

На правах рукописи



РЯБУХА Мария Алексеевна

**ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ И ВОЗРАСТ ФОРМИРОВАНИЯ ОРОГЕННЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА
(на примере Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных
месторождений)**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск 2023

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

Научный руководитель:

Томиленко Анатолий Алексеевич,
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник лаборатории
термобарогеохимии Института геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН

Официальные оппоненты:

Дамдинов Булат Батуевич,
доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной
работе ФГБУН Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН,
заведующий лабораторией металлогении и рудообразования (г. Улан-Удэ)

Макаров Владимир Александрович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующий кафедрой геологии месторождений и методики разведки
Сибирского федерального университета (г. Красноярск)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

Защита состоится «27» сентября 2023 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, в конференц-зале.
Адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д.3.
Телефон: +7 (383) 373-05-26, Факс: +7 (383) 373-05-61, e-mail: turkina@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте <https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovery/d-003-067-03/zashchity>

Автореферат разослан «15» августа 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.050.01,
доктор геолого-минералогических наук

О.М. Туркина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Многие десятилетия Красноярский край является лидером золотодобывающей промышленности в нашей стране: балансовые запасы и прогнозные ресурсы золота в регионе составляют 20.3% от общероссийских. Здесь разрабатываются крупные месторождения в терригенно-карбонатных и терригенных толщах (Олимпиадинское, Ведугинское, Благодатное, Титимухта и др.). На территории Енисейского кряжа выявлено 305 месторождений, в том числе перспективных проявлений золота. При этом более 25 % рудного золота сосредоточено в крупных месторождениях и рудопроявлениях труднообогатимых золото-сульфидно-кварцевых руд с низким содержанием металла [Поляков, 2003]. Среди месторождений Красноярского края на долю объектов с запасами до 20 т. приходится 74 % от общего количества месторождений, из них 47 % - месторождения с запасами золота до 5 т. [Поляков, 2003]. Месторождения рудного золота связаны с кварцевыми жилами, расположенными в метаморфических толщах, приурочены непосредственно к разломным зонам палеозойского возраста [Сердюк, 2004, 2010] и относятся к, так называемым, орогенным месторождениям золота.

В настоящее время в рудной геологии вопрос об источнике и генезисе золота на “орогенных месторождениях” остается остро дискуссионным, и всесторонние исследования золотоносных флюидов являются актуальными. Проблема связи орогенного золота в метаморфических комплексах с корообразующими процессами – магматизмом, метаморфизмом, гранитизацией наиболее дискуссионна и обсуждается многими исследователями [Ли, 1982, 1997; Böhlke, 1982; Сазонов, 1995, 1998; Groves et al., 1998; Заблоцкий, 2000; Заблоцкий и др., 2002; Корнев и др., 2004; Goldfarb et al., 2005; Сазонов и др., 2010; Сердюк и др., 2010; Чугаев и др., 2010; Phillips, Powell, 2010; Feng et al., 2021; Hu et al., 2022]: связано ли оруденение с процессами метаморфизма, магматизма, или деятельностью глубинных флюидов, являются ли эти процессы поставщиками рудного вещества; открыт вопрос источника золота, его транспортировки и осаждения. К тому же, в теории эндогенного рудообразования одно из центральных мест занимает проблема источника рудного вещества и гидротермальных растворов, возраста гидротермальной минерализации. Получить ответы на эти вопросы можно с помощью изучения прямых источников информации о минералообразующем растворе - флюидных включений в минералах, изотопных исследований серы, углерода, гелия, которые помогут охарактеризовать минералообразующую среду, рудоносность и проследить ее эволюцию, а также приблизиться к пониманию источника золота. Результаты таких исследований могут быть использованы для прогнозных, поисковых и оценочных работ на золоторудных объектах подобных типов. Исследования были проведены нами на трех золоторудных месторождениях Красноярского края: Богунайское, Герфедское и Панимбинское.

Исследованиями процессов метаморфизма в мобилизации, миграции и концентрации рудного вещества в докембрийских толщах Енисейского кряжа в разные годы занимались Петровская Н.В., Генкин А.Д., Томиленко А.А., Гибшер Н.А., Бортников Н.С., Борисенко А.С., Корнев Т.Я., Ли Л.В., Ножкин А.Д., Петров В.Г., Шохина О.И., Сазонов А.М., Сердюк С.С. и другие. Вместе с тем, для многих Au-месторождений генетические вопросы до сих пор остаются нерешёнными. В частности, сами флюиды золоторудных месторождений Енисейского кряжа недостаточно полно изучены. Результаты наших исследований позволяют получить дополнительную информацию о генезисе трех кварц-золоторудных

месторождений, их минералообразующих средах, рудоносности, РТ-параметрах формирования, а также о причинах, влияющих на масштаб золотоносности.

Объекты исследования. Проведено исследование флюидных включений в минералах трех золоторудных месторождений: Герфедском (золото-кварцевая формация, Енисейский золото-кварцевый пояс), Панимбинском (золото-сульфидная формация, Енашиминско-Чиримбинский пояс) и Богунайском (золото-серебряно-кварц-сульфидная формация, Кузеевско-Богунайский пояс) [Сердюк, 2004]. Рассматриваемые золоторудные месторождения расположены на Енисейском кряже, который является частью байкальской складчатости возрастом 900-520 млн. лет, обрамляющей древнюю Сибирскую платформу. Породы, вмещающие золотоносные жилы, представляют собой нижнепротерозойские гранулитогнейсы канской серии (Богунайское месторождение), верхнепротерозойские кристаллические сланцы эпидот-амфиболитовой фации кординской свиты (Панимбинское) и зеленосланцевой фации пенченгинской свиты (Герфедское).

Цели и задачи исследования

Цель: определить физико-химические условия и возраст формирования Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных месторождений.

В ходе исследования предполагалось решить следующие задачи:

- 1) Определить Р-Т условия формирования оруденения;
- 2) Установить агрегатное состояние и состав минералообразующих сред, формирующих оруденения;
- 3) Определить изотопные характеристики серы сульфидов, углерода и кислорода карбонатов, углерода углекислоты и гелия из флюидных включений в кварце;
- 4) Установить возрастные датировки формирования золоторудных месторождений;
- 5) Выяснить возможный источник(и) минералообразующих флюидов.

Фактический материал и методы исследования. Для решения поставленных задач были исследованы образцы жильного кварца, сульфидов и серицита из золоторудных жил Герфедского (17 обр.), Панимбинского (23 обр.) и Богунайского (40 обр.) месторождений. Образцы были предоставлены д.г.-м.н. Саоновым А.М. (СФУ, Красноярск) и н.с. Хоменко М.О. (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Исследования проводились в лаборатории термобарогеохимии, лаборатории изотопно-аналитических методов ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), а также в Геологическом институте КНЦ РАН (г. Апатиты). Для выяснения химического состава флюидных включений использовалась масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Для анализа состава флюидов использовались рамановская спектроскопия (КР-спектроскопия), газовая хромато-масс-спектрометрия, для определения возраста Au-оруденения применялось ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирование, для выяснения источника минералообразующих растворов и золота использовались изотопные анализы серы сульфидов, углерода углекислоты и гелия из флюидных включений в кварце.

Научная новизна. Впервые определены физико-химические условия образования данных месторождений, состав флюидов методом хромато-масс-спектрометрии, возраст оруденения, изотопный состав гелия, серы и углерода. Причем, определение состава флюидных включений в кварце и сульфидах методом беспиролизной газовой хромато-масс-спектрометрии выполнено впервые и представляет большой научный интерес для выяснения генетических особенностей подобных золоторудных месторождений.

Практическая значимость полученных результатов. Полученные результаты термобарогеохимических исследований рудных и нерудных минералов на

Богунайском, Герфедском и Панимбинском месторождениях могут использоваться в качестве поисково-оценочных критериев при геологоразведке и доразведке золоторудных объектов. В связи с продолжающейся дискуссией о генезисе и соотношении золотого оруденения с процессами магматизма и метаморфизма полученные данные являются важными для понимания условий формирования и других орогенных месторождений золота Енисейского кряжа.

Апробация результатов работы и публикации по теме диссертации. Автором лично и в соавторстве опубликовано в общей сложности 29 работ, из которых 9 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, а также 20 тезисов в материалах российских и международных конференций: Всероссийская молодежная конференция имени В.А. Глебовицкого, Санкт-Петербург, 2020; Всероссийская молодежная геологическая конференция, Уфа, 2018 г; XVIII Всероссийская конференция по термобарогеохимии, посвященная 100-летию со дня рождения проф. Ю.А. Долгова, Москва, 2018 г; Международная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения В.С. Соболева, Новосибирск, 2018; ACROFI VII, IGGCAS, Пекин, 2018; XVII Всероссийская конференция по термобарогеохимии, посвященная 80-летию со дня рождения д.г.-м.н. Ф.Г. Рейфа, ГИН СО РАН, Улан-Удэ, 2016 г; V Российская молодежная научно-практическая школа «Новое в познании процессов рудообразования», 2015, ИГЕМ РАН, Москва; Всероссийское совещание «Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы», Иркутск, 2015; Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике, 2015, г. Горячинск; Всероссийское совещание «Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы», Иркутск, 2015; XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2014; 22nd European current research on fluid inclusions, Анталья, 2013; 3-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти акад. А.П. Карпинского, ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, 2013; XV Всероссийская конференция по термобарогеохимии, ИГЕМ РАН, Москва, 2012; Научная конференция «Ломоносовские чтения» 2012 и Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2012», Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова, Севастополь, 2012; XVI Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», ТПУ, Томск, 2012; XVII Всероссийская научная конференция «Уральская минералогическая школа-2011», посвященная 300-летию М.В.Ломоносова, УрГГУ, Екатеринбург, 2011; XLIX Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс», НГУ, Новосибирск, 2011 г; 5-ая Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле, ИГМ СО РАН, Новосибирск, 2010.

Лично автором определены цель и задачи диссертационного исследования, проанализирован обширный опубликованный научный материал, связанный с темой диссертации, а также сформулированы защищаемые положения. Автором лично подготовлены мономинеральные фракции и препараты, а также выполнены все термобарогеохимические исследования (термометрия, криометрия, КР-спектроскопия) флюидных включений в минералах изученных месторождений. Получены и обработаны данные по газовой хромато-масс-спектрометрии, газовой хроматографии, изотопии серы ($\delta^{34}\text{S}$) сульфидов, углерода ($\delta^{13}\text{C}$) углекислоты и карбонатов, гелия ($^3\text{He}/^4\text{He}$) из флюидных включений и Ar-Ar возрасту оруденений.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. А.А. Томиленко за всестороннюю помощь в выполнении работы, за

терпение и неоценимую поддержку. Автор искренне благодарит к.г.-м.н. Н.А. Гибшер за помощь, ценные замечания и советы, а также н.с. М.О. Хоменко за любезное предоставление образцов. Диссертант признателен сотрудникам лаборатории термобарогеохимии (№436) ИГМ СО РАН: к.г.-м.н. Л.И. Паниной за искренний интерес к работе, ценные советы и рекомендации, к.г.-м.н. Т.А. Бульбаку, д.г.-м.н. С.З. Смирнову, а также, к.г.-м.н. В.П. Чупину, к.г.-м.н. С.Н. Гришиной, к.г.-м.н. А.Т. Исаковой за поддержку и содействие на разных этапах выполнения работы, конструктивную критику и советы при обсуждении результатов работы. За содействие в проведении аналитических работ автор благодарит д.г.-м.н. А.В. Травина, д.г.-м.н. В.Н. Реутского, н.с. О.А. Козьменко, к.х.н. И.В. Николаеву и к.х.н. С.В. Палесского. Также он выражает огромную признательность д.г.-м.н. А.М. Сазонову (СФУ, г. Красноярск) за предоставленный каменный материал и всестороннее сотрудничество.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГМ СО РАН и Гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, шести глав, заключения и приложения. Диссертация изложена на 153 стр. и сопровождается 34 иллюстрациями и 42 таблицами. Список литературы включает 269 наименования.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, определены объекты, цели и задачи исследования, описан фактический материал и личный вклад соискателя, сформулированы научная и практическая значимость работы, а также защищаемые положения. В первой главе приведен краткий обзор предшествующих исследований орогенных месторождений золота российскими и зарубежными учеными. Вторая глава посвящена описанию используемых методов исследования и аналитической аппаратуры. В третьей главе приведена краткая геолого-минералогическая характеристика Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных месторождений Енисейского кряжа. В четвертой рассмотрены основные типы флюидных включений в кварце месторождений. В пятой главе представлены результаты термобарогеохимических, изотопно-геохимических и геохронологических исследований Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных месторождений. В шестой главе приводится обсуждение полученных результатов, на базе собственных результатов и анализа работ предшественников, дано авторское представление об условиях формирования Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных месторождений.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

Рассматриваемые в работе орогенные золоторудные месторождения расположены на Енисейском кряже, который является частью байкальской складчатости, обрамляющей древнюю Сибирскую платформу. Месторождения приурочены к Татарско-Ишимбинской зоне разломов палеозойского возраста.

Богунайское золоторудное месторождение относится к золото-серебряно-кварц-сульфидной формации. Золотоносные кварцевые жилы приурочены к разрывным нарушениям в присводовой части Богунайской антиклинали [Корнев и др., 2003; Сердюк, 2010]. Вдоль этой антиклинали протягивается Кузеевский глубинный разлом и оперяющие его дизъюнктивные нарушения [Заблоцкий и др., 2002; Корнев и др., 2003]. Вмещающие породы представляют собой нижнепротерозойские гранулитогнейсы канской серии. В непосредственной близости к месторождению расположен Нижнеканский гранитоидный массив (рис.1, Приложение А).

Герфедское рудное поле расположено на восточном крыле куполовидного поднятия, в ядре которого выступает Татарский гранитоидный массив. Месторождение, относящееся к золото-кварцевой рудной формации, представляет собой плотные сливные кварциты и многочисленные оперяющие кварцевые жилы, различные по содержанию золота. Вмещающие породы представляют собой протерозойские кристаллические сланцы зеленосланцевой фации пенченгинской свиты [Ли, Нелюбов, 1970] (рис.2, Приложение А).

Панимбинское месторождение относится к малосульфидно-золото-кварцевой формации. В структурном плане рудопроявление находится на восточном крыле Панимбинской антиклинали и с трёх сторон ограничено разрывными нарушениями и приурочено к экзоконтактовой зоне гранитов Чиримбинского массива. Жильная золоторудная минерализация локализована в метаморфических породах эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма нижнепротерозойской кординской свиты, сложенной мраморами, кварцитами и углеродистыми сланцами [Петров, 1973; 1974; Сердюк, 2010] (рис.3, Приложение А).

Проведено комплексное исследование флюидных включений (рис. 4-6, Приложение А) в минералах рассматриваемых золоторудных месторождений.

Первое защищаемое положение. *Формирование Богунайского месторождения происходило при температурах 210-350°C и давлении от 0.1 до 1.6 кбар, Герфедского – 200-400°C и давлении 0.1-2.5 кбар, Панимбинского 180-410°C и давлении 0.2-3.3 кбар из гомогенных и гетерогенных гидротермальных флюидов, состоящих из H₂O, CO₂, алифатических, циклических и кислородсодержащих углеводородов, а также азот-, серо- и галогенсодержащих соединений.*

Результаты микротермометрического изучения первичных и первично-вторичных флюидных включений показали, что золотосодержащие кварцевые жилы Богунайского месторождения формировались при 210-350 °С, солёности 2 – 19 мас. %, давлении 0.1 до 1.6 кбар; Герфедского – при 200-400 °С, солёности 0.5 – 23 мас. %, давлении 0.1-2.5 кбар; Панимбинского – при температурах 180-410 °С, солёности 0.5 – 23.3 мас. %, давлении 0.2 – 3.3. кбар (табл.1-3, Приложение Б) [Рябуха, 2013; Рябуха и др., 2016; Гибшер и др., 2017]. По данным ICP-AES в составе водной фазы флюидных включений из различных генераций кварца Герфедского месторождения были определены Са, Na, К, Fe и Mg. Максимальное содержание Са составляло около 50.0 отн. %, а Na и К - 28.0 и 26.0 отн. %, соответственно.

Согласно результатам КР-спектроскопических исследований в составе первичных и первично-вторичных флюидных включений в кварце на месторождениях были установлены CO₂, CH₄ и N₂ (рис.1). На Богунайском месторождении содержание CO₂ менялось от 92.2 до 100 мол. %, CH₄ – от 0 до 7.8 мол. %, молекулярного азота обнаружено не было. В субсогласных жилах кварцитов Герфедского месторождения содержание CO₂ и CH₄ во флюидных включениях колебалось от 36.0 до 99.7 мол. % и от 0.3 до 32.9 мол. %, соответственно. Содержание азота во включениях было от 0 до 37.2 мол. %. В составе флюидных включений из кварца оперяющих жил с Au<1г/т преобладал метан, содержание которого изменялось от 1.2 до 100 мол. %. Содержание CO₂ менялось в интервале от 0 до 97.9 мол. %, а азота – от 0 до 51.2 мол. %. В составе флюидных включений из оперяющих жил с высоким содержанием золота

преобладала CO_2 с содержанием от 91.4 до 97.6 мол. %. Содержание метана изменялось от 1.7 до 19.9 мол. %, а азота от 0 до 2.3 мол. %. На Панимбинском месторождении по данным КР-спектроскопии содержание (в мол. %) CO_2 колебалось от 0.0 до 100, CH_4 - от 0.0 до 100, а N_2 - от 0.0 до 73.2. В некоторых включениях удалось зафиксировать сероводород (H_2S) и бензол (C_6H_6) [Рябуха, 2013; Рябуха и др., 2016; Гибшер и др., 2017].

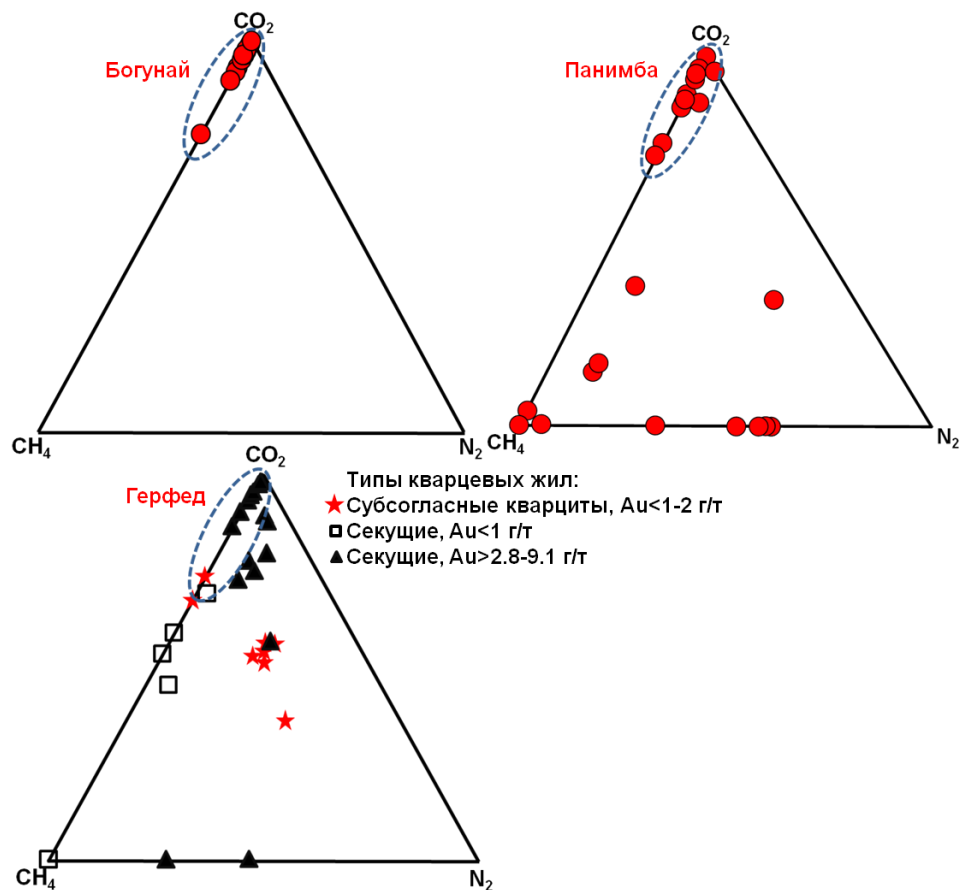


Рис. 1. Состав (в мол.%) флюидных включений в кварце Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных месторождений, Енисейский край (по данным КР-спектроскопии).

Помимо воды и углекислоты во флюидных включениях в кварце и сульфидах хромато-масс-спектрометрическим анализом были определены алифатические (парафины и олефины), циклические (нафтены и арены) и кислородсодержащие (спирты и эфиры, альдегиды, кетоны и карбоновые кислоты) углеводороды, а также азот-, серо- и хлорсодержащие соединения (рис. 2).

В последнее время все больше появляется работ, посвященных рассмотрению роли углеродсодержащего органического вещества в накоплении, растворении и осаждении золота при формировании орогенных золоторудных месторождений [Bateman, Hagemann, 2004; Tomkins, 2013; Weatherley, Henley, 2013; Gaboury, 2021]. В работах [Williams-Jones et al., 2009; Migdisov et al., 2017] приведены данные о том, что углеводороды могут транспортировать золото и концентрировать его в количествах, необходимых для образования золоторудного месторождения. Прямым доказательством активного участия углеводородов в формировании золоторудных месторождений являются данные по составу летучих в самородном

золоте Советского и Благодарного месторождений [Bul'bak et al., 2018; Бульбак и др., 2020; Шапаренко, 2022].

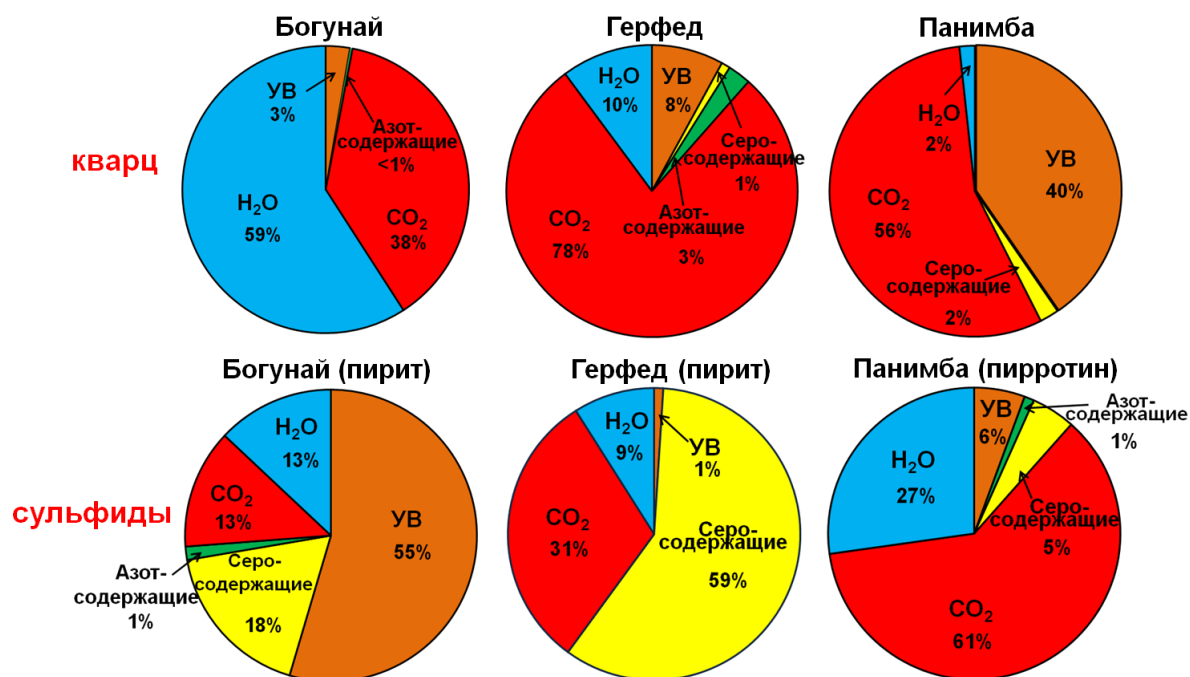


Рис. 2. Относительное содержание летучих компонентов во флюидных включениях в кварце и сульфидах Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных месторождений Енисейского кряжа. УВ - сумма алифатических (парафины и олефины), циклических (нафтенны, арены) и кислородсодержащих углеводородов (спирты и эфиры, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты).

Полученные результаты изучения флюидных включений в кварце, карбонатах и сульфидах показали, что формирование месторождений происходило из водно-углекисло-углеводородных гомогенных и гетерогенных флюидов при близких температурах, солености и давлении. Минералообразующий флюид в своем составе содержал воду, углекислоту, алифатические, циклические и кислородсодержащие углеводороды, а также азот-, серо- и хлорсодержащие соединения. Мобилизация и транспорт золота в богатых углеводородами флюидах в виде элементоорганических соединений и/или коллоидных наночастиц в настоящее время считается потенциально эффективным процессом рудообразования, но конкретные комплексы еще предстоит уточнить [Слободской, 1981; Williams-Jones et al., 2009; Migdisov et al., 2017; Гибшер и др., 2017; Gaboury, 2021]. Резкие перепады давления и температур и изменение окислительно-восстановительных условий в зонах глубинных разломов и оперяющих дизъюнктивных нарушений могли быть причиной распада этих элементоорганических соединений и осаждения золота из растворов.

Второе защищаемое положение. Изотопный состав гелия (^3He , ^4He) из флюидных включений и серы сульфидов ($\delta^{34}\text{S}$) свидетельствуют о коровом источнике гидротермальных флюидов, сформировавших Богунайское, Герфедское и Панимбинское золоторудные месторождения Енисейского кряжа.

С целью выяснения возможных источников минералообразующих флюидов, участвовавших в формировании Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных месторождений Енисейского края, были проведены исследования изотопного состава гелия ($^3\text{He}/^4\text{He}$) из флюидных включений в кварце (табл. 1) и изотопного состава серы ($\delta^{34}\text{S}$) сульфидов.

Для месторождений установлены следующие вариации отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$: на Богунайском отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ во флюидных включениях в кварце из пород и руд составляют $(0.37\pm 0.07)\cdot 10^{-6}$ и $(0.05\pm 0.02)\cdot 10^{-6}$, что свидетельствует о низкой доле мантийного гелия (^3He) – 2.9 % и 0.25 %, соответственно; на Герфедском – отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ во флюидных включениях составляет $(0.14\pm 0.03)\cdot 10^{-6}$, доля мантийного гелия (^3He) около 1.0 %; на Панимбинском – отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ составляет $(0.59\pm 0.2)\cdot 10^{-6}$, доля мантийного гелия (^3He) – 4.75 %. (табл. 1)

Согласно рассчитанным изотопным составам гелия ($^3\text{He}/^4\text{He}$) гидротермальный флюид, сформировавший изученные месторождения, произошел из глубинного корового источника. Следует отметить, что на ряде орогенных месторождений золота Енисейского края, например, Советском [Tomilenko et al., 2010], Эльдорадо [Гибшер и др., 2018], Олимпиадинском [Гибшер и др., 2019] и Благодатном [Shaparenko et al., 2021], минералообразующие флюиды также имели коровый источник (Табл. 1).

Таблица 1. Изотопный состав гелия из флюидных включений в кварце золоторудных месторождений Енисейского края

Месторождение	$^3\text{He}/^4\text{He}\cdot 10^{-6}$, см ³ /г	$^3\text{He}\cdot 10^{-12}$, см ³ /г	$^4\text{He}\cdot 10^{-6}$ см ³ /г	Доля мантийного ^3He , %
Богунайское, Красноярская зона	0.37±0.07	0.19	0.50	2.9
Богунайское, Центральный участок	0.05±0.02	0.08	1.60	0.25
Панимбинское	0.59±0.2	0.06	0.11	4.75
Герфедское	0.14±0.03	0.052	0.38	1.0
Эльдорадо [Гибшер и др., 2018]	1.35±0.2	0.0351	0.026	11.1
Благодатное [Shaparenko et al., 2021]	0.14±0.3	0.12	0.85	~1.0
Олимпиада [Гибшер и др., 2019]	0.05±0.01	2.8	56.0	0.25
Советское [Tomilenko et al., 2010]	0.022-0.075			1.0

Исследования показали, что изотопный состав серы сульфидов на Богунайском месторождении отличается относительно узким интервалом значений ($\delta^{34}\text{S}$) от 0.8 до 3.5‰, при этом 80% определений группируются в еще более узком интервале: от +2.0 до +3.0 ‰ (рис. 3). Это свидетельствует о том, что сера, скорее всего, привносилась в область рудоотложения из внешнего глубинного резервуара.

Для Панимбинского месторождения изотопный состав серы представлен в несколько более широком диапазоне значений $\delta^{34}\text{S}$ от +0.9 до +11.7 ‰ [Гибшер и др., 2019].

др., 2017], а для Герфедского месторождения характерна преимущественно изотопно-тяжелая сульфидная сера от +7.2 до +9.1 ‰.

Следует отметить, что для большинства известных золоторудных месторождений Енисейского края также характерен достаточно широкий изотопный состав сульфидной серы ($\delta^{34}\text{S}$), в том числе с существенным участием изотопно-тяжелой серы, а именно: Советское от +12.9 до +19.9 ‰ [Tomilenko et al., 2010], Эльдorado от +7.1 до +17.4 ‰ [Гибшер и др., 2018], Олимпиадинское от +1.5 до +12.9 ‰ [Гибшер и др., 2019], Благодатное от +2.6 до +20.1 ‰ [Shaparenko et al., 2021]. Согласно представлениям [Jshihara, Sasaki, 2002; Кряжев, 2017] высокие значения ^{34}S , могут указывать на то, что в рудный процесс на этих месторождениях, в отличие от Богунайского, были вовлечены углеродисто-терригенные породы, содержащие изотопно-тяжелую сульфидную серу.

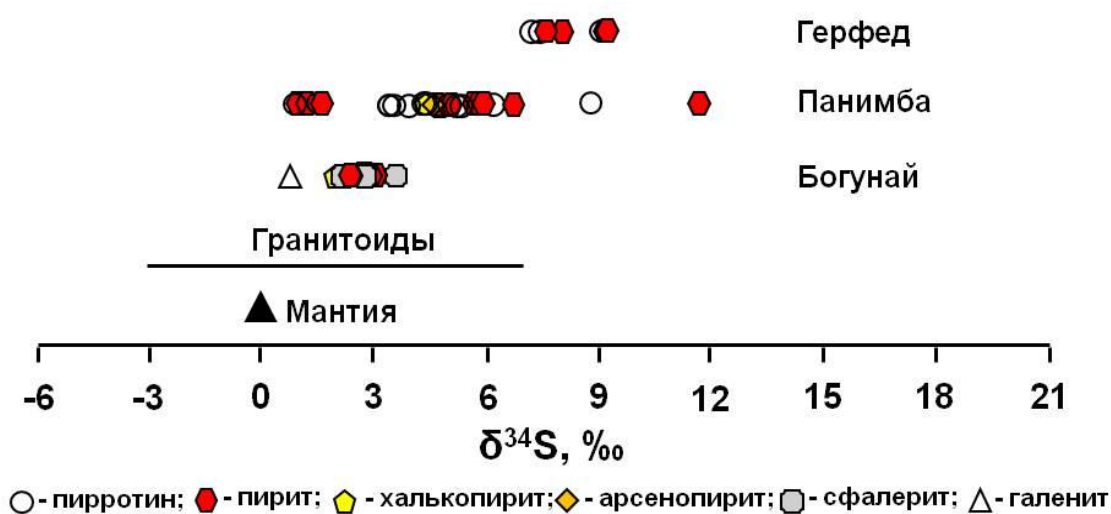


Рис. 3. Изотопный состав серы сульфидов Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных месторождений Енисейского края. Изотопный состав серы гранитоидов приведен по данным [Ohmoto, Rye, 1979; Groves, Foster, 1991].

Определенные изотопы углерода $\delta^{13}\text{C}$ углекислоты из флюидных включений на Герфедском золоторудном месторождении для метаморфогенных кварцитов составили значение (от -17.7 до -6.9 ‰), приближаясь к изотомам органического углерода терригенных толщ ($-25 \pm 5\%$) [Галимов, 1973]. Утяжеление изотопов углерода коррелируется с повышением содержания золота в кварце: средние значения для оперяющих жил с низким содержанием золота (-10.1 ‰), для жил с высоким содержанием (-7.0 ‰). Широкие вариации $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ от -18.6 до -3.0 ‰ флюидных включений в кварце Герфедского месторождения обусловлены, по-видимому, вовлечением в минералообразующую систему углерода из разных источников. На Панимбинском месторождении изотопный состав углерода карбонатов составил интервал от -1.97 до +3.53. Такие высокие значения изотопов углерода могут свидетельствовать об активном участии корового вещества в процессе эндогенного карбонатообразования, которое заимствуется из первичных осадочных морских карбонатов. Высокотемпературные карбонаты могут

характеризоваться очень высокими значениями $\delta^{13}\text{C}$, близкими к значениям для нормально-осадочных морских карбонатов ($\delta^{13}\text{C}=0\pm 2\text{‰}$) [Галимов, 1968; Кулешов, 1986; Морозов и др., 2020].

Третье защищаемое положение. *Возраст кварцевых жил Богунайского золоторудного месторождения составляет 466.0 ± 3.2 – 461.6 ± 3.1 млн. лет и существенно оторван по времени от метаморфизма вмещающих пород канской серии (~1.9 – 1.84 млрд. лет [Ножкин и др., 2010]). Возраст формирования Панямбинского золоторудного месторождения составляет 817.2 ± 5.3 – 800.4 ± 5.1 млн. лет и коррелируется с развитием Панямбинско-Шалакитской надвиговой системы Енисейского кряжа (826 – 798 млн. лет [Тишин и др., 2005; Сазонов и др., 2010]).*

Ag-Ag возраст серицитов северного фланга Красноярской минерализованной зоны Богунайского месторождения составляет 466.0 ± 3.2 млн. лет, а южного фланга - 464.5 ± 3.3 млн. лет (рис. 4). Более молодой возраст определен в центральной части зоны (461.6 ± 3.1 млн. лет) [Рябуха и др., 2015], а общая продолжительность формирования кварцевых жил Богунайского месторождения, составляет 4.3-4.5 млн. лет. Ag-Ag возраст биотита из перекристаллизованных вмещающих гиперстеновых гнейсов Богунайского рудного поля составляет 721.8 ± 5.9 млн. лет и, по-видимому, характеризует возраст локального диафтореза гранулитов в зонах глубинных разломов [Рябуха и др., 2015].

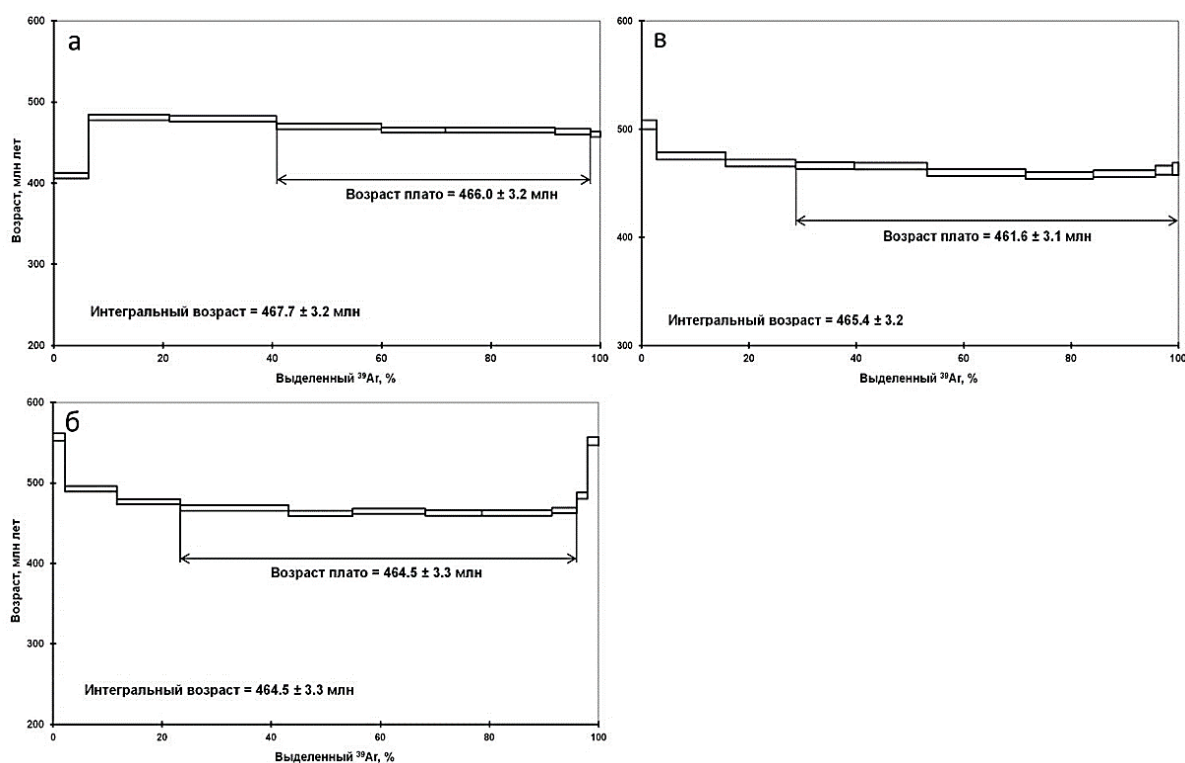


Рис. 4. Спектры $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастов серицитов из кварцевых жил Красноярской минерализованной зоны Богунайского месторождения, Енисейский кряж (а – северный фланг, б – южный фланг, в – центральная часть)

Хронология развития метаморфизма, магматизма и золотого оруденения Богунайского месторождения, с учетом полученных ранее данных другими авторами [Верниковская и др., 2004; Ножкин и др., 2010], позволяет сделать следующие выводы: вмещающие породы Богунайского месторождения претерпели региональный метаморфизм и были преобразованы в гранулиты с возрастом ~1.9 млрд лет [Ножкин и др., 2010]. В свою очередь, гранулиты были интенсивно дислоцированы, смяты в сложные складки, которые осложнены многочисленными разрывными нарушениями, где также проявлены милонитизация и диафторез с возрастом 721.8 ± 5.9 млн. лет [Рябуха и др., 2015]. Рудообразующий процесс проявился в период 466.0 ± 3.2 - 461.6 ± 3.1 млн. лет [Рябуха и др., 2015], что почти на 1400 млн. лет позже событий гранулитового метаморфизма. Возраст становления ближайшего Нижнеканского гранитоидного массива составляет 455 ± 5 млн. лет [Верниковская и др., 2004].

Золотоносные кварцевые жилы Панимбинского месторождения формировались в интервале 817.2 ± 5.3 – 800.4 ± 5.1 млн. лет (рис. 5), что коррелируется с формированием основной Панимбинско-Шалакитской надвиговой системы Енисейского кряжа в диапазоне 826 – 798 млн. лет [Тишин и др., 2005; Сазонов и др., 2010]. При этом возраст регионального метаморфизма вмещающих пород, датированный по цирконам (U-Pb метод) и мусковитам (Ar-Ar метод), составляет 960 ± 32 – 889.0 ± 26.6 млн. лет [Сазонов и др., 2016].

Ar-Ag возраст серицитов на Герфедском месторождении составляет 722.9 ± 4.6 – 665.0 ± 4.2 млн. лет [Гарьковенко, 2015]. Возраст ближайшего Татарского гранитоидного массива, определённый U-Pb- методом по цирконам: 629 ± 7 млн. лет [Верниковский и др., 2006] и 630-625 млн. лет [Ножкин и др., 2008].

Согласно данным по Ar-Ag датированию, формирование Герфедского (722.9 ± 4.6 – 665.0 ± 4.2 млн. лет) и Панимбинского (817.2 ± 5.3 – 800.4 ± 5.1 млн. лет) золоторудных месторождений так же, как и Богунайского, было оторвано во времени от регионального метаморфизма вмещающих пород (1000-900 млн. лет [Tomilenko et al., 2010; Ножкин и др., 2011; Сазонов и др., 2016]), т.е. формирование золотой минерализации имело наложенный характер по отношению к региональному метаморфизму вмещающих пород.

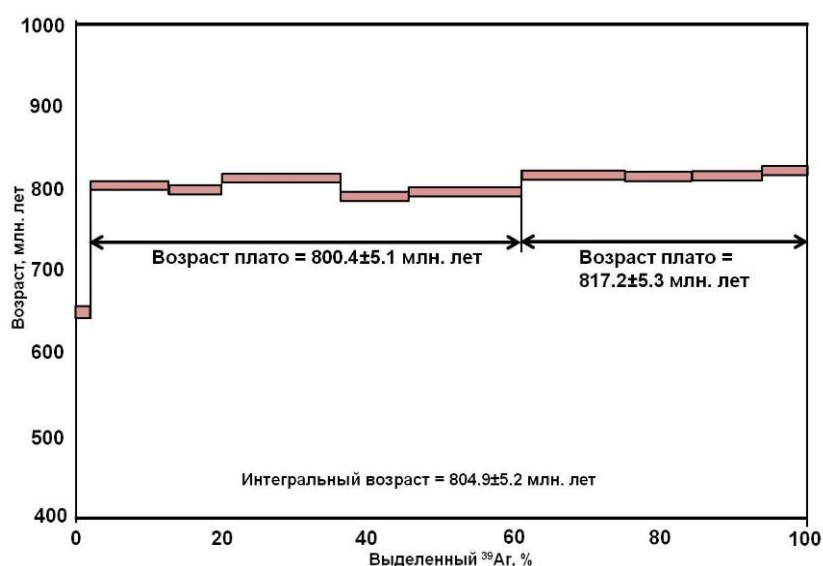


Рис. 5. Спектры $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастов серицитов из кварцевых жил Панимбинского золоторудного месторождения, Енисейский кряж, Пн 12 - скважина 191.

Таким образом, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирование позволяет восстановить хронологические связи между событиями, в результате которых сформировались Богунайское, Герфедское и Панимбинское золоторудные месторождения. Получены данные, свидетельствующие о многоэтапности и полихронности процесса формирования золоторудной минерализации на этих месторождениях. Возраст формирования кварцево-жильных зон Герфедского ($722.9 \pm 4.6 - 665.0 \pm 4.2$ млн. лет) и Панимбинского ($817.2 \pm 5.3 - 800.1 \pm 5.1$ млн. лет) месторождений коррелируется с тектономагматическими событиями на Енисейском кряже в интервале от 850 до 600 млн. лет (рис. 6), что могло сыграть важную роль в зарождении, развитии и эволюции рудообразующих и рудоконцентрирующих систем [Тишин и др., 2005; Сазонов и др., 2010; Лиханов и др., 2011, 2013; Ножкин и др., 2011, 2015; Лиханов, Ревердатто, 2016]. Важно отметить, что возраста формирования золотой минерализации на Советском золоторудном месторождении (820 – 730 млн. лет) [Tomilenko et al., 2010; Ножкин и др., 2011], Олимпиадинском – (817 – 660 млн лет) [Гибшер и др., 2019], Благодатном – (798 – 735 млн. лет) [Shaparenko et al., 2021], Эльдорадо – (795 – 710 млн. лет) [Сазонов и др., 2010; Гибшер и др., 2018], Ведугинском и Попутнинском – (805 ± 6.3 млн. лет и 717-712 млн. лет, соответственно) [Ножкин и др., 2011] и Удерейском – (711 – 670 млн. лет) [Неволько, 2009] также коррелируются с этими эпизодами тектономагматической активизации в интервале 850–600 млн. лет (рис. 6). Вместе с тем формирование Богунайского золоторудного месторождения, которое происходило гораздо позже в интервале $466.0 \pm 3.2 - 461.6 \pm 3.1$ млн. лет, по-видимому, можно рассматривать как результат не известных ранее коллизионно-аккреционных событий на Енисейском кряже в интервале 500–400 млн. лет (рис. 6). Можно предположить, что в этом возрастном рубеже, наряду с Богунайским, могли образоваться и другие золоторудные месторождения.

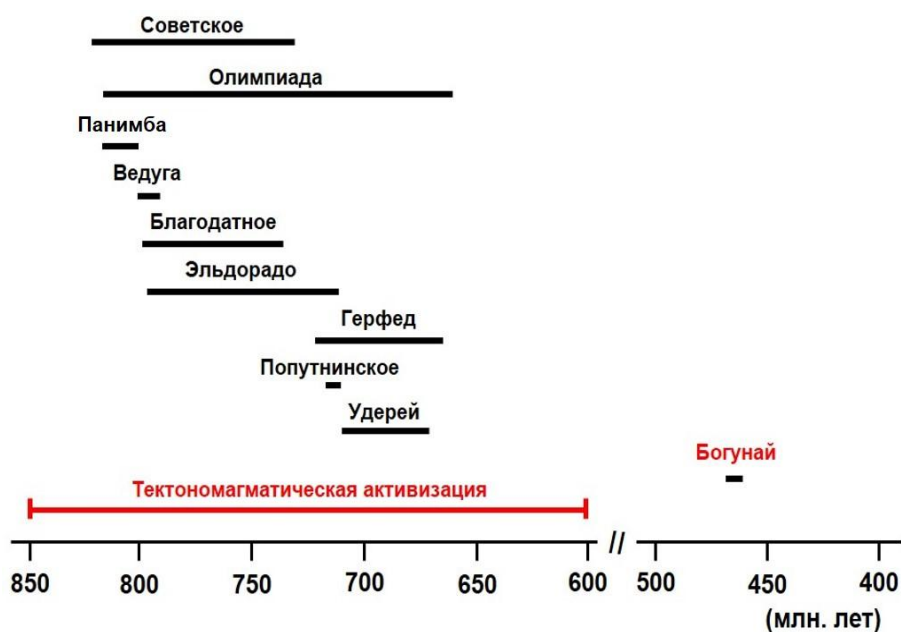


Рис. 6. Возраст формирования золоторудных месторождений Енисейского кряжа. Красная линия - временной интервал (850-600 млн. лет) тектономагматических событий на Енисейском кряже [Тишин и др., 2005; Сазонов и др., 2010; Лиханов и др., 2011, 2013; Ножкин и др., 2011, 2015; Лиханов, Ревердатто, 2016].

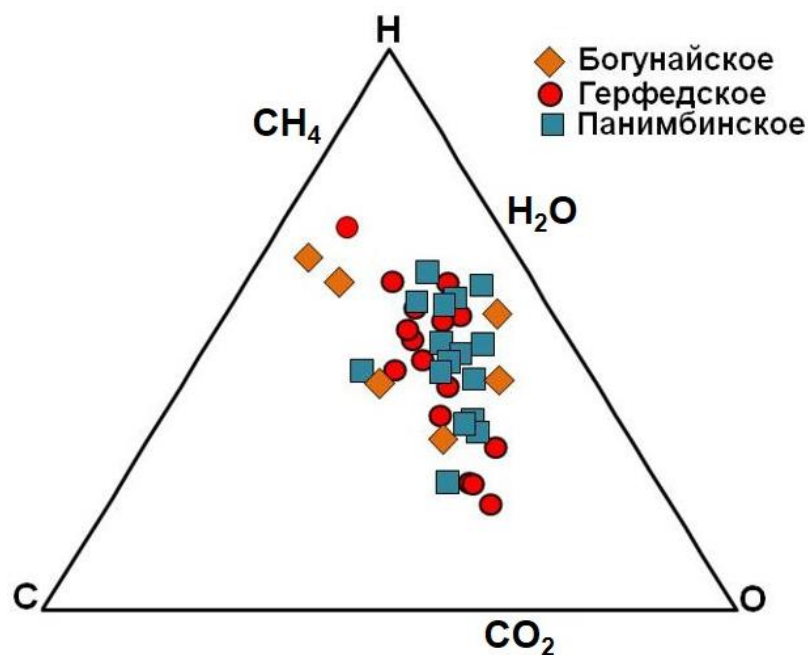


Рис. 7. C-O-H диаграмма, иллюстрирующая состав флюидов, формировавших Богунайское, Герфедское и Панимбинское золоторудные месторождения (по данным хромато-масс-спектрометрии).

Флюиды, участвовавшие в формировании золоторудных месторождений, согласно данным по изотопии гелия, серы и углекислоты, имели глубинный метаморфогенно-коровый источник. Минералообразующие флюиды в своем составе содержали H_2O , CO_2 , а также углеводороды и их производные, которые играли значимую роль в формировании золотого оруденения (рис. 7).

Предполагается, что золото транспортировалось как в виде HS^- комплексов, так и в виде элементоорганических соединений. Автор полагает, что на данной стадии изученности наиболее непротиворечивой моделью формирования Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных месторождений является метаморфическая, которая наиболее широко принята для большинства орогенных золоторудных месторождений мира [Gaboury, 2013, 2019; Goldfarb, Santosh, 2014; Goldfarb, Groves, 2015; Groves, et al., 2020; Goldfarb, Pitcairn, 2022 и др.].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные выводы:

Богунайское, Панимбинское и Герфедское золоторудные месторождения формировались в интервале температур 180-410 °С, давлений – 0.1-3.3 кбар и солёности от 0.5 до 23.3 мас. %, NaCl-экв. (Богунайское – при 210-350 °С, солёности 2 – 19 мас. %, NaCl-экв., давлении 0.1 до 1.6 кбар; Герфедское – при 200-400 °С, солёности 0.5 – 23 мас. %, NaCl-экв., давлении 0.1-2.5 кбар; Панимбинское – при температурах 180-410 °С, солёности 0.5 – 23 мас. %, NaCl-экв., давлении 0.2 – 3.3. кбар.).

Минералообразующие флюиды в своем составе содержали H_2O , CO_2 , углеводороды и их производные: алифатические (парафины и олефины),

циклические (нафтены и арены) и кислородсодержащие (спирты, эфиры простые и сложные, альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты,) углеводороды, а также азот-, серо- и галогенсодержащие соединения, которые потенциально способны транспортировать рудные элементы, в том числе и золото.

Рассчитанные величины отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ во флюидных включениях в кварце Богунайского $(0.37 \pm 0.07) \cdot 10^{-6}$ и $(0.05 \pm 0.02) \cdot 10^{-6}$, Герфедского $(0.14 \pm 0.03) \cdot 10^{-6}$ и Панимбинского $(0.59 \pm 0.2) \cdot 10^{-6}$ месторождений свидетельствуют о коровой природе флюидов, сформировавших рассматриваемые золоторудные месторождения.

Полученные данные об изотопном составе серы сульфидов для Богунайского месторождения ($\delta^{34}\text{S}$ от +0.8 до +3.5 ‰), Герфедского (от +7.2 до +9.1) и Панимбинского (от +0.9 до +11.7 ‰) свидетельствуют о возможном участии в процессах рудогенеза серы из разных источников. Некоторое увеличение доли тяжелого изотопа серы на Герфедском и Панимбинском месторождениях по сравнению с Богунайским, вероятнее всего, связано с вовлечением в рудогенез тяжелой осадочной серы из углеродисто-терригенных вмещающих пород.

С помощью $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования установлено, что возраст формирования Богунайского золоторудного месторождения составил $466.0 \pm 3.2 - 461.6 \pm 3.1$ млн. лет, а для Панимбинского месторождения – $817.2 \pm 5.3 - 800.4 \pm 5.1$ млн. лет. Согласно геохронологии, формирование Богунайского месторождения происходило почти через 1400 млн. лет после событий гранулитового метаморфизма вмещающих пород, по-видимому, как результат не известных ранее коллизионно-аккреционных событий на Енисейском кряже в интервале 500-400 млн. лет. Можно предположить, что в этом возрастном интервале, наряду с Богунайским, могли образоваться и другие золоторудные месторождения.

Возраста формирования кварцево-жильных зон Герфедского ($722.9 \pm 4.6 - 665.0 \pm 4.2$ млн. лет) и Панимбинского ($817.2 \pm 5.3 - 800.4 \pm 5.1$ млн. лет) месторождений коррелируются с тектономагматическими событиями на Енисейском кряже в интервале от 850 до 600 млн. лет, что могло сыграть важную роль в зарождении, развитии и эволюции рудообразующих и рудоконцентрирующих систем.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что формирование Богунайского, Герфедского и Панимбинского золоторудных месторождений происходило из коровых водно-углекислотно-углеводородных гомогенных и гетерогенных флюидов в результате длительного и многостадийного процесса. Значимую роль в формировании золотого оруденения играли углеводороды и их производные. Предполагается, что золото транспортировалось как в виде HS^- комплексов, так и в виде элементоорганических соединений. На данной стадии изученности наиболее приемлемой моделью формирования Богунайского, Герфедского и Панимбинского месторождений является метаморфическая, принятая для большинства орогенных месторождений золота мира [Gaboury, 2013, 2019; Goldfarb, Santosh, 2014; Goldfarb, Groves, 2015; Groves, et al., 2020; Goldfarb, Pitcairn, 2022 и др.].

ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях перечня ВАК РФ

1. Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., **Рябуха М.А.**, Тимкина А.Л. Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и РТ-условия образования кварцевых жил (Енисейский край, Россия) // Геология и геофизика, 2011, т. 52, № 11, с. 1851-1867.
2. **Рябуха М.А.**, Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Хоменко М.О., Сазонов А.М. РТХ-параметры метаморфогенных и гидротермальных флюидов: изотопия и возраст формирования Богунайского золоторудного месторождения южной части Енисейского края (Россия) // Геология и геофизика, 2015, т. 56, № 6, с. 1153-1172
3. Гибшер Н.А., **Рябуха М.А.**, Томиленко А.А., Сазонов А.М., Хоменко М.О., Бульбак Т.А., Некрасова Н.А. Характеристика металлоносных флюидов и возраст формирования золоторудного месторождения Панимба (Енисейский край, Россия) // Геология и геофизика, 2017, т. 58, № 11, с. 1721-1741.
4. Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Бульбак Т.А., Хоменко М.О., **Рябуха М.А.**, Шапаренко Е.О., Сильянов С.А., Некрасова Н.А. Рудоносные флюиды золоторудного месторождения Эльдорадо (Енисейский край, Россия) // Геология и геофизика. 2018, т. 59. № 8, с. 1220-1237.
5. Гибшер Н.А., Сазонов А.М., Травин А.В., Томиленко А.А., Пономарчук А.В., Сильянов С.А., Некрасова Н.А., Шапаренко Е.О., **Рябуха М.А.**, Хоменко М.О. Возраст и продолжительность формирования Олимпиадинского золоторудного месторождения (Енисейский край, Россия) // Геохимия, 2019, № 5, с. 593-599.
6. Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Бульбак Т.А., **Рябуха М.А.**, Сильянов С.А., Некрасова Н.А., Хоменко М.О., Шапаренко Е.О. Олимпиадинское золоторудное месторождение (Енисейский край): температура, давление, состав рудообразующих флюидов, $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов, $^3\text{He}/^4\text{He}$ флюидов, Ar-Ar возраст и продолжительность формирования // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 9, с. 1310-1329.
7. Бульбак Т. А., Томиленко А. А., Гибшер Н. А., Сазонов А. М., Шапаренко Е. О., **Рябуха М. А.**, Хоменко М. О., Сильянов С. А., Некрасова Н. А. Углеводороды во флюидных включениях из самородного золота, пирита и кварца месторождения Советское (Енисейский край, Россия) по данным беспиролизной газовой хромато-масс-спектрометрии // Геология и геофизика, 2020, №11, Т. 61. - №10, с. 1535-1560.
8. Shaparenko E., Gibsher N., Tomilenko A., Sazonov A., Bul'bak T., **Ryabukha M.**, Khomenko M., Silyanov S., Nekrasova N., Petrova M. Ore-Bearing Fluids of the Blagodatnoye Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia): Results of Fluid Inclusion and Isotopic Analyses // Minerals. – 2021. - 11. 1090.
9. Сильянов С.А., Сазонов А.М., Тишин П.А., Лобастов Б.М., Некрасова Н.А., Звягина Е.А., **Рябуха М.А.** Элементы-примеси в сульфидах и золоте месторождения Олимпиада (Енисейский край): источники вещества и параметры флюида // Геология и геофизика. – 2021. - Т. 62. - № 3. С. 382—402.
10. Shaparenko E., Gibsher N., Khomenko M., Tomilenko A., Sazonov A, Bul'bak T., Silyanov S., Petrova M, **Ryabukha M.** Parameters for the Formation of the Dobroe Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia): Evidence from Fluid Inclusions and S–C Isotopes // Minerals. – 2023. - 13. 11.

В прочих изданиях (конференции, школы, семинары)

1. Gibsher N., **Ryabukha M.**, Tomilenko A., Sazonov A. Principal physical-chemical parameters of mineral-forming fluids of the Gerfed and Panimba gold deposits (Yenisei Ridge, Russia) // Abstracts the 22nd meeting of the European current research on fluid inclusions, Antalya, Turkey, 2013.

2. **Рябуха М.А.** Геохимические особенности золотоносных флюидов на Михайловском участке (месторождение Панимба, Енисейский край) // Тезисы 3-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 11-15 февраля 2013.

3. **Рябуха М.А.** Физико-геохимические особенности золотоносных флюидов на Михайловском рудопоявлении (Енисейский край) // Фундаментальная и прикладная геологическая наука: достижения, перспективы, проблемы и пути их решения: 5-ая международная научная конференция молодых ученых и студентов, посвящённая 90-летию со дня рождения Г. Алиева, Баку, 14-15 ноября 2013, с. 291-293.

4. **Рябуха М.А.** Сходства и различия в составе золотоносных флюидов кварцевых жил, залегающих в гранулитах и зелёных сланцах Енисейского края (на примере Богунайского и Панимбинского золоторудных месторождений) // Тезисы Третьей российской молодёжной школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования», Москва, ИГЕМ РАН, 2-6 декабря 2013.

5. **Рябуха М.А.** Состав золотоносных флюидов кварцевых жил, залегающих в гранулитах Енисейского края (на примере Богунайского золоторудного месторождения) XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 7-11 апреля 2014) Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2014» / [Электронный ресурс] — М.: МАКС Пресс, 2014.

6. Некрасова Н.А., **Рябуха М.А.** Углеродистое вещество в жильном кварце и сланцах месторождения золота Панимба (Енисейский край) // Байкальская молодёжная научная конференция по геологии и геофизике, 24-29 августа 2015, г. Горький, стр. 230-234

7. **Рябуха М.А.**, Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Хоменко М.О., Сазонов А.М. Флюиды Богунайского золоторудного месторождения в гранулитах Южно-Енисейского края // Всероссийское совещание «Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы», Иркутск, 6-9 октября 2015, стр. 158-160

8. **Рябуха М.А.**, Хоменко М.О., Некрасова Н.А. Металлоносные флюиды в кварце и сульфидах золоторудного месторождения Панимбинское (Енисейский край) // Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии, посвящённой 80-летию со дня рождения Ф. Г. Рейфа, Улан-Удэ, 2016.

9. Сильянов С.А., Сазонов А.М., Тишин П.А., Некрасова Н.А., Лобастов Б.М., Звягина Е.А., **Рябуха М.А.** Геохимические показатели генезиса месторождения золота Панимба в Енисейском крае (Сибирь, Россия) // Геосферные исследования, 2018, № 3, с. 6-21.

10. Бульбак Т.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Гибшер Н.А., **Рябуха М.А.**, Хоменко М.О. Углеводороды флюидных включений в минералах руд месторождений золота Енисейского края // Материалы XVIII Всероссийской конференции по термобарогеохимии, посвящённой 100-летию со дня рождения

профессора Юрия Александровича Долгова, Москва, 24-28 сентября 2018 г. с. 32-341.

11. Bul'bak T.A., Tomilenko A.A., Sazonov A.M., Gibsher N.A., **Ryabukha M.A.**, Khomenko M.O. Hydrocarbons in the fluid inclusions of native gold // ACROFI VII, IGGCAS, Beijing, 2018, Abstract Volume, p. 19-20.

12. Гибшер Н.А., Козьменко О.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., **Рябуха М.А.** Элементы платиновой группы и рений во флюидах Олимпиадинского золоторудного месторождения (Енисейский кряж, Россия). Тезисы XVIII Всероссийской конференции по термобарогеохимии (100-летие Ю.А. Долгова). М. Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана, 2018, с. 37-38.

13. Некрасова Н.А., **Рябуха М.А.**, Сильянов С.А. Особенности физико-химических параметров образования Панимбинского рудного узла (Енисейский кряж) // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий, Уфа, 2018, № 6, с. 98-100.

14. Сильянов С.А., Некрасова Н.А., **Рябуха М.А.** Физико-химические параметры формирования кварцево-жильных образований Советского рудного узла // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий, Уфа, 2018, №6, с.122-124.

15. Shaparenko E.O., Bul'bak T.A., Khomenko M.O., **Ryabukha M.A.**, Sazonov A. M. Ore-bearing fluids of the Blagodatnoye gold deposit (Yenisei ridge, Russia): fluid inclusions data // Proceedings Volume 2, 15th SGA Biennial Meeting in Glasgow, Scotland, UK, August 27-30 2019, pp. 745-747.

16. **Рябуха М.А.** Характеристика флюидов и возраст формирования золоторудных месторождений, залегающих в метаморфических породах Енисейского кряжа (на примере Богунайского и Панимбинского месторождений). Сборник тезисов докладов всероссийской молодежной геологической конференции памяти В.А. Глебовицкого. СПб: Изд. ВВМ, 2020, с. 65-66.

Приложение А

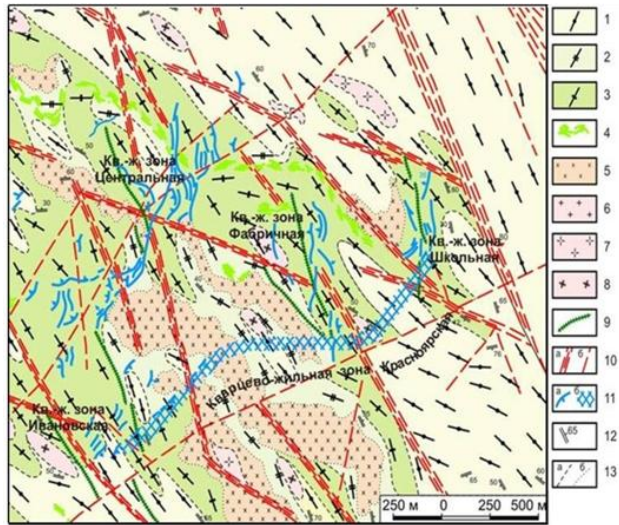


Рис. 1. Схема геологического строения Богунайского месторождения (составлена А.М. Сазоновым с использованием материалов геологических служб рудника Богунай и ОАО «Красноярскгеолсъемка»). 1-3 – гнейсы (1 - гранатовые, 2 - силлиманитовые и кордиеритовые, 3 – гиперстенновые); 4 – метагабброиды кимбирского комплекса; 5 - чарнокиты богунаевского комплекса; 6 – лейкократовые, аляскитовые граниты и гнейсо-граниты березовского комплекса; 7 – архейские и протерозойские крупнозернистые и пегматоидные гранитоиды; 8 – артериты; 9 – дайки диабазов протерозойского возраста; 10 – нарушения: а – дизъюнктивы, б – милониты; 11 – рудные тела: а – кварцевые жилы, б – кварцево-сульфидные прожилково-вкрапленные зоны; 12 - элементы залегания метаморфической полосчатости; 13- геологические границы: а - разновидностей гнейсов, гранитных тел; б - тел чарнокитов.

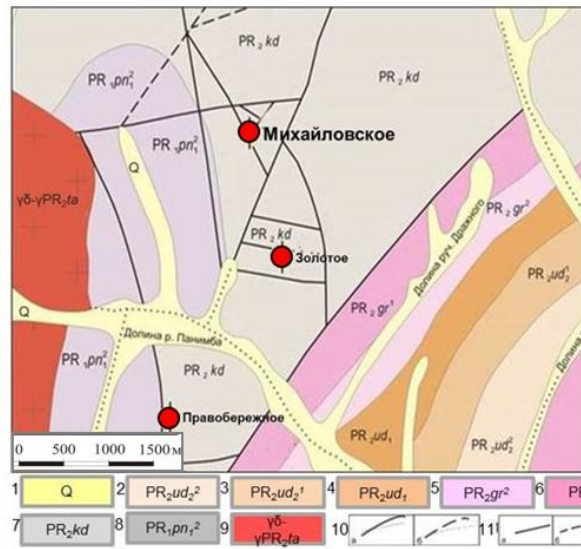


Рис. 3. Геологическая схема Панимбинского рудного узла с рудопроявлениями золота Михайловское, Золотое, Правобережное. [Сазонов и др., 2016]. Условные обозначения: 1 – современные отложения; (2-7) Верхний протерозой, сухопитская серия. 2-4 удерейская свита. 2 – кварц-серицитовые сланцы; 3- серицит-кварцевые сланцы; 4 - кварц-серицитовые сланцы; 5-6 горбилковская свита. 5 - серицит-хлорит-кварцевые сланцы, 6 - кварц-серицит-хлоритовые сланцы; 7 - кординская свита: углеродистые кварц-серицит-хлоритовые, кварц-мусковит-андалузитовые сланцы; 8 - Нижний протерозой, тейская серия, пенченгинская свита: метаалевролиты, известковистые кварциты, известняки. 9 – плагиограниты, кварцевые сиениты, кварцевые диориты Татарско-Аяхтинского интрузивного комплекса; 10 – Геологические границы: а – достоверные; б – предполагаемые; 11 – Тектонические нарушения: а – установленные; б – предполагаемые; в – скрытые.

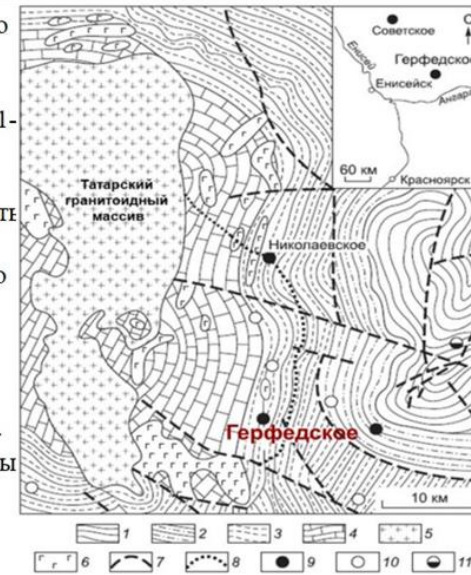


Рис. 2. Геолого-структурная схема размещения месторождений и рудопроявлений на Герфедском рудном поле [Ли, Нелобов, 1970]. 1 – филлитовидные сланцы удерейской свиты; 2 – филлиты и слоистые алевролитовые сланцы горбилковской свиты; 3 – филлиты и песчаники с линзами порфириров и туффитов кординской свиты; 4 – мраморизованные известняки пенченгинской свиты; 5 – граниты; 6 – ортоамфиболиты; 7 – разрывные нарушения; 8 – контур нескрытой части гранитной интрузии по гравиметрическим данным; 9 – месторождения золота; 10 – рудопроявления золота; 11 – золото-сурьмяное месторождение.

Приложение А

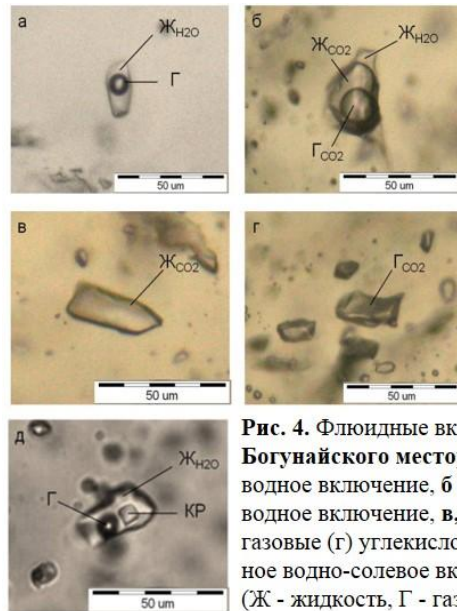


Рис. 4. Флюидные включения в рудном кварце **Богунайского месторождения:** а – существенно водное включение, б – трехфазное углекислотно-водное включение, в, г – однофазные жидкие (в) и газовые (г) углекислотные включения, д – трехфазное водно-солевое включение (Ж_{H2O}+Г+КР) (Ж - жидкость, Г - газ, КР – кристалл)

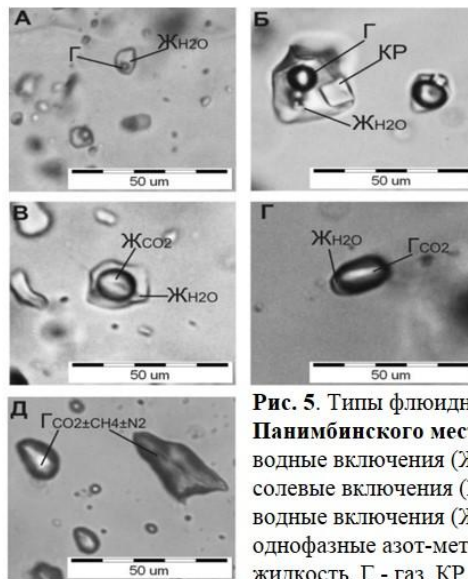


Рис. 5. Типы флюидных включений в рудном кварце **Панимбинского месторождения.** а - существенно водные включения (Ж_{H2O}+Г); б - трехфазные водно-солевые включения (Ж_{H2O}+Г+КР); в, г - углекислотно-водные включения (Ж_{H2O}+Ж_{CO2}), (Ж_{H2O}+Г_{CO2}); д - однофазные азот-метан-углекислотные включения. (Ж - жидкость, Г - газ, КР - кристалл):

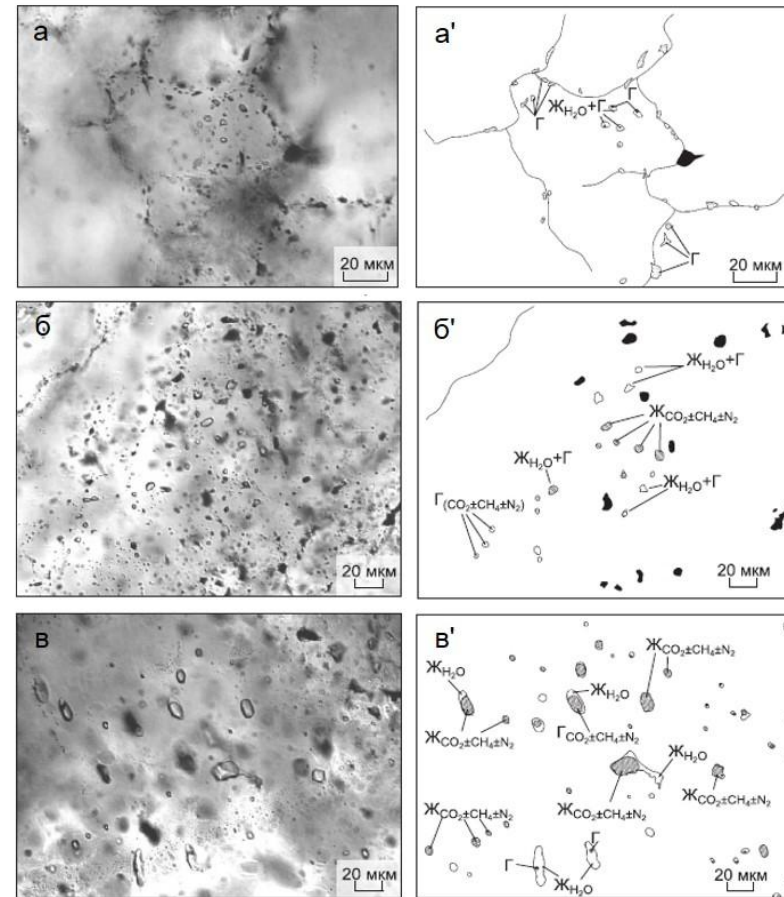


Рис. 6. Типы флюидных включений в кварцевых жилах **Герфедского золоторудного месторождения.** а, а' — кварциты, Au < 1—2 г/т; б, б' - оперяющие кварцевые жилы, Au < 1 г/т, в, в' - оперяющие кварцевые жилы, Au = 2.8—9.1 г/т. (Ж - жидкость, Г - газ)

Приложение Б. Таблица 1. Результаты микротермометрических исследований индивидуальных флюидных включений в кварце Богунайского золоторудного месторождения

№ образца	Генерация и фаз. состав вкл.*	T _{гом.} , °C**	n	T _{эвтектики} , °C	T _{плавления льда} , °C	T _{плавления газгидрата} , °C	Соленость, мас.% NaCl-экв.
Центральный участок, штольня №13							
Т-99/1-3	П, I	220-320	37	-28.9÷-32.5	-1.7÷-5.0	-	4.0-9.0
	П, II-a	240-310	45	-20.0÷-33.4	-1.5÷-4.6	+2.4÷+3.5	3.0-12.7
	В, I	130-220	29	-19.0÷-23.8	-0.2÷-1.0	-	0.3-2.0
13-23	П, I	210-330	21	-30.0÷-32.8	-6.0÷-9.0	-	10.0-13.5
	ПВ, II-a	280-305	13	-29.3÷-32.5	-7.0÷-9.0	+2.0÷+2.5	11.0-13.5
	В, I	110-180	15	-18.5÷-22.0	-0.5÷-0.7	-	1.0-1.5
13-39	ПВ, I	250-350	13	-31.9÷-33.0	-8.5÷-15.0	-	13.0-19.0
	В, I	170-200	8	-19.5÷-21.0	-0.3÷-0.7	-	0.6-1.5
13-65	П, I	270-300	13	-28.0÷-31.5	-9.0÷-11.5	-	13.5-16.2
	ПВ, II-a	280-310	11	-30.4÷-33.0	-1.5÷-4.5	-	3.0-8.5
	В, I	190-210	7	-22.5÷-23.0	-0.5÷-0.8	-	1.0-1.6
13-66	ПВ, I	220-330	9	-28.1÷-31.5	-7.0÷-13.0	-	11.0-18.0
	ПВ, II-a	260-300	15	-29.0÷-32.0	-	+6.8÷+9.3	6.1-1.4
	В, I	130-190	11	-18.6÷-20.3	-0.5÷-1.5	-	1.0-3.0
Красноярская минерализованная зона, канава № 26							
Б-1(2)	ПВ, I	260-310	16	-31.0÷-33.5	-2.5÷-4.0	-	5.0-8.0
	ПВ, II-a	290-325	15	-28.0÷-30.3	-	+2.0÷+4.5	9.8-13.2
Б-2(4)	П, I	250-290	5	-29.0÷-31.4	-3.2÷-4.0	-	6.0-8.0
	П, II-a	260-320	11	-30.5÷-32.5	-1.5÷-3.0	-	3.0-6.0
Б-2(4)	В, II	120-210	8	-18.3÷-21.5	-0.2÷-0.5	-	0.3-1.0
	П, I	230-330	14	-27.5÷-28.5	-3.0÷-5.5	-	6.0-9.5
Б-6(21)	П, II-a	250-310	11	-29.3÷-31.5	-3.0÷-4.5	-	6.0-8.5
	В, I	110-180	7	-21.0÷-22.5	-0.5÷-1.5	-	1.0-3.0
	В, III	230-280	9	-57.6÷-60.5	+15.0÷+21.0	-	45.0-49.0
Б-11(46)	ПВ, I	280-340	5	-30.1÷-32.5	-6.0÷-8.0	-	10.0-12.5
	ПВ, II-a	290-310	8	-30.5÷-31.5	-1.0÷-4.0	-	2.0-8.0
	В, I	120-190	13	-21.5÷-22.3	-0.2÷-0.5	-	0.3-1.0
	ПВ, II-a	270-290	16	-28.5÷-33.5	-2.8÷-7.0	+4.1	5.5-10.4
	В, I	150-180	17	-20.5÷-23.5	-0.1÷-0.5	-	0.2-1.0

Примечание: * генерация флюидных включений: П-первичные, В-вторичные, ПВ-первично-вторичные; Фазовый состав включений: I -водный (Ж_{Н2О}+Г), II -водно-углекислотный (Ж_{Н2О}+Ж_{СО2}+Г), III -водно-солевой (Ж_{Н2О}+Г+кристалл); ** - все включения гомогенизировались в жидкость, n- количество определений; «-» - не обнаружено.

Приложение Б. Таблица 2. Результаты микротермометрических исследований индивидуальных флюидных включений в кварце Герфедского золоторудного месторождения

Тип кварцевых жил	№ образца	Генерация вкл.*	T _{общ.гом} , °C	T _{эвтектики} , °C	Соленость, мас.%, NaCl-экв.	T _{плавления CO2±CH4±N2} , °C	T _{част.гом} , °C	Вид гом**	Плотность, г/см ³	Давление, кбар
Кварциты, Au < 1-2 г/т	Г-393-51.9	П, ПВ	140 - 230	-18.5 ÷ -21.3	1 - 6	-56.7 ÷ -57.0	+25.3 ÷ +7.2	г	0.19-0.11	0.1 – 0.5
		В	310-330	-	-	-66.3 ÷ -69.0	-	-	-	-
	Г-393-45.5	П, ПВ	140 - 225	-18.0 ÷ -20.5	0.5-7	-56.8 ÷ -57.0	+19.5 ÷ +5.0	г	0.24-0.11-	0.1-0.5
		В	290-350	-	-	-58.3 ÷ -59.4	+20.0 ÷ +8.0	г	-	-
Оперяющие, Au < 1 г/т	Г-404-144.7	П	200 - 260	-18.3 ÷ -21.5	3-10	-66.0 ÷ -73.0	-54.0 ÷ -57.9	г	-	-
		ПВ	260 - 300	-22.3 ÷ -26.5	6-9	-56.9 ÷ -77.5	-46.9 ÷ -4.5	г, ж	0.03-0.8	0.5-2.0
	Г-393-53.7	П	200-300	-19.0 ÷ -22.1	1.5-8.8	-65.7 ÷ -68.7	-40.4 ÷ -53.9	г	-	-
		ПВ	250-300	-	-	-56.9 ÷ -78.3	-2.5 ÷ +1.0	г, ж	0.8-0.4	0.5-1.1
Оперяющие, Au=2.8 - 9.1г/т	Г-408-86.9	П	210-330	-28.7 ÷ -30.1	4.5-10.5	-56.8 ÷ -60.3	+6,0 ÷ +10.8	ж	0.9-0.86	1.1-1.7
		ПВ	200-350	-27.3 ÷ -28.7	8-16	-57.1 ÷ -59.8	+10.7 ÷ -22.3	ж	0.86-1.04	1.5-2.4
	Г-406-199.6	П	200-390	-27.8 ÷ -31.5	6-10	-56.7 ÷ -65.8	+14.8 ÷ -24.4	ж	0.74-1.05	1.7-2.2
		ПВ	230-400	-29.1 ÷ -32.0	13-22	-56.9 ÷ -66.0	+22.8 ÷ -25.0	ж	0.75-1.05	1.5-1.9
	Г-406-199.8	П	200-370	-29.3 ÷ -30.8	6-10	-57.0 ÷ -65.8	+5.8 ÷ -24.0	ж	0.9-1.05	2.1-2.5
		ПВ	200-390	-41.0 ÷ -45.0	15- 23.3	-56.9 ÷ -63.0	+19.2 ÷ -25.0	ж	0.77-1.05	1.4-1.9

Таблица 3. Результаты микротермометрических исследований индивидуальных флюидных включений в кварце Панимбинского золоторудного месторождения

№ образца*	Генерация вкл.**	T _{общ.гом} , °C	Вид гом.***	T _{эвтектики} , °C	T _{пл.льда} , °C	Соленость, мас %- NaCl-экв	T _{пл.CO2} , °C	T _{част.гом. CO2} , °C	Вид гом.**	р, кбар	d, г/см ³
Пн 1	П	265-300	г,ж	-40.0...-34.4	-6.8...-2.6	10.6-5.2	-56.9...-59.0	-8.3...+24.3	ж	-	-
Пн 3	П,	180-350	ж	-40.0...-38.0	-22.0...-10.0	23.3-15	-58...-66	-25...-17	ж	-	-
	В	100-190	ж	-27.0...-25.0	-14.3...-9.5	18-14	-	-81...-83.1	ж		
Пн 4	П	290-350	ж, г	-37.0...-40.0	-10.0...-8.0	15-12.5	-60...-65	-90...-92	ж	-	-
Пн 5	П	255-360	ж	-27.2...-28.0	-3.0÷-1.5	6.0-3.0	-57...-60	-88...-17	г,ж	-	-
Пн 6	П	210-340	ж	-35.0...-39.0	-10.5...-9.0	15.5-13.5	-	-83...-75	г,ж	-	-
Пн 8	В	100-190	ж	-	-	-	-56.6...-57.4	-3.3...-12.5	ж	0.2-0.3	0.95-1.01
Пн 10	П	180-265	ж	-37...-47.9	-17.6...-3.5	20.7-7.0	-	+8.2...+14.6	ж	-	-
	В	135-190	ж, г, гж	-33.5...-35	-1.5...-0.3	3.0-0.6	-	-	-		
Пн 12	П, ПВ	180-300	ж, г	-35...-37	-12.0...-10.0	16.5-15	-56.6...-61.2	-4.3...-18.3	ж	0.2-0.3	0.98-1.03
Пн 13	П	180-200	ж	-34...-37	-6.0...-1.2	10-2.5	-57...-62.2	+16.1...-82.1	г, ж	-	-
Пн 17	П, ПВ	180-210	ж	-32.5...-45.0	-18.0...-8.5	21-13	-57.6...-67.4	+11...-62.2	ж	1.2-2.3	0.46-0.94
Пн 19	П	220-410	ж	-26.3...-35	-2.0...-1.8	4.5-3.6	-57.0...-68.7	+13.1...-31.0	г, ж, гж	-	-
	В	145-200	ж	-	-	-	-60.0...-65.1	-5.7...-117.5	г,ж	-	-
Пн 20	П, ПВ	240-305	ж	-21.5...-37.5	-6.8...-0.2	10.5-0.5	-56.6...-58.5	-9...+11.5	ж	0.5-1.7	0.85-0.98
	В	170-200	ж	-26...-29	-3.5...-0.6	7.0-1.1	-	-	-		

Примечание: * - номер образца (№ скважины, глубина): Пн 1 - 63-43; Пн 3 – 145-218.5; Пн 4 - 145-419.0; Пн 5 – 145-470; Пн 6 – 145-521.0; Пн 8 – 145-692.5; Пн 10 – 191-194; Пн 12 – 191-337.8; Пн 13 – 191-358; Пн 17 – 191-566.5; Пн 19 – 191-615; Пн 20 – 194-110.5/6. **генерация флюидных включений: П - первичные, В - вторичные, ПВ - первично-вторичные; ***гомогенизация: ж - в жидкую фазу, г – в газовую фазу, гж – с критическими явлениями. Прочерк - не определялось.