по геофизическим данным предполагается гранитоидный массив.

Промышленное оруденение представлено секущими крутопадающими зонами объемных и прожилковых кварц-полевошпат-карбонатных метасоматитов с обильной вкрапленностью пирита, который содержит тонкодисперсное и субмикроскопическое золото в количестве от 5 до 100 г/т. Примечательно низкое содержание в нем мышьяка (100–50 г/т). В существенном количестве в рудах находится шеелит, в виде распространенной примеси - теллуриды золота.

Изотопный состав серы пирита *метасоматитов* в осевых зонах рудных тел во всем объеме месторождения (сотни метров по простиранию и падению) заключен в интервале $\delta^{34}\text{S} = 0 \pm 2.5\%$, что указывает на глубинный магматический источник рудного вещества.

Ранний осадочно-диагенетический пирит широко распространен в породах рудовмещающей углеродисто-терригенной толщи. Он образует вкрапленность различной интенсивности, а также массивные линзовидно-пластовые серноколчеданные тела мощностью от 1 до 15 см. Последние вблизи месторождения концентрируются в пачки слоистых пиритовых руд и участвуют в складчатости. Гомогенный изотопный состав серы при повышенной доле тяжелого изотопа ($\delta^{34}\text{S}$ от +3 до +6‰) указывает на гидротермально-осадочную природу раннего пирита в центральной части рудного поля. Содержания Au при анализе точечных проб в раннем пирите из рудной зоны составляет 0.3–1 г/т. Тот же диапазон содержаний дает рядовое бороздовое опробование на тех участках, где слоистые пиритовые руды не несут признаков наложенного оруденения.



а – схема изотопно-геохимической зональности в разрезе по линии А-Б (р.л. 60);
 б – фрагмент пересечения гидротермально-осадочных пиритовых руд золотоносными метасоматитами (кварц+альбит+анкерит+ пирит+шеелит);
 в – изотопно-геохимическая модель Кумторского рудного поля (план).

Условные обозначения: 1 – линзовидно-пластовые серноколчеданные тела, 2 – углеродистые сланцы с густой вкрапленностью осадочно-диагенетического пирита, 3 – метасоматиты, 4 – золото-сульфидные магматогенно-гидротермальные руды ($\delta^{34}\text{S}$ пирита = $0 \pm 2.5\%$); 5–7: изотопный состав серы осадочно-диагенетического пирита ($\delta^{34}\text{S}$): 5 – $-16 \dots +3\%$, 6 – $+3 \dots +6\%$, 7 – $+6 \dots +25\%$. Кружками отмечены места отбора точечных проб, рядом указан изотопный состав серы пирита и содержания в нем Au по данным ИНАА.

Рис. 8. Взаимоотношения гидротермально-осадочной и магматогенно-гидротермальной минерализации на месторождении Кумтор (Кряжев, 2017).

За пределами месторождения золото в раннем пирите не фиксируется (<0.1 г/т).

В масштабе рудного поля выявляется изотопно-геохимическая зональность, которая отвечает крупной (не менее 10 км по простиранию) конседиментационной гидротермально-осадочной системе (см. рис. 8в) и по внутреннему строению соответствует рассмотренной выше «сухоложской» модели (см. рис. 5).

На рис. 8в хорошо видно, что основной объем герцинского оруденения (собственно золоторудный гигант) телескопирован в центральную часть докембрийской гидротермально-осадочной системы. По периферии рудного поля локализуются только рудопроявления.

Пространственное совмещение центральных зон этих разновозрастных гидротермальных систем, вероятнее всего, обусловлено существованием единой рудоконтролирующей структуры, определяющей положение центров эндогенной активности на всех этапах развития данного участка земной коры.

Подобная приуроченность постколлизийной жильно-прожилковой минерализации к тем достаточно локальным участкам углеродисто-терригенных комплексов, которые на конседиментационном этапе развивались в особом режиме, отмечается нами практически во всех рудных полях. В рудном поле Мурунтау – это локализация даек и рудного штокверка в пределах области развития мощной толщи мелкозернистых отложений с повышенным содержанием биогенно-осадочной серы, по-видимому, крупной конседиментационной впадины. На месторождениях Сухоложского рудного узла – концентрация кварцевых жил в золото-сульфидных рудах. На Удерейском месторождении (Новожилов, Гаврилов, 1999) – наложение поздних антимонит-кварцевых жил на зону развития осадочно-диагенетических пиритовых конкреций. Во всех рассмотренных случаях речь идет о положении *месторождений* в пределах рудных полей, что позволяет ограничить масштаб наблюдаемого явления. Очевидно, что определяющую роль играли *ранние* структурные элементы, т.е. разломы фундамента и участки их пересечения, активизированные на коллизийном этапе.

Положение 4. Формирование месторождений происходило в условиях глубинного гидродинамического режима. Эффективный перенос серы и золота осуществлялся в гетерогенной среде независимо от водно-солевого раствора при участии подвижной углекислотно-метановой фазы, поступающей из рудогенерирующего очага. Основной причиной рудоотложения служил распад комплексных соединений золота вследствие связывания серы в сульфидных минералах.

Масштабы оруденения зависят от длительности процесса рудообразования, что отражено в степени насыщенности жильного кварца углекислотно-метановыми включениями.

Одной из задач термобарогеохимических исследований являлось выявление признаков золотоносных флюидных систем, сформировавших крупные золоторудные месторождения в углеродисто-терригенных комплексах. Методологической основой работы служил сравнительный анализ валового состава флюидных включений в жильном кварце из руд и околорудных ореолов крупных и мелких месторождений, а также в кварце на удалении от известных рудных полей. Разработанная для этого специализированная комплексная методика (Кряжев, Прокофьев, Васюта, 2006) обеспечила одновременное определение воды, газов, солей и широкого спектра микроэлементов (Au, Ag, As, Sb, Mo и др.), выделенных из небольших (0,5–1 г) навесок кварца. При анализе использовались современные высокочувствительные количественные методы (газовая и ионная хроматография,

ICP MS). Стандартизация процесса максимально скомпенсировала ошибки и обеспечила корректность сравнения состава флюидных включений в серии изученных образцов. Проанализировано 180 образцов кварца, отобранных на золоторудных объектах Средней Азии, Казахстана (Бакырчик), Енисейской, Байкало-Патомской и Верхояно-Колымской провинций. В качестве «фоновых» выбраны площади развития углеродисто-терригенных комплексов, на которых по результатам геологоразведочных работ золоторудные проявления не установлены. Для сравнения изучены также золоторудные и золотосодержащие месторождения других типов (Березовское, Зодское, Новогоднее-Монто, Восток-2, Скрытое).

В результате исследований установлен исключительно разнообразный состав золотоносных флюидных систем в углеродисто-терригенных толщах. Содержания главных анионов и катионов, газов, а также их отношения в золотоносном кварце подвержены сильным вариациям. Рудообразующие растворы имеют хлоридный, хлоридно-гидрокарбонатный состав, гидрокарбонатный с переменным количеством сульфат-иона, среди катионов преобладает натрий, реже доминирует кальций. Концентрации основных компонентов при этом варьируют на 2-4 порядка.

С одной стороны, эта особенность является отражением множественности обстановок и условий рудообразования. С другой стороны, она свидетельствует о способности гидротермальных систем *практически любого солевого состава* к эффективной мобилизации и переносу золота. Данный вывод также подтверждает представления о преимущественной миграции благородного металла в составе гидросульфидных комплексов (Pokrovski, Akinfiev, Borisova et al., 2014).

Никаких отличий между «фоновыми» пробами и кварцем месторождений по составу минералообразующих растворов не выявлено. В любых координатах (расчетные концентрации газов, анионов, катионов, микроэлементов, их отношения и т.п.) на графиках наблюдается хаотичное облако точек, а статистические расчёты не позволяют говорить о значимых различиях между выборками.

Практически единственный устойчивый признак, позволяющий дифференцировать золоторудные объекты по результатам валового анализа включений (рис. 9) – это содержание газовой фазы ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4$) в кварце, закономерно возрастающее в ряду безрудные жилы → рудопроявления и мелкие месторождения → крупные золоторудные поля (Кряжев, Васюта, 2012). В меньшей степени аналогичная зависимость наблюдается для главных солевых компонентов, но с практической точки зрения их анализ представляется не целесообразным.

Степень газонасыщенности кварца преимущественно определяется количеством углекислотно-метановых включений в образце. По отношению к основной массе кварца такие включения являются как первичными, так и вторичными. Последние образуются путем залечивания трещин при наложении на кварц более поздних золото-сульфидных парагенезисов, т.е. для возникновения включений необходимо не только присутствие рудоносного раствора в данном месте, но и развитие трещиноватости.

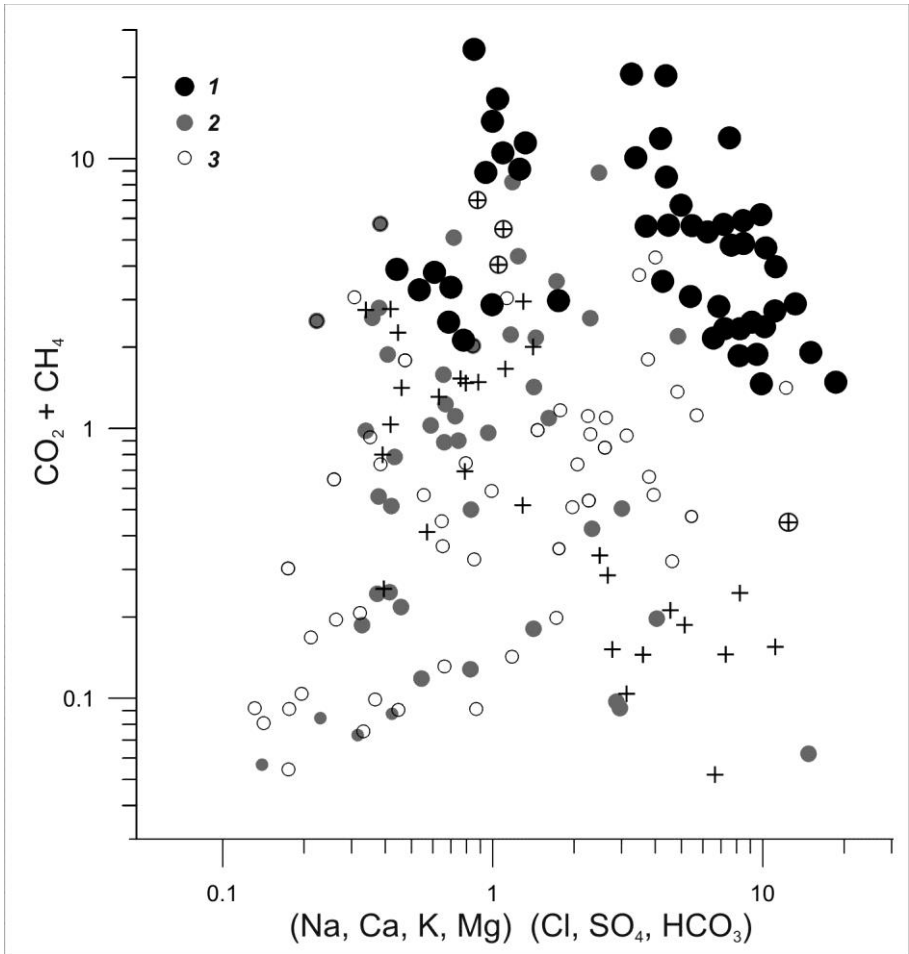


Рис. 9. Содержание главных флюидных компонентов (ммоль/кг) в жильном кварце из углеродисто-терригенных комплексов: 1 – крупные и весьма крупные месторождения, 2 – средние и мелкие месторождения, рудопроявления, 3 – безрудные участки. Крестиками показаны данные по золоторудным и золотосодержащим плутогенно-гидротермальным месторождениям других типов (в кружках – по Березовскому месторождению на Урале).

Поскольку вторичные включения обычно залечивают множество разнообразных систем трещин, насыщение кварца газами – достаточно длительный и неоднoактный процесс.

Таким образом, газовые включения фиксируют области долговременных потоков золотоносных флюидов, устойчиво существовавших на фоне тектонических подвижек. Это в целом объясняет связь между показателем ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4$) и масштабами оруденения. Газогеохимические аномалии сопровождают

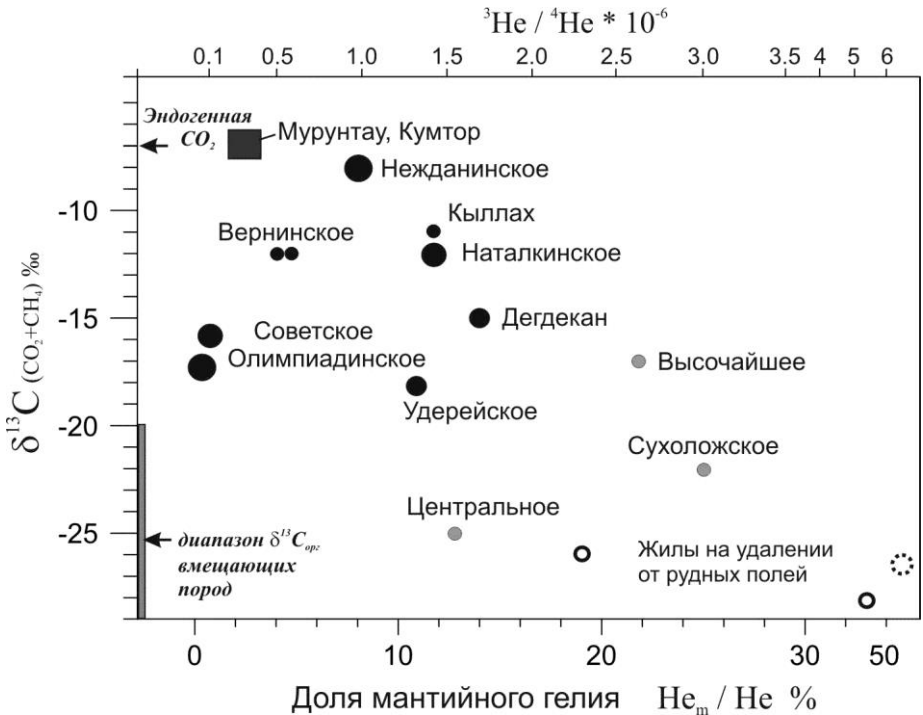
все изученные крупные золоторудные месторождения и могут быть предложены в качестве эффективного критерия прогноза и поисков большеобъемного оруденения.

Однако достоверность и надёжность критериев, выявленных с учётом эмпирически установленных закономерностей, не могут быть достаточно высокими без понимания причинно-следственных связей между наблюдаемыми явлениями и процессами формирования руд. Приуроченность скоплений рудного вещества к ореолам развития углекислотно-метановых включений можно рассматривать как следствие поступления газов (и золота) из особых (например, мантийных) источников. Можно также предполагать, что выделение газов из раствора («вскипание» по Реддеру, 1987) послужило основной причиной рудоотложения. Нами предложена и развита альтернативная концепция, в которой газовой фазе отводится главная роль в транспорте благородного металла из его источников к местам рудолокализации (Кряжев, 2007, 2014, 2016; Кряжев и др., 2009, 2017).

Источники газов в рудообразующих флюидах определены нами (Кряжев и др., 2010, 2013) по изотопному составу углерода и гелия флюидных включений в золотоносном кварце (рис. 10). Изотопный состав суммарного углерода включений в кварце золоторудных месторождений ($\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{C}} = -7 \dots -18\%$), в отличие от кварца рудопроявлений и безрудных жил, значительно утяжелен по сравнению с органическим углеродом терригенных толщ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}} -25 \pm 5\%$ по Галимову, 1968). Полученные данные указывают на вероятное присутствие в системе «эндогенной» углекислоты ($\delta^{13}\text{C} -7$ по Галимову, 1968), однако отрицательная корреляция $\delta^{13}\text{C}$ с относительной долей мантийного гелия не позволяет предполагать поступление CO_2 непосредственно из мантии. Наиболее вероятными источниками углеродсодержащих газов, таким образом, являются внутрикоровые или мантийно-коровые флюидно-магматические системы, в которые в той или иной степени был вовлечен углерод терригенных и терригенно-карбонатных толщ.

На рис. 10 хорошо видно, что доля мантийного гелия в рудообразующих флюидах золоторудных гигантов не превышает 10%. Эта особенность коренным образом отличает золоторудные месторождения в углеродисто-терригенных комплексах от, например, золото-серебряных объектов Охотско-Чукотского пояса, где устанавливается прямая связь между долей мантийного гелия в флюидах и масштабами оруденения (Петров, Михайлов, Шевченко и др., 2006; Блюман, 2011).

Однако, признание «магματοгенного» источника флюидов не позволяет объяснить ведущее значение углекислоты и метана при формировании золоторудных месторождений, т.к. из магматических очагов в область рудоотложения поступали и щелочно-хлоридные растворы (Бортников и др., 1998, 2007; Бортников, 2006; Кряжев, 2002; и др.).

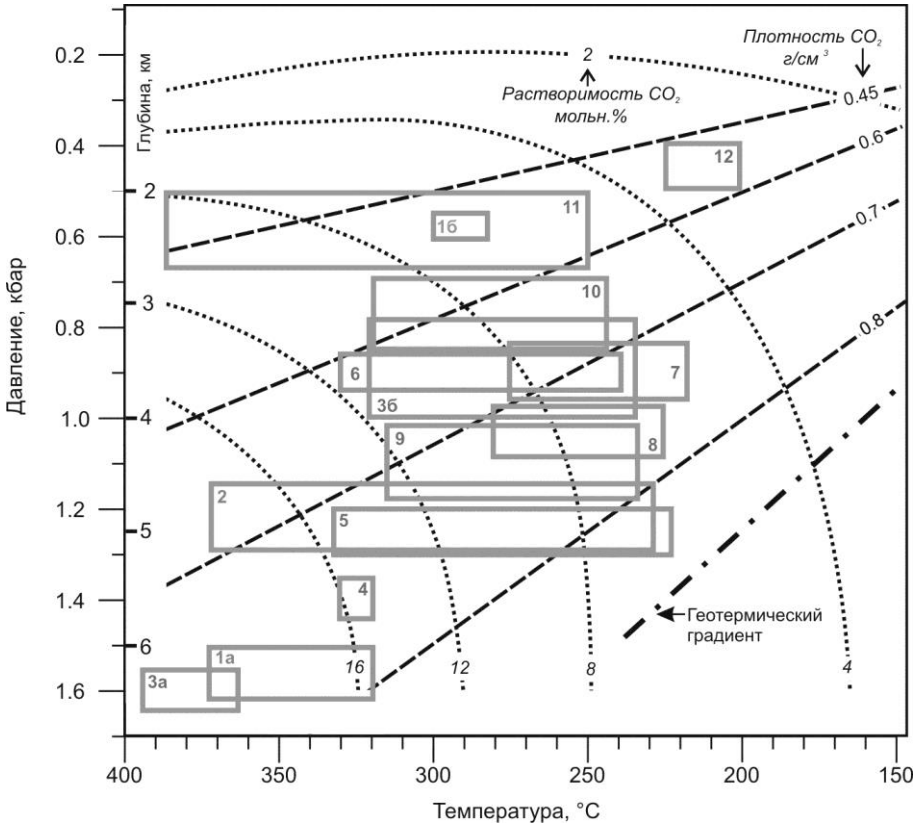


$^3\text{He}/^4\text{He}$ для месторождений Мурунтау и Кумтор по (Graupner, Niedermann, Rhede et al. 2010), $\delta^{13}\text{C}$ органического вещества и эндогенной углекислоты по (Галимов, 1973), остальные данные по (Кряжев, Прасолов, Розин, Сергеев, 2010, 2013).

Рис. 10. Зависимость между изотопным составом гелия и углерода флюидных включений в минералах золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах.

Вскипание флюидов как вероятная причина рудоотложения предполагается во многих работах (Бортников и др., 1998; Стружков и др., 2006; и др.). Нахождение углекислотно-(азотно)-метанового флюида в виде самостоятельной фазы действительно однозначно фиксируется при микроскопическом исследовании сообществ флюидных включений на всех месторождениях (Прокофьев, 2000; Томиленко, Гиббшер, 2001; Стружков и др., 2008; и др.), исключения из этого правила автору не известны. Однако, именно повсеместно проявленная гетерофазность рудообразующей среды противоречит предположению о вскипании как причине рудоотложения. На месторождениях, изученных на большую глубину, таких как Мурунтау (Кряжев, 2002) и Нежданнинское (Бортников и др., 2007), непрерывное «вскипание» флюида прослежено на 1–2 км по падению рудных тел.

Нами показано (рис. 11), что несмешимость газового и водно-солевого флюидов отмечается во всем диапазоне установленных давлений при рудообразовании.



PT-диаграмма с изолиниями плотности CO₂ (Калужный, 1982) и растворимости углекислоты в 6% растворе NaCl (Такеноучи, Кеннеди, 1968). Указаны глубины для литостатического давления. Серыми прямоугольниками показаны области, отвечающие изученным золотоносным флюидным системам в углеродисто-терригенных комплексах. Месторождения: 1 – Мурунтау (а – ранний этап, б – поздний этап), 2 – Кумтор, 3 – Олимпиадинское (а – ранний этап, б – поздний этап), 4 – Удерейское, 5 – Советское, 6 – Наталкинское, 7 – Дегдекан, 8 – Дразное, 9 – Бакырчик, 10 – Вернинское, 11 – Юглер, 12 – Токичан.

Рис. 11.

При этом углекислотно-метановая и водная фазы всегда находятся в равновесии, которое определяется растворимостью газов в водно-солевом растворе при данных давлении, температуре и солёности (см. рис. 11). В такой квазистационарной гетерогенной системе не происходят существенные изменения окислительно-восстановительного потенциала и кислотности минералообразующей среды, которые могут вызвать рудоотложение. Термодинамическое моделирование процесса вскипания флюида также показало его весьма низкую эффективность как механизма распада гидросульфидных комплексов золота (Bowers, 1991).

Ряд факторов, вызывающих осаждение металлов из сульфидных комплексов, по степени снижения их эффективности выглядит следующим образом (Бартон, Скиннер, 1982; Pokrovski, Akinfiiev, Borisova et al., 2014): снижение концентрации сульфидной серы в растворе→окисление→рост кислотности→разбавление→снижение температуры→снижение давления (вскипание). В восстановительной околонейтральной среде, свойственной обстановкам рудообразования на рассматриваемых месторождениях, при отсутствии признаков разбавления растворов и широком диапазоне температур рудообразования (400-200°C) в качестве главной причины рудоотложения остается признать снижение активности серы вследствие ее связывания в сульфидных минералах.

Углекислотно-метановая фаза как транспортирующий агент. В настоящее время достаточно твердо установлено, что в гетерогенной минералообразующей среде золото преимущественно перераспределяется в газовую фазу (Pokrovski, Akinfiiev, Borisova et al., 2014; ссылки в этой работе). Нами получены термобарогеохимические и изотопно-геохимические свидетельства реализации этого процесса при формировании изученных месторождений.

Включения в рудоносном кварце содержат надкритические углекислотно-метановые флюиды высокой плотности. На их способность к растворению, транспортировке и отложению минерального вещества, в частности, указывает присутствие в некоторых газовых включениях растворимых твердых *дочерних фаз*. Поскольку плотность флюида (а следовательно, его растворяющая способность) в первую очередь зависит от давления, именно этим фактором можно объяснить формирование крупных месторождений на глубинах свыше 3 км (см. рис. 11).

На рис. 12 приведены микрофотографии, свидетельствующие об отложении главной продуктивной (антимонит-арсенопиритовой) ассоциации Олимпиадинского месторождения из плотного азотно-метанового флюида. Высокие содержания мышьяка и золота в подобных газообразных включениях на этом месторождении установлены методом ICP MS с лазерным отбором пробы (А.С.Борисенко, 2012 г., устное сообщение). Н.В.Петровской (1973) описаны газовые (CO₂-CH₄-N₂) включения в самородном золоте. Нами отмечены микровыделения золота во включениях плотной углекислоты (Кряжев и др., 2017).

Изотопный состав кислорода. При формировании золото-сульфидных вкрапленных руд крупнейшего Олимпиадинского месторождения вмещающие карбонатные породы не претерпели изменений в изотопном составе кислорода и углерода (Кряжев, 2007). Если устойчивость $\delta^{13}\text{C}$ можно объяснить преимущественно метановым составом флюида, то неизменность $\delta^{18}\text{O}$ однозначно свидетельствует о низком отношении вода/порода в системе, т.е. о привносе серы, мышьяка, сурьмы и золота газовым, а не водно-солевым флюидом.

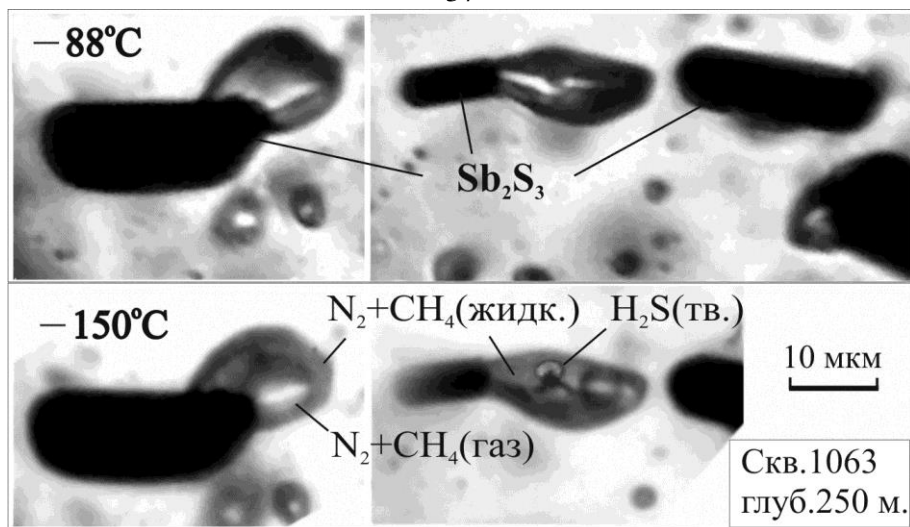
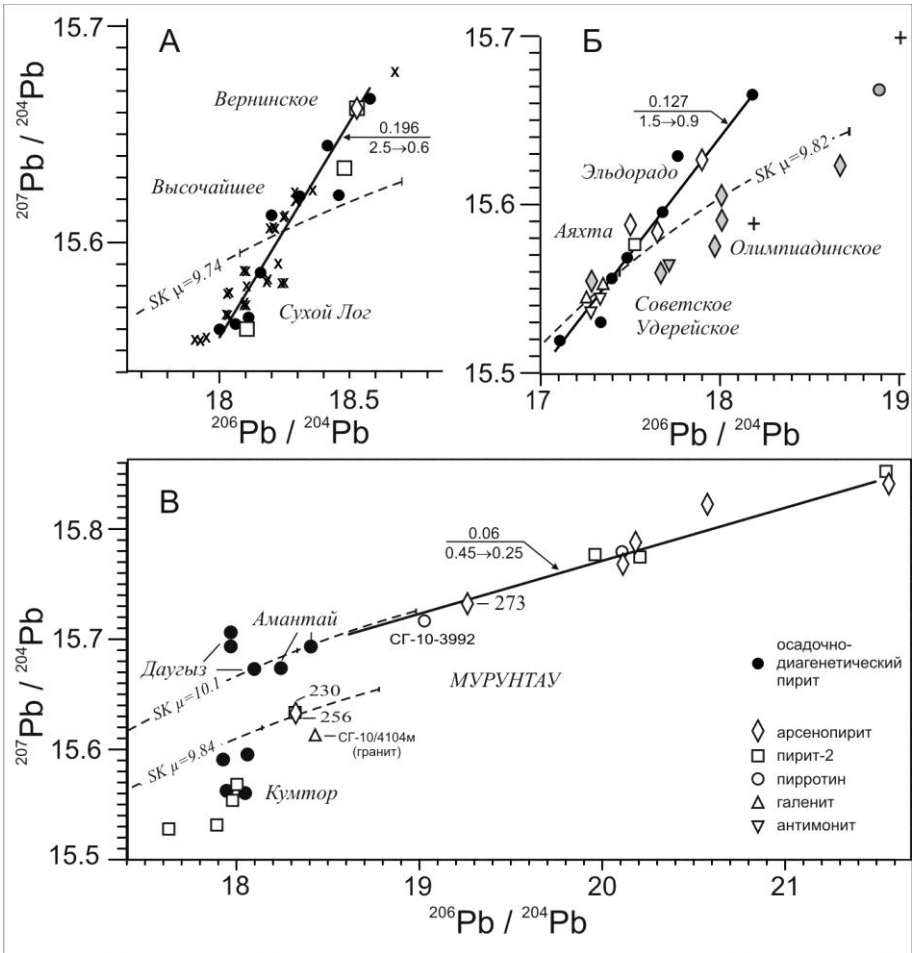


Рис. 12. Сингенетические с антимонитом и золотоносным арсенипитом включения поликомпонентного ($\text{CH}_4 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{Sb}$, As, Au) надкритического газового флюида, месторождение Олимпиадинское (Кряжев, 2016^a).

Изотопный состав рудного свинца. На рис. 13 сведены результаты наших исследований изотопного состава свинца, входящего в сульфиды изученных месторождений (Кряжев, Крымский, 2010; Кряжев, 2013). Во всех трех провинциях наблюдаются весьма широкие диапазоны вариаций изотопных отношений и группировка точек изотопных составов Pb вдоль линейных трендов. Последние можно интерпретировать как линии смещения (Чернышев и др., 2009), либо как вторичные изохроны, отражающие вариации изотопного состава свинца в источниках обломочного материала или U/Pb отношения в осадке. Эти изотопно-свинцовые неоднородности были в целом унаследованы сульфидами на всех этапах – при диагенезе, метаморфизме и гидротермальном рудообразовании.

Заимствование свинца из вмещающей среды свидетельствует о незначительном привносе этого элемента с рудообразующими растворами, что входит в резкое противоречие с оценками, сделанными по сере и золоту.

Так например, при формировании месторождения Мурунтау в руды было привнесено огромное количество золота и серы, которая полностью заменила серу осадочно-метаморфических сульфидов. Свинец при этом извлекался из вмещающих пород *in situ*. Точки изотопных составов рудного свинца Мурунтау (Кряжев, 2013) на диаграмме $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ располагаются вдоль прямой линии, на продолжении которой находится область изотопных отношений свинца в пирите осадочно-диагенетических конкреций, распространенных в рудном поле Даугызтау, а также золотоносных гидротермально-осадочных (по Ч.Х.Арифулову, 2005) залежей месторождения Амантайтау (Амантай).



Сплошные линии интерпретируются как вторичные изохроны (в числителе – наклон, в знаменателе – начало и конец 2-й стадии изотопной эволюции свинца, млрд. лет). 230, 256, 273 – изохронный Rb/Sr возраст образца, млн. лет. (Костицын, 1993, 1994). (x) – данные из работы (Чернышев и др., 2009); (SK) – кривые эволюции изотопного состава свинца по модели (Stacey, Kramers, 1975). Минералы из руд Олимпиадинского месторождения выделены серым цветом, (+) – пирит из черных сланцев (Савичев, Шевченко, Розин, 2006). Изотопные анализы выполнены в ЦИИ ВСЕГЕИ (TIMS) и ИГЕМ РАН (MC-ICP-MS).

Рис. 13. Диаграммы изотопного состава рудного свинца в сульфидах месторождений Ленского района (А), Енисейского края (Б) и Средней Азии (В) (Кряжев, Крымский, 2010; Кряжев, 2013).

Последнее является веским аргументом в пользу отнесения ранних руд Амантайтауского месторождения к сухоложскому типу. Наблюдаемое распределение экспериментальных точек на диаграмме удовлетворительно объясняется смещением «нормального» свинца ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.25$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.68$, возраст по эволюционной модели Стейси-Крамера отвечает времени осадконакопления – около 450 млн. лет при $\mu=10.1$), с различным количеством радиогенного свинца, накопившегося в обогащенных ураном слоях за период 450–250 млн. лет. Сульфиды на всех этапах минерало- и рудообразования заимствовали свинец из вмещающих пород без ощутимого привноса этого элемента из внешнего источника. Свинец, источником которого мог служить магматический очаг, установлен в двух мощных сульфидно-кварцевых *жилах выполнения*, относящихся к позднему этапу минералообразования (одна из них приведена на рис. 2г). Жилы различаются по минеральному составу и Rb-Sr возрасту, однако при этом характеризуются идентичными отношениями $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.31$ и $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.63$, которые весьма близки к изотопному составу свинца в гранитах, вскрытых под месторождением на глубине 4 км. (обр.СГ-10/4104 м). Возраст этого свинца по модели Стейси-Крамера составляет 300 млн. лет при $\mu=9.84$, что близко соответствует возрасту продуктивного гранитоидного магматизма.

Аномально широкими вариациями изотопно-свинцовых отношений отличаются и руды Олимпиадинского золото-сульфидного месторождения (см. рис. 13Б). Очевидно, что возможность использования показателя изотопной гомогенности свинца как критерия масштаба оруденения (Блюман, 2011) в приложении к золоторудным объектам в углеродисто-терригенных комплексах не подтверждается.

Указанное противоречие удовлетворительно объясняется различным поведением элементов в гетерогенной минералообразующей системе: сера и золото перераспределяются в подвижную газовую фазу, в то время как свинец остается в водно-солевом растворе (Pokrovski, Akinfiyev, Borisova et al., 2014).

Модель массопереноса в гетерогенной термостатированной среде. Таким образом, в качестве главной особенности флюидного режима формирования золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах, определяющей закономерную связь оруденения с газогеохимическими аномалиями, следует рассматривать гетерогенность минералообразующей среды и миграцию углекислотно-метановой фазы как самостоятельного рудоносного раствора.

Однако тот факт, что данный процесс реализуется *независимо от состава газов* (углекислота и/или метан \pm азот), позволяет рассматривать газовую фазу только как «газ-носитель» для гидросульфидных комплексов золота. Другими словами, ведущая роль газообразного флюида в рудообразовании заключается не в его химических, а в физических свойствах. По нашим представлениям, суть явления заключается в особенностях *гидродинамической обстановки* формирования оруденения.

Как следует из результатов термобарогеохимических исследований, месторождения в углеродисто-терригенных комплексах формировались на глубинах *не менее* 2-3 км (в условиях гидростатического градиента эта оценка возрастет в 2.5 раза). При исследовании месторождения Мурунтау нами было установлено, что рост давления с глубиной составляет около 250 бар/км, т.е. близко соответствует литостатическому. Тот же результат получен при исследовании Нежданнинского месторождения (Бортников и др., 2007).

Отсутствие прямой гидродинамической связи с палеопверхностью подтверждается также данными по изотопному составу аргона (Кряжев и др., 2010, 2013): доля атмосферного аргона $Ar_a/(Ar_{rad}+Ar_a)$ во включениях в большинстве случаев составляет 10–40% и только в золото-кварцевых жилах месторождений Яно-Колымской провинции повышается до 60–70%.

Данные по температурам минералообразования в пределах первых сотен метров по падению рудных тел в большинстве случаев температурный градиент не фиксируют. Имеющиеся у нас данные указывают на то, что этот градиент не превышал 40-70°C/км. Соответствующее снижение плотности водного флюида с избытком компенсируется повышением растворимости газов в воде (см. рис. 11).

Подобные обстановки характеризуются глубинным гидродинамическим режимом (Голубев, Шарапов, 1974; Шварцев, 1996), при котором движение порового раствора весьма затруднено. Согласно существующим представлениям, только два фактора могут обеспечить интенсивное восходящее движение рудообразующих флюидов в глубинных условиях: высокое избыточное давление в остаточных магматических очагах и образование трещин. Первый можно рассматривать применительно к обстановкам локализации оруденения в надинтрузивном пространстве и дайковых полях. Второй удовлетворительно объясняет образование жил, но для вкрапленного золото-сульфидного оруденения вопрос остается открытым.

Нами рассматривается третий фактор, который в силу своего фундаментального характера безусловно действует во всех обстановках – это динамическая неустойчивость гетерогенной системы газ/вода. Даже относительно плотный углекислотно-метановый флюид в водно-солевом растворе ведет себя как газовый пузырек в жидкости, т.е. движется вверх. Причем скорость свободного всплытия микропузырьков газа в жидкостях по геологическим меркам чрезвычайно высока и исчисляется миллиметрами в секунду (Кутателадзе, Стырикович, 1976). На вероятность подобного механизма перемещения вещества в гидротермальных системах указывал Д.С.Коржинский (1957).

В насыщенных по отношению к углекислоте и метану гетерогенных системах избыточное по отношению к равновесию количество газа в виде пузырьков неизбежно будет перемещаться вверх (в область более низкого давления и меньшей растворимости газов), где гетерогенное состояние среды становится необратимым. Растворимость газов в воде не одинакова ($CO_2 \gg CH_4 > N_2$, Шварцев 1996), и,

вероятно, по-разному изменяется в зависимости от давления, температуры и солености растворов. Поэтому именно восходящей миграцией газов в виде пузырьков можно объяснить факты захвата во включения различных по составу газовых смесей при одинаковых *PT*-условиях.

Выше было отмечено, что микропузырьки газов и насыщенный в отношении них водно-солевой раствор при исследовании включений отмечаются на всех уровнях гидротермальных систем. Это приводит нас к следующему выводу: уходящий вверх газ непрерывно восполнялся за счет его поступления с более глубоких горизонтов. Длительное существование таких систем возможно только при наличии глубинных длительно функционирующих источников углекислоты и метана.

В технике процесс пропускания газа через слой жидкости, называемый барботажем, широко используется в связи с высокой эффективностью межфазного перераспределения вещества (Кутателадзе, Стырикович, 1976). Поэтому извлечение золота из растворов в газовую фазу является эффективным механизмом мобилизации металла на всем пути движения газообразного флюида. Кроме того, при барботировании происходит разделение элементов по степени летучести (более летучие компоненты перераспределяются в газовую фазу и переносятся в верхнюю часть системы), что объясняет геохимическую ассоциацию Au с As и Sb при незначительной роли цветных металлов в рудах. «Барботирование» как геохимически важный процесс в последнее время все больше привлекает внимание исследователей (Prokofiev, Selector, 2014; Yudovskaya et al., 2016; и др.).

Модель, предлагаемая нами, предполагает активное участие углекислотно-метановой фазы как транспортирующего агента для гидросульфидных комплексов золота. Именно поэтому формирование крупных месторождений невозможно без длительно существующих гетерогенных систем, функционирование которых поддерживается внешними источниками серы, золота и углеродсодержащих газов как транспортирующих агентов. В качестве таких источников, основываясь на приведенных выше изотопных данных, можно принять коровые и мантийно-коровые флюидно-магматические очаги.

Положение 5. Околорудные изотопно-геохимические и термобаро-геохимические ореолы в рудоносных углеродисто-терригенных комплексах являются критериями прогноза скрытых и слабоэродированных месторождений.

На ранней стадии геологоразведочных работ на площади выявляют зоны развития гидротермально-осадочных сульфидов как потенциальные рудные поля. По результатам изотопного анализа серы выделяют и прослеживают потенциально продуктивные литолого-стратиграфические уровни (участки разреза, характеризующиеся минимальной дисперсией $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов при максимальной обогащенности серы тяжелым изотопом).

*В пределах выделенных площадей по сумме содержаний CO_2 и CH_4 в жильном кварце выявляют газогеохимические аномалии. На основе карт распределения $\delta^{34}S$ и CO_2+CH_4 оконтуривают и ранжируют по степени перспективности поисковые участки. Комплексное использование независимых количественных показателей (например, $CO_2*CH_4*\delta^{34}S$) повышает надежность прогнозных построений.*

В практике геологоразведочных работ изотопно-геохимические и термобарогеохимические методы, безусловно, должны использоваться только в комплексе с геологическими, геофизическими и геохимическими методами, составляющими соответствующий прогнозно-поисковый комплекс (Методическое руководство...2002). Изотопно-геохимические и термобарогеохимические показатели особенно актуальны как критерии прогнозирования и поисков скрытых и малоэродированных объектов, т.е. в условиях слабой контрастности первичных геохимических и метасоматических ореолов.

В углеродисто-терригенных комплексах выделяются два геолого-генетических типа золоторудных месторождений, различающиеся по признаку временного разрыва между формированием рудовмещающего субстрата и оруденения (мурунтауский и сухоложский). В зависимости от геолого-генетического типа объекта поисков выбирается соответствующий комплекс прогнозно-поисковых критериев, включая изотопно-геохимические (Нарсеев, Яновский, 1984).

Термобарогеохимические критерии основаны на закономерной приуроченности месторождений мурунтауского типа к газогеохимическим аномалиям – ореолам развития углекислотно-метановых включений в кварце. Выявление и оконтуривание таких ореолов на ранних стадиях геологоразведочных работ обеспечит оперативную корректировку направления поисков и разбраковку геохимических аномалий и рудопроявлений по очередности заверки на основе количественных показателей. Кварц является главным минералом золотых руд, и, в отличие от большинства других минералого-геохимических индикаторов оруденения, включения рудоносных растворов в кварце сохраняют свои параметры в зоне гипергенеза и в россыпях. Последнее позволяет использовать термобарогеохимические данные и для изучения возможных связей между россыпями и их коренными источниками.

Разработанный метод газогеохимической съемки апробирован нами при прогнозно-поисковых работах на Центральном-Ичуевемской площади (Чукотка) в 2012-2016 гг. Площадь (250 кв. км) сложена комплексом углеродсодержащих терригенных пород триаса, прорванных интрузивными телами раннемеловых гранитоидов и насыщенных кварцевыми жилами и прожилками, часть из которых содержит золото-сульфидную минерализацию.

Пробы кварца отбирали из всех жильно-прожилковых зон с поверхности, а на втором этапе работ – из керна поисковых скважин. Для выделения генераций кварца

использовали метод термолюминесценции. По результатам работ строились карты поисковых признаков. Выявленные аномалии разбраковывались по степени перспективности на основании комплексного термобарогеохимического показателя $Q \cdot G$, где Q – степень близости кварца к потенциально продуктивной генерации в баллах, G – степень превышения показателя газонасыщенности кварца ($\text{CO}_2 \cdot \text{CH}_4$) над газогеохимическим фоном (F), $G = (\text{CO}_2 \cdot \text{CH}_4)/F$. Из более чем 100 изученных жильно-прожилковых зон (около 1.5 тыс. проб) были выделены 14, остальные показали «фоновые» характеристики.

Распределение термобарогеохимических показателей на площади наиболее золотоносного из разбуренных участков подтверждает устойчивость связи газогеохимических ореолов с зонами развития *крупнообъемного* оруденения. Интенсивные и протяженные аномалии метана и углекислоты выявлены в осевой, наиболее продуктивной части главной рудной зоны.

Полученные результаты согласуются с данными, полученными при анализе эталонных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах, и являются основанием для рекомендаций по использованию газогеохимической съемки при прогнозно-поисковых работах.

При прогнозировании и поисках месторождений *сухоложского* типа важное значение приобретают литолого-стратиграфические построения с широким применением фациального и палеогеографического анализа с целью выявления конседиментационных рифтогенных впадин с металлоносными фациями осадков как потенциальных рудных полей. Поэтому при прогнозно-поисковых работах наибольшую эффективность и практическую значимость будут иметь такие индикаторные показатели, которые являются устойчивыми атрибутами рудоносных фаций и могут быть выявлены путем анализа углеродисто-терригенных пород современными инструментальными методами. Предлагаемый нами изотопно-геохимический метод, по сути дела, является разновидностью *хемостратиграфии*, поэтому использование изотопных данных при литолого-фациальных исследованиях существенно повысит их эффективность.

Изотопно-геохимические критерии и признаки особых обстановок, благоприятных для формирования крупных скоплений рудного вещества, разработаны нами в первую очередь по результатам изучения сухоложского и вернинского рудных полей (Кряжев, 2010), т.к. определяющая роль конседиментационных процессов при формировании сухоложских руд достаточно надежно обоснована геологическими, минералогическими и изотопными данными. Критерии формулируются следующим образом:

- устойчивая обширная положительная аномалия $\delta^{34}\text{S}$ сульфидной серы при отсутствии отрицательных значений, совмещенная с областью повышенных значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$, соответствует конседиментационной рифтогенной впадине с проявлениями эксгальационных процессов – потенциальному рудному полю. Его границы (фланги гидротермально-осадочной палеосистемы) маркируются

появлением в разрезе отдельных горизонтов и слоев, обогащенных тяжелым изотопом ^{34}S на фоне широких вариаций $\delta^{34}\text{S}$ в области отрицательных значений;

- части потенциального рудного поля с аномально высокими значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ и/или развитием скоплений гидротермально-осадочного пирита (значения $\delta^{34}\text{S}$ в подавляющем большинстве случаев соответствуют интервалу от +5 до +12‰) отвечают предполагаемым зонам рудоподводящих каналов и могут быть выделены в качестве перспективных поисковых участков.

Важно отметить, что эпигенетическая трансформация сульфидов в закрытой «метаморфической» системе (собирабельная перекристаллизация, локальное перетолжение и т.п., в том числе с изменением минеральных форм серы) не сопровождается изменением изотопных отношений и в разрезах сохраняется первичная изотопно-геохимическая зональность.

Апробация разработанных изотопно-геохимических критериев проведена автором в 2014-2015 гг. вместе с геологами ЦНИГРИ (Кряжев, Васюков, Шумилин, 2016) при выполнении геологоразведочных работ в Бодайбинском золотоносном районе. Сульфиды для изотопного анализа отбирали из тяжелой фракции шлихов, полученных при рядовом опробовании мелких шурфов (обнаженность территории плохая), штуфов, протолок при минералого-геохимическом картировании по опорным профилям. Опробование проводилось с шагом 50 м. В результате выявлены ореолы пиритизации и ореолы шлихового золота, а также изотопно-геохимические аномалии (рис. 14).

Сухоложское рудное поле, служащее и в данном случае эталонным объектом, выделяется на площади широким ореолом распространения сульфидов с $\delta^{34}\text{S}$ от +6 до +16‰. В южной части опорного профиля на фоне развития сульфидов с биогенно-осадочной серой (высокая дисперсия $\delta^{34}\text{S}$ в области отрицательных значений) выявляются две области развития сульфидов, по изотопным характеристикам отвечающие эталонному объекту. Одна из них приурочена к породам аунакитской свиты в верховьях р.Безымянка. Продуктивность данной части разреза подтверждается наличием здесь минералогических ореолов самородного золота. Аномалия прослежена в восточном направлении. Именно на этом литолого-стратиграфическом уровне локализованы месторождения Вернинское и Невское, которые непременно были бы обнаружены изотопно-геохимическим методом по своеобразному околорудному «ореолу», который простирается от месторождений на расстояние не менее 10 км.

Второй аномальный участок расположен в междуречье р.Безымянка-р.Угахан в поле отложений илигирской свиты. Потенциальная продуктивность данного уровня подтверждается приуроченностью к нему мелких рудопроявлений Атырканское и Кундускитское. Участки этих рудопроявлений отличаются от месторождений Сухой Лог и Вернинское высокими градиентами изотопно-геохимической зональности разреза, характерными для флангов гидротермально-осадочных систем.

Таким образом, использование изотопных данных позволяет выделить и очертить потенциально продуктивные литолого-стратиграфические уровни (или рудоносные зоны расланцевания, если принять точку зрения А.И.Иванова и С.Г.Соловьева) в ранге перспективных рудных полей и существенно локализовать площади для постановки детальных поисковых работ. В рассмотренном случае протяженность выделенных участков составляет около 10% от общей длины изученного профиля. Независимо от интерпретации генезиса изотопно-геохимических аномалий, локализация промышленного оруденения в их пределах наиболее вероятна.

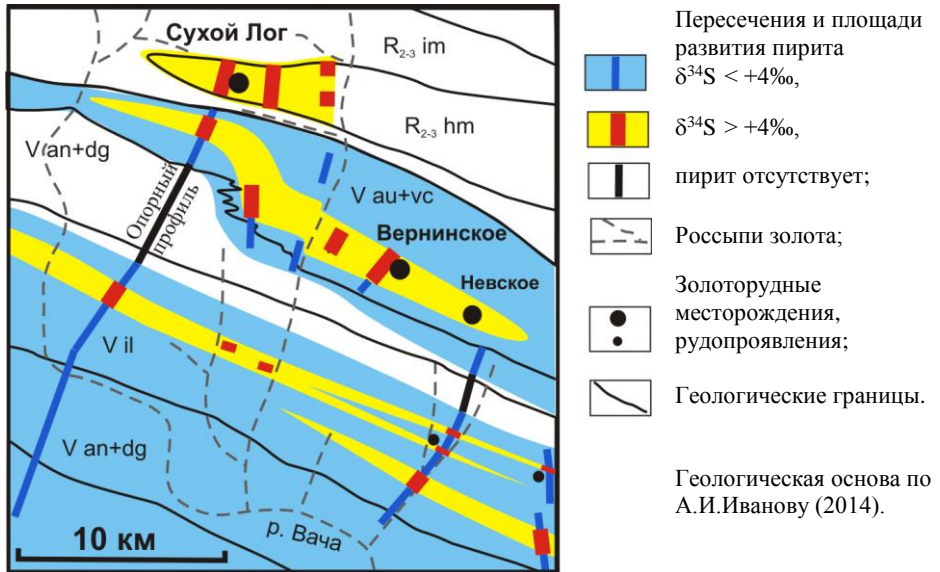
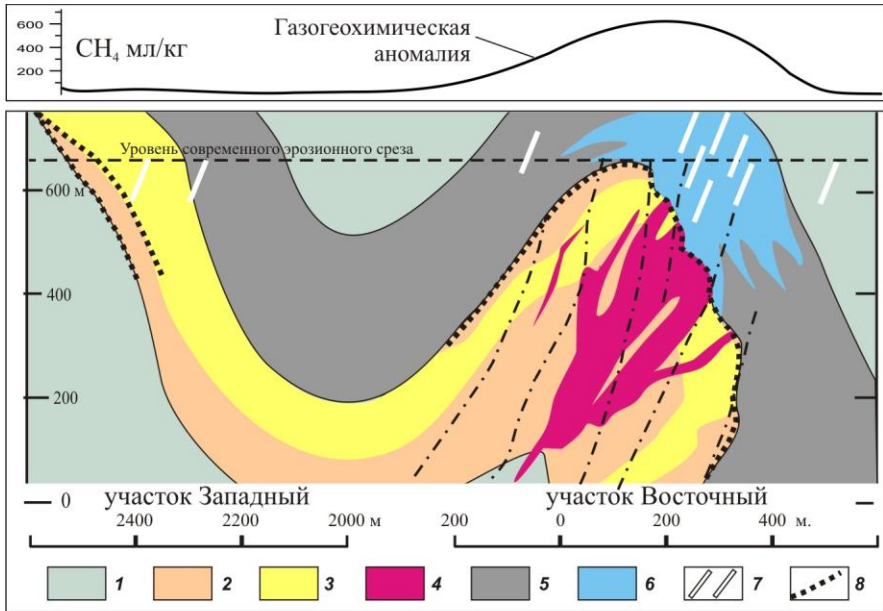


Рис. 14. Распределение изотопного состава сульфидной серы в южной части сухоложского рудного узла

Как было показано нами, пространственное размещение минерало- и рудообразующих систем конседиментационного и коллизийного этапов контролировали одни и те же долгоживущие структуры. Выявленная закономерность позволяет рекомендовать комплексное использование изотопно-геохимических и термобарогеохимических поисковых критериев, что значительно повысит надежность и достоверность прогнозных построений за счет взаимного усиления и дополнения этих по сути абсолютно независимых количественных показателей. Данное положение проиллюстрировано на примере Олимпиадинского месторождения, которое (как и Сухой Лог) можно рассматривать в качестве примера скрытого или слабоэродированного крупного месторождения (рис. 15).



1 – кварц-сланцевые сланцы; 2 – терригенно-карбонатные породы, содержащие вкрапленность сульфидов железа ($\delta^{34}\text{S} = +7 \pm 1\%$): рудовмещающий горизонт, бедные руды; 3 – те же породы, содержащие сульфиды с $\delta^{34}\text{S} = +10...+20\%$; 4 – зоны развития высокозолотоносного арсенопирита ($\delta^{34}\text{S} = +4 \pm 1\%$); 5 – углеродистые сланцы, содержащие вкрапленность сульфидов железа с $\delta^{34}\text{S} = -5...-20\%$; 6 – те же породы, содержащие сульфиды с $\delta^{34}\text{S} = 0...-5\%$; 7 – кварцевые прожилки; 8 – контуры рудных тел.

Рис. 15. Прогнозно-поисковая модель Олимпиадинского месторождения

Изотопно-геохимическая зональность свидетельствует о совмещении в структуре Олимпиадинского месторождения продуктов двух рудообразующих флюидных систем. Ранняя по внутреннему строению отвечает модели оруденения сухоложского типа (см. рис. 5). С ней связаны бедные и рядовые преимущественно пирит-пирротиновых руды, основной объем которых сосредоточен на Восточном участке. Поздняя система проявлена только на этом участке. Она сформировала наиболее золотоносную антимонит-арсенопиритовую минерализацию и обширный ореол включений метана в кварце (см. рис. 12). Идентичность $\delta^{34}\text{S}$ антимонита и арсенопирита как в отдельных штуфах, так и в среднем по месторождению указывает на принадлежность этих минералов к одному этапу минерализации.

Отдельно следует отметить изотопно-геохимическую зональность, проявленную в перекрывающей толще углеродистых сланцев. На каком этапе она была сформирована, неизвестно. Однако при использовании $\delta^{34}\text{S}$ как дополнительного поискового критерия при газогеохимической съемке (например, показателя $\text{CH}_4 \cdot \delta^{34}\text{S}$) точность прогноза центральной наиболее богатой части скрытого месторождения многократно возрастет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа и обобщения изотопно-геохимических и термобарогеохимических данных, полученных по ряду эталонных золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах, автор пришел к следующим выводам

В процессе формирования месторождений привнос золота в рудные тела осуществлялся эндогенными флюидами с обязательным участием серы, что нашло свое отражение в узкой дисперсии $\delta^{34}\text{S}$ золотоносных сульфидов. Выявленная закономерность согласуется с представлениями об общности геохимической истории серы и золота в рудообразующих системах и ведущей роли гидросульфидных комплексов в гидротермальном транспорте благородного металла. Поэтому при разработке геолого-генетических моделей месторождений именно изменчивость $\delta^{34}\text{S}$ т.е. *изотопно геохимическая зональность* может служить наиболее информативным и объективным индикатором процессов привноса-выноса рудного вещества.

Среди месторождений в углеродисто-терригенных комплексах выделяются два главных геолого-генетических типа, различающихся по времени поступления основной массы золота вместе с серой в область рудоотложения.

Формирование месторождений сухоложского типа описывается эксгальационно-осадочной моделью с накоплением основной массы золото-сульфидных руд на конседиментационном этапе и последующей частичной регенерацией при метаморфизме. По своему строению и параметрам изотопно-геохимической зональности такие месторождения сопоставимы с колчеданными. Они представлены залежами слоистых, линзовидно-пластовых и послойно-вкрапленных преимущественно пиритовых руд, отложение которых происходило в конседиментационных впадинах. Наиболее мощные и золотоносные тела формируются в области рудоподводящих каналов. Для месторождений характерна монометалльность руд, практическое отсутствие геохимических (за исключением As) и метасоматических ореолов. Эффективным методом их прогноза и поисков является выявление и картирование эксгальационно-осадочных палеосистем как потенциальных рудных полей по изотопному составу серы.

Кроме месторождений сухоложского рудного узла объекты данного типа присутствуют в Центрально-Колымском регионе (Хатыннах-Олботское рудное поле), на Енисейском кряже (бедные руды Олимпиадинского месторождения, Южное рудопроявление и др.), в Кызылкумах (Амантайтау). Из зарубежных аналогов следует отметить Хоумстейк.

Месторождения мурунтауского типа сформировались на коллизионном этапе в результате длительного привноса золота и серы из глубинных мантийно-коровых очагов. В зависимости от соотношения мантийного и корового вещества, а также особенностей состава последнего, каждый рудогенерирующий очаг приобретает

характерный только для него изотопный состав серы, который можно использовать в качестве изотопной «метки» при идентификации источников рудной минерализации.

Этой модели соответствуют как золото кварцевые месторождения (Мурунтау, Советское, Наталкинское), так и золото-сульфидные (Кумтор, Даугызтау, Кокпатас, золото-сурьмяные руды Олимпиадинского месторождения). Вещественный вклад углеродисто-терригенных пород как источника золота при их формировании был незначителен. В то же время изотопные данные не противоречат предположению о вовлечении в рудно-магматические системы вещества конседиментационных эксгалационно-осадочных руд.

Формирование золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах происходило в условиях глубинного гидродинамического режима при давлении свыше 0.5 кбар. Эффективный перенос серы и золота осуществлялся в гетерогенной среде независимо от водно-солевого раствора при участии подвижной углекислотно-метановой фазы, поступающей из рудогенерирующего очага. Основной причиной рудоотложения служил распад комплексных соединений золота вследствие связывания серы в сульфидных минералах.

Рудоносный углекислотно-метановый флюид при фильтрации накапливается в кварце в виде газовых включений. Подобные своеобразные газеогeoхимические аномалии формировались на всех крупных месторождениях мурунтауского типа и могут служить эффективным критерием их прогноза и поисков.

Минералообразующие и рудообразующие процессы на конседиментационном и коллизионном этапах наиболее интенсивно проявились вблизи единых центров повышенной эндогенной активности. В качестве последних вероятнее всего выступают неоднократно активизированные разломы фундамента и узлы их пересечения. Выявленная закономерность объясняет всю сложность и неоднозначность трактовки взаимоотношений разновозрастной минерализации при ее различном вкладе в золотоносность руд. Она позволяет рассматривать конседиментационные и коллизионные процессы как проявления двух подсистем единой длительно развивающейся рудообразующей системы, эволюция которой может привести к возникновению крупного месторождения.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК

1. Русинов В.Л., Русинова О.В., **Кряжев С.Г.**, Щегольков Ю.В., Алышева Э.И., Борисовский С. Е. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений. 2008. Т.50. №1. С.1-44.
2. Гаврилов А.М., **Кряжев С.Г.** Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // Разведка и охрана недр. 2008. № 8. С.3-16.
3. **Кряжев С.Г.**, Устинов В.И., Гриненко В.А. Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным // Геохимия. 2009. №10. С.1108-1117.

4. **Кряжев С.Г.**, Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе состава рудообразующих флюидов гидротермальных рудных месторождений // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. №4. 2006. С.30-36.

5. Аристов В.В., Константинов М.М., **Кряжев С.Г.**, Устинов В.И. Генетические особенности месторождений золота и серебра Западного Верхоянья по термобарометрическим и изотопным данным // Геохимия. 2008. №3. С.347-352.

6. **Кряжев С.Г.** Современные проблемы теории и практики термобарогеохимии // Руды и металлы. 2010^б. №2. С.38-45.

7. **Кряжев С.Г.** Минералого-геохимические методы поисков стратоидных золоторудных месторождений // Руды и металлы. 2010^а. №1. С.74-81.

8. Константинов М.М., **Кряжев С.Г.**, Устинов В.И. Особенности рудообразующей системы Зодского золото-теллуридного месторождения (Армения) по изотопно-геохимическим данным // Геохимия. 2010. №9. С.1002-1005.

9. **Кряжев С.Г.**, Хачатрян Г.К., Двуреченская С.С., Васюта Ю.В., Виленкина Ю.В. Комплекс минералого-геохимических методов прогноза и поисков золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Руды и металлы. № 3-4. 2011. С.101-102.

10. **Кряжев С.Г.**, Гриненко В.А., Устинов В.И. Вероятные причины эволюции состава рудообразующих флюидов на Березовском золоторудном месторождении (Средний Урал) // Геохимия. 2011. № 1. С.101-107.

11. Аристов В.В., Прокофьев В.Ю., Имамендинов Б.Н., **Кряжев С.Г.**, Алексеев В.Ю., Сидоров А.А. Особенности рудообразования на золото-кварцевом месторождении Дрожное (Восточная Якутия, Россия) // Доклады Академии наук. 2015. Том 464. № 1. С.65–70.

12. **Кряжев С.Г.** Газогеохимические ореолы золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Руды и металлы. 2016^а. № 4. С.94-97.

13. **Кряжев С.Г.**, Белов С.В., Игнатов П.А., Васюта Ю.В., Аули Э. Флюидный режим формирования золото-кварцевых месторождений Амесса и Тирек в Алжирской Сахаре // Руды и металлы. 2017. № 1. С.91-96.

14. Мансуров Р.Х., **Кряжев С.Г.**, Зеликсон Б.С. Минералого-геохимические особенности рудопроявления Южное, Енисейский кряж // Руды и металлы. 2017. №1. С.55-66.

15. **Кряжев С.Г.** Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // Отечественная геология. 2017. № 1. С.28-38.

16. Soloviev S.G, **Kryazhev S.G**, Dvurechenskaya S.S. Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au-(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural, Russia // Miner Deposita. Volume 48. Issue 5. 2013. pp.603-627.

17. Soloviev S.G., **Kryazhev S.** Geology, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Chorukh-Dairon W–Mo–Cu skarn deposit in the Middle Tien Shan, Northern Tajikistan // Ore Geology Reviews. Volume 80. 2017. pp.79–102.

18. Soloviev, S.G. & **Kryazhev, S.G.** Geology, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Skrytoe reduced-type W skarn and stockwork deposit, Sikhote-Alin, Russia // Miner Deposita. 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-016-0705-5>

19. Soloviev S.G., **Kryazhev S.G.**, Dvurechenskaya S.S. Geology, Mineralization, Stable Isotope, and Fluid Inclusion Characteristics of the Vostok-2 Reduced W-Cu Skarn and Au-W-Bi-As Stockwork Deposit, Sikhote-Alin, Russia // Ore Geology Reviews. Volume 86. 2017^а. pp. 338-365.

20. Soloviev S.G., **Kryazhev S.G.**, Dvurechenskaya S.S.. Geology, Mineralization, and Fluid Inclusion Study of the Kuru-Tegerek Au-Cu-Mo Skarn Deposit in the Middle Tien Shan, Kyrgyzstan // Miner Deposita. 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-017-0729-5>

Монографии

21. **Кряжев С.Г.** Изотопно-геохимический режим формирования золоторудного месторождения Мурунтау. -М: ЦНИГРИ, 2002. - 91 с.
22. Константинов М.М., Косовец Т.Н., **Кряжев С.Г.**, Стружков С.Ф., Наталенко М.В., Устинов В.И. Строение и развитие золотоносных рудообразующих систем. Серия: Модели месторождений благородных и цветных металлов. Монография. Под редакцией А.И.Кривцова. - М.: ЦНИГРИ, 2002. - 192 с.

Статьи в иных изданиях

23. **Кряжев С.Г.**, Глухов А.П., Русинова О.В., Кузнецова С.В. Изотопно-геохимический режим формирования золото-кварцевого месторождения Советское // В сб. Прикладная геохимия. Вып.4. Аналитические исследования. – М. ИМГРЭ, 2003. С.154-164.
24. Остапенко Л.А., Рыжов О.Б., **Кряжев С.Г.**, Быстрова А.К. Пириты терригенных черносланцевых пород Дегдеканского золоторудного поля, Центрально-Колымский район // Руды и металлы. 2005. №3. С.45-57.
25. Стружков С.Ф., Наталенко М.В., Чекваидзе В.Б., Исакович И.З., Голубев С.Ю., Данильченко В.А., Обушков А.В., Зайцева М.А., **Кряжев С.Г.** Многофакторная модель золоторудного месторождения Наталка // Руды и металлы. №3. 2006. С.34-43.
26. **Кряжев С.Г.** Термобарогеохимические критерии локального прогноза большеобъемных золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах / Смирновский сборник-2014. Гл. редактор Старостин В.И.; -М. Фонд им. академика В.И.Смирнова., 2014. С.66-72.

Материалы конференций и тезисы докладов

27. **Кряжев С.Г.** Изотопно-геохимический режим формирования Олимпиадинского золото-сульфидного месторождения // Роль минералогии в познании процессов рудообразования. Материалы годичной сессии МО РМО. –М.: ИГЕМ РАН, 2007. С.220-225
28. Русинова О.В., **Кряжев С.Г.**, Кряжев В.С., Щегольков Ю.В. «Чуждые» элементы в золоторудных полях Средней Азии // Проблемы геологии рудных месторождений, минералогии, петрологии и геохимии. Материалы научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Ф.В.Чухрова. М.: ИГЕМ РАН. 2008. С.334-337.
29. **Кряжев С.Г.** Источники серы руд золото-мышьяково-сульфидных месторождений в терригенных комплексах // Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования. Материалы научной конференции. –М.: ИГЕМ РАН. 2010. С.354-355.
30. **Кряжев С.Г.**, Ганжа Г.Б., Двуреченская С.С. Парагенезисы золота с сульфидами в черных сланцах Сухоложского рудного района // Материалы Всероссийской конференции «Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований». –М.:ИГЕМ РАН. 2010. Том I. С. 298-300.
31. **Кряжев С.Г.**, Двуреченская С.С., Уютов В.И. Условия формирования золоторудного месторождения Кекура // Материалы Всероссийской конференции (с международным участием) «Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений», посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.А.Шило (1913–2008). Москва: ИГЕМ РАН. 2013. С.89.
32. **Кряжев С.Г.**, Арифуров Ч.Х., Двуреченская С.С., Цымбалюк Н.В. Литолого-структурные и минералого-геохимические признаки оруденения сухоложского типа в пермских отложениях Центральной Колымы // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири: материалы 1-й науч.-практ. конф. Т. 1 / Отв. ред. С. П. Зайцев. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2014. С.81-83.

33. **Кряжев С.Г.**, Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Геохимические особенности включений в кварце золоторудных месторождений по данным анализа водных вытяжек методом ICP MS // *Материалы XIII Международной конференции по термобарогеохимии и IV симпозиума APiFIS*. -М: ИГЕМ РАН. 2008. Т.1. С. 30-33.

34. Стружков С.Ф., **Кряжев С.Г.**, Наталенко М.В., Голубев С.Ю. Отличия золото-кварцевых и золото-полисульфидно-кварцевых месторождений Центральной Колымы по термобарогеохимическим данным // *Материалы XIII Международной конференции по термобарогеохимии и IV симпозиума APiFIS*. -М: ИГЕМ РАН. 2008. Т.2. С.124-127.

35. **Kryazhev S.G.** On the pressure estimate methodology using CO₂-bearing fluid inclusions. // *ACROFI III and TBG XIV Abstracts Volume: Abstracts of III Biennial Conference of Asian Current Research on Fluid Inclusions and XIV International Conference on Thermobarogeochemistry, Novosibirsk, 2010 / SB RAS, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy*. - Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2010. pp.106-107.

36. **Kryazhev S.G.**, Vasyuta Yu.V. Physico-Chemical Properties of the ore-forming fluids on the Bakyrchik gold deposit (Eastern Kazakhstan) // *ACROFI III and TBG XIV Abstracts Volume: Abstracts of III Biennial Conference of Asian Current Research on Fluid Inclusions and XIV International Conference on Thermobarogeochemistry, Novosibirsk, 2010 / SB RAS, V.S.Sobolev Institute of Geology and Mineralogy*. -Novosibirsk:Publishing House of SB RAS, 2010. pp.108-109

37. **Кряжев С.Г.**, Васюта Ю.В. Особенности флюидных включений в кварце золоторудных месторождений черносланцевой формации / *Материалы XV Всероссийской конференции по термобарогеохимии*. -М: ИГЕМ РАН. 2012. С.43-44.

38. **Кряжев С.Г.**, Васюта Ю.В. Методические аспекты газохромато-графического анализа углекислотно-метановых включений // *Материалы XVI Всероссийской конференции по термобарогеохимии*. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2014. С.120-121.

39. **Кряжев С.Г.** Геологическая позиция вольфрама на комплексном золото-вольфрамовом месторождении Тянь-Шаня // В сб. «Комплексное использование вольфрамовых месторождений в СССР». Тезисы докладов. ЛГУ. 1986. Раздел IV. С.43.

40. **Кряжев С.Г.**, Чековадзе В.Б., Миляев С.А., Исакович И.З. Перспективные направления разработки и совершенствования минералого-геохимических поисковых методов // *Прогноз, поиски, оценка рудных и нерудных месторождений - достижения и перспективы*. Тезисы докладов. М.:ЦНИГРИ. 2008. С.112

41. **Кряжев С.Г.** Крупнообъемные золоторудные месторождения в углеродисто-терригенных толщах: генетические модели и прогнозно-поисковые критерии // *Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных и цветных металлов — состояние и перспективы*. Тезисы докладов. -М.: ЦНИГРИ. 2015. С.29.

42. **Кряжев С.Г.**, Васюта Ю.В., Виленкина Ю.В. Термобарогеохимические методы локального прогноза и поисков золоторудных месторождений // «*Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений цветных и благородных металлов, алмазов – состояние и перспективы*». Тезисы докладов. -М.:ЦНИГРИ. 2016. С.94-95.

43. **Кряжев С.Г.**, Васюков В.Е., Шумилин Д.А. Изотопно-геохимические критерии прогнозирования большеобъемного золотого оруденения в углеродисто-терригенных толщах // «*Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений цветных и благородных металлов, алмазов – состояние и перспективы*». Тезисы докладов. -М.:ЦНИГРИ. 2016. С.37-38.

44. Устинов В.И., Гриненко В.А., **Кряжев С.Г.** Физико-химические условия метаморфогенного рудообразования в Ленском золотоносном районе // *ЕСЭМПГ-2007. ГЕОХИ РАН*, С.78.

45. **Кряжев С.Г.**, Устинов В.И., Гриненко В.А. Физико-химические условия березитизации по изотопным и термобарогеохимическим данным // *ЕСЭМПГ-2008. ГЕОХИ РАН*, С.44.

46. **Кряжев С.Г.**, Васильева М.Е., Конышев В.О. Условия формирования золото-ртутного месторождения Кючус по изотопным данным // XV Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.: ГЕОХИ РАН. 1998. С.140-141.

47. **Кряжев С.Г.** Фракционирование изотопов при термическом вскрытии флюидных включений // XVI Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.: ГЕОХИ РАН. 2001. С.124-125

48. **Кряжев С.Г.**, Васильева М.Е. Изотопный состав кислорода жильного кварца золоторудных месторождений Куларского района // XVI Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.: ГЕОХИ РАН. 2001. С.126.

49. **Кряжев С.Г.** Изотопно-геохимический режим формирования золото-полисульфидно-кварцевых месторождений Урала // XVII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.: ГЕОХИ РАН. 2004. С. 131-132.

50. **Кряжев С.Г.** Изотопные системы флюидных включений в кварце // XVII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.: ГЕОХИ РАН. 2004. С.133.

51. Аристов В.В., **Кряжев С.Г.**, Устинов В.И. Условия формирования золоторудных месторождений Адычанского рудного района по изотопным данным // XVIII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов.-М.: ГЕОХИ РАН. 2007. С. 36-37.

52. **Кряжев С.Г.**, Гриненко В.А. Изотопный состав и источники серы золото-сульфидных месторождений Енисейского кряжа // XVIII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.: ГЕОХИ РАН. 2007. С. 141-142.

53. **Кряжев С.Г.**, Устинов В.И., Гриненко В.А. Изотопно-геохимический режим метаморфогенного рудообразования в Ленском золотоносном районе // XVIII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.: ГЕОХИ РАН. 2007. С.143-144.

54. Рыжов О.Б., Стружков С.Ф., **Кряжев С.Г.**, Устинов В.И. Изотопно-геохимические особенности золоторудного месторождения Дубач // XVIII Симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.: ГЕОХИ РАН. 2007. С. 233-234.

55. **Кряжев С.Г.**, Гриненко В.А. Изотопный состав серы золоторудных месторождений основных типов // XIX симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.:ГЕОХИ РАН. 2010. С.191-193.

56. **Кряжев С.Г.**, Крымский Р.Ш. Источники рудного свинца месторождений золота в карбонатно-терригенных толщах // XIX симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.:ГЕОХИ РАН. 2010. С.194-197.

57. **Кряжев С.Г.**, Прасолов Э.М., Розинов М.И., Сергеев С.А. Изотопный состав благородных газов флюидных включений в жильном кварце Ленского золотоносного района // XIX симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М.:ГЕОХИ РАН. 2010. С.197-200.

58. **Кряжев С.Г.**, Прасолов Э.М., Розинов М.И., Сергеев С.А. Изотопный состав благородных газов флюидных включений в кварце месторождений золота терригенных комплексов // XX симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М: ГЕОХИ РАН. 2013. С.200-203.

59. **Кряжев С.Г.** Источники свинца золоторудных гигантов Средней Азии // XX симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М: ГЕОХИ РАН. 2013. С.197-200.

60. **Кряжев С.Г.** Изотопно-геохимическая модель золото-сульфидного месторождения Кумтор (Срединный Тянь-Шань) // XXI симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П.Виноградова. Тезисы докладов. -М: ГЕОХИ РАН. 2016⁶. С.253-254.

Подписано в печать 30.05.2017 г.
Формат бумаги 31x30 1/2
Тираж 99 экз.
Полиграфическая база ФГУП ЦНИГРИ
117545, Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1