

На правах рукописи



КОЗЛОВ Глеб Александрович

**ГЕОЛОГИЯ И СВИНЦОВО-ЦИНКОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ
КЕМБРИЙСКИХ КАРБОНАТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АНАБАРО-СИНСКОЙ
СТРУКТУРНО-ФОРМАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ,
РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ)**

Специальность: 1.6.10 — геология, поиски и разведка твердых
полезных ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского» (ФГБУ «ВСЕГЕИ») и в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»)

Научный руководитель: **Молчанов Анатолий Васильевич**, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУ «ВСЕГЕИ», отдел металлогении и геологии месторождений полезных ископаемых Центра прогнозно-металлогенических исследований, заведующий отделом.

Официальные оппоненты: **Брусницын Алексей Ильич**, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Институт наук о земле, кафедра минералогии, заведующий, кафедра петрографии, и.о. заведующего, кафедра минералогии, профессор.

Летникова Елена Феликсовна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Лаборатория литодинамики осадочных бассейнов, главный научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск.

Защита состоится 16 мая 2023 г. в 10 час. – 30 мин. на заседании Диссертационного совета 30.1.001.01 (Д 216.022.01), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»)

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

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научно-технической библиотеки ФГБУ «ЦНИГРИ» (по адресу: г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1) и на сайте ФГБУ «ЦНИГРИ»: <http://www.tsnigri.ru/ru/kozlov.html>.
(http://www.tsnigri.ru/disser/kozlov/Kozlov_G_A_DIS.pdf)

Автореферат разослан «_____» апреля 2023 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета



С.С.Двуреченская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности. Стратиформное свинцово-цинковое оруденение в юго-восточной части чехла Сибирской платформы остается слабо изученным и не освоенным. До недавнего момента было известно два проявления свинцово-цинковых руд в долине р. Лена юго-западнее г. Якутск с неустановленным генетическим типом: Куччугуй-Кетеме и Сульфидное. Длительное время они не представляли промышленного и научного интереса ввиду наличия крупных месторождений в пределах Кыллахской минерагенической зоны. Современные представления о геологии и рудоносности карбонатных отложений позволили предположить их принадлежность к стратиформному свинцово-цинковому в карбонатных толщах (MVT) типу. Установление генетического и рудно-формационного типа оруденения, его перспективности, создание методической основы для поисков и оценки подобных объектов, разработка геолого-генетической модели оруденения в раннекембрийских карбонатных отложениях, выявление его поисковых предпосылок и признаков, в том числе на закрытых территориях, является актуальной задачей.

Степень достоверности и апробация работы. Основные выводы и положения диссертационной работы представлены в виде доклада на ряде российских конференций: VIII молодежной научно-практической школе «Новое в познании процессов рудообразования» (ИГЕМ РАН, Москва, 2018); X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России» (СВФУ им. М.К. Амосова, Якутск, 2020); II и III молодежной научно-образовательной конференции «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче» («ЦНИГРИ», Москва, 2021; 2022); XXXII Молодежной научной школе-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова «актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии» (Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, 2021), XI Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» («ЦНИГРИ», Москва, 2022). Автором по теме

диссертации опубликовано 7 статей и тезисов докладов, в том числе 4 статьи в журналах из списка ВАК.

Цель работы: выявление закономерностей распределения и локализации свинцово-цинкового оруденения в кембрийских карбонатных отложениях юго-восточной части Анабаро-Синской СФО.

Задачи работы:

1. Уточнение условий осадконакопления, фациального районирования и характера постседиментационных преобразований в ранне-среднекембрийских карбонатных отложениях северной части Алданской антеклизы.

2. Комплексная минералого-петрографическая, геохимическая и изотопно-геохимическая характеристика осадочных, магматических, вулканических, гидротермально метасоматических и рудных комплексов территории.

3. Анализ структуры геохимических полей участков наибольшего развития прямых признаков оруденения в долине рек Кетеме и Ботома.

4. Создание геолого-генетической модели свинцово-цинкового оруденения территории.

5. Разработка прогнозно-поисковой модели свинцово-цинкового оруденения в раннекембрийских карбонатных отложениях Анабаро-Синской СФО, прогнозная оценка территории на Pb-Zn оруденение.

Фактический материал, методы исследования, личный вклад автора. В основу работы положен материал, отобранный автором в ходе полевых работ, в рамках составления комплекта геологической основы листа Р-52 – «Якутск». В основу геохимического изучения карбонатных пород территории положены основы методики диагностики карбонатных комплексов различных геодинамических обстановок Е.Ф. Летниковой (Летникова и др., 2005). При изучении особенностей локализации оруденения автором использовались основы методики проведения поисковых работ масштаба 1:50 000 на основе комплексного подхода к петрографо-геохимическому изучению и картированию полей слабо проявленных гидротермально-метасоматических изменений пород, разработанная в ФГБУ «ВСЕГЕИ» (Плющев и др., 1981, 1985, 2012).

Типизация оруденения проводилась на основе сравнения элементов прогнозно-поисковых моделей месторождений MVT-

типа, разработанных коллективом ФГБУ «ЦНИГРИ» (Ручкин, 1984; Донец и др., 2017). Выделение петротипов породных комплексов производилось посредством петрографического изучения прозрачных шлифов (545 ед.), прозрачно-полированных шлифов (40 ед.) аншлифов (61 ед.) на оптическом микроскопе Leica DM2700P и ПОЛАМ Л-213М. Изучение состава тонкодисперсных руд, гипергенных образований и карбонатных минералов произведено методом рентгеноструктурного фазового анализа (350 измерений) на базе электронного микроскопа-микроанализатора модели MV 2300 с энергодисперсионным микроанализатором LINK Pentafet (Oxford Instx) в ЦИИ ФГБУ «ВСЕГЕИ» (аналитик Грузова Е.В.).

Химический состав пород определялся в ЦАЛ «ВСЕГЕИ» рентгеноспектральным флуоресцентным (силикатным) методом (XRF) на приборе «ARIEL-9800» (184 ед.). Микроэлементы U, Th, Ta, Nb, Zr, Hf, Rb, Sr, Li, Be, Sn, W, Mo, B, As, Sb, Ag, Bi, Pb, Zn, Cu, Ga, Ge, Sc, Ni, Co, Y (495 ед.) и редкоземельные элементы (345 ед.) определялись методом ICP-MS (прибор «ELAN-6100 DRC»).

Для оценки направленности процесса метасоматоза проведён расчёт баланса вещества в пределах зон метасоматических колоннок гидротермально-изменённых пород с использованием атомно-объёмного метода (25 ед.). Локальные изотопно-геохронологические исследования образцов магматических образований проведены в ЦИИ ФГБУ «ВСЕГЕИ» методом U-Pb изотопного Sims SHRIMP датирования по цирконам на мультиколлекторном вторично-ионном высокоразрешающем микрозонде SIMS SHRIMP-II (4 ед.). Изотопно-геохимические исследования рудных и гидротермально-метасоматических образований проведены в ЦИИ ФГБУ «ВСЕГЕИ» и включали в себя определение изотопного состава С и О в карбонатных породах (15 ед.) на масс-спектрометре для изучения изотопии легких стабильных изотопов DELTA Plus и DELTA Plus XL. Определение изотопного состава серы в сульфидах (10 ед.), свинца в сульфидах (4 ед.) и рудовмещающих породах (8 ед.) проведено в ЦИИ ФГБУ «ВСЕГЕИ» на термо-ионном изотопном мультиколлекторном масс-спектрометре TRITON TI (TIMS). Автор принимал непосредственное участие в проведении полевых работ с отбором образцов и описанием опорных разрезов в рамках составления комплекта геологической основы листа Р-52 – «Якутск», им самостоятельно выполнено описание петрографиче-

ских шлифов, компьютерная обработка и интерпретация петрографо-геохимических и изотопных данных. Выбор методик и обобщение результатов проведены автором самостоятельно. Обработка результатов изотопного датирования магматических образований чаро-синского комплекса проведена совместно с В.Е. Гузевым.

Научная новизна:

1. Получены новые данные о фациальной, формационно-генетической принадлежности карбонатных отложений юго-восточной части Анабаро-Синской СФО, дополнена их петрографическая характеристика, скорректированы границы стратиграфических подразделений и породных комплексов.

2. Выявлены прямые и косвенные признаки раннекембрийского этапа вулканической и эксгаляционной деятельности в пределах северо-восточной части Алданской антеклизы, ассоциированные с процессами раннекембрийского рифтогенеза в северо-восточной части Сибирской платформы.

3. Получены новые данные о фациальной и формационно-генетической принадлежности гидротермально-метасоматических образований, связанных с процессом формирования Палеовиллюйской грабен-рифтовой системы, дана их минералого-геохимическая и изотопно-геохимическая характеристика.

4. Выявлены региональные и локальные факторы накопления рудных элементов в раннекембрийских осадочных структурах.

Практическая значимость. Получены новые данные о слабоизученном районе развития свинцово-цинковой минерализации в пределах юго-восточной Якутии. Разработана геолого-генетическая модель оруденения, раскрывающая особенности и последовательность рудообразования. Подготовлена прогнозно-поисковая модель оруденения, на основе которой проведен прогнозно-минерагенический анализ территории. Результаты представляют практический интерес для геологоразведочных предприятий, занимающихся разработкой и поиском свинцово-цинковых месторождений.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Свинцово-цинковое оруденение юго-восточной части Анабаро-Синской структурно-формационной области локализуется в кембрийских известково-доломитовых отложениях фации предрифового склона в дистальной (удаленной) части осадочного

бассейна. Формирование повышенных концентраций Pb и Zn в рудовмещающих карбонатных отложениях связано с процессом осадконакопления, протекавшим при незначительном влиянии производных вулканической и эксгалационной деятельности.

2. Стратиформное свинцово-цинковое оруденение приурочено к участкам проявления интенсивных апокарбонатно-кремнистых гидротермально-метасоматических изменений осадочных пород. Для этих участков характерна латеральная концентрическая зональность, представленная обширными по размерам периферическими ореолами эпигенетической доломитизации, которые к центру сменяются локальными телами гидротермалитов джаспероидного состава, образующими «ядро» зональности и контролирующими размещение рудной минерализации.

3. Оруденение, расположенное в долинах рек Лена и Ботома, относится к «Миссисипскому» стратиформному свинцово-цинковому в карбонатных толщах геолого-промышленному типу. В структуре аномального геохимического поля рудоносные участки осадочных пород маркируются контрастными положительными мультипликативными аномалиями Pb-Zn-Ag-Mn состава. При этом центрально-рудные уровни вертикальной рудно-геохимической зональности выделяются контрастными аномалиями Pb и Zn. Надрудные уровни представлены положительными аномалиями стронция, обусловленными проявлением в осадочных породах эпигенетической кальцитизации, что может быть использовано в качестве минералого-геохимических индикаторов скрытого на глубине стратиформного свинцово-цинкового оруденения.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, **5 глав**, заключения. Объём работы составляет **224** страницы, она содержит **105** иллюстраций, **30** таблиц, **4** приложения. Список литературы включает **205** наименований. Первое защищаемое положение раскрывается в главе 2, второе положение в главе 3, третье защищаемое положение раскрывается в главах 4 и 5.

В первой главе дается характеристика представлений о генезисе и геолого-промышленной типизации месторождений MVT-типа, характеризуется геологическое строение территории, структурно-формационное и минерагеническое районирование отложений раннего палеозоя Сибирской платформы.

Во второй главе приводится петрографическая и литолого-геохимическая характеристика карбонатных отложений площади, раскрываются особенности распределения породообразующих, примесных и редкоземельных элементов, моделируется состав петрофонда питающей провинции и положение палеобассейна осадконакопления относительно области сноса, агент поступления вещества в бассейн.

В третьей главе излагаются результаты минералого-петрографических и геохимических исследований гидротермально-метасоматически измененных карбонатных и магматических образований, вещественных проявлений гидрогенно-инфильтрационных и диагенетических постседиментационных процессов. Обосновывается связь метасоматоза с рифтогенезом. Обсуждаются результаты изотопного U-Pb, датирования габбро-долеритов чаро-синского гипабиссального дифференцированного комплекса.

В четвертой главе приводятся результаты петрографических, геохимических и изотопных исследований руд с выявлением текстурно-морфологических и минералого-геохимических особенностей. Приводятся результаты анализа строения аномального геохимического поля и его связи с постседиментационными процессами и зональностью оруденения с учётом уровня эрозионного среза.

В пятой главе на основе обобщения полученных результатов делаются выводы о генетическом и рудно-формационном типе оруденения, приводится геолого-генетическая модель формирования рудопроявлений свинцово-цинковой минерализации, приводится прогнозно-поисковая модель оруденения. Приводится локальный и региональный прогноз стратиформного свинцово-цинкового оруденения в карбонатных толщах МVT-типа.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.г.-м.н. А.В. Молчанову за ценные консультации, содержательные обсуждения, помощь и поддержку в подготовке диссертации. Глубокую признательность за неоценимый вклад в исследовательскую деятельность и поддержку научных идей автор выражает к.г.-м.н. Н.А. Алфимовой (СПбГУ), д.г.-м.н. П.А. Игнатову («МГРИ»), к.г.-м.н. С.В. Кашину («ВСЕГЕИ»), к.г.-м.н. В.В. Кузнецову («ЦНИГРИ»), к.г.-м.н. В.И. Леонтьеву (ООО «Институт ГИПРОНИКЕЛЬ»), д.г.-м.н. А.В. Толстову (ФИЦ ЯНЦ СО РАН), д.г.-м.н. А.К. Худолею (СПбГУ), к.г.-м.н. В.В. Шатову

(«ВСЕГЕИ»). Автор благодарен коллективам отдела металлогении и геологии месторождений полезных ископаемых и отдела РГ и ПИ Севера Сибири ФГБУ «ВСЕГЕИ», сотрудникам НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) за предоставленную возможность участвовать в исследованиях, коллегам, участвовавшим в полевых работах, пробоподготовке, обработке результатов полевых работ и лабораторно-аналитических исследований. Отдельно автор приносит благодарность А.А. Федоровой за постоянную моральную поддержку, понимание, помощь в оформлении работы.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучаемая площадь расположена в пределах северо-западной части Алданской антеклизы. Осадочный чехол имеет трёхъярусное строение (рисунок 1.). Нижний структурный этаж сложен венд-кембрийским карбонатным комплексом. В его объеме в пределах изученной территории выделено 17 свит и 4 толщи. Краткая их литологическая характеристика приводится в подрисуночной подписи к рисунку 1. Падение пород субгоризонтальное с незначительным погружением к северо-востоку не более 1-2°. В зоне контакта с вышележащими толщами развита существенно ожелезненная глинистая кора выветривания мощностью до 20 м. Средний структурный этаж сложен терригенными и прибрежно-морскими отложениями, представленными в пределах территории отложениями раннеюрской укугутской свиты. Верхний структурный этаж сложен терригенными и аллювиальными образованиями раннепалеогеновой сырсарской толщи. Породы представлены существенно ожелезненными песчано-глинистыми отложениями и аллогенными переотложенными корами выветривания.

Свинцово-цинковое оруденение до текущего момента не имело отражения в структурах металлогенической зональности территории. Участки развития оруденения пространственно приурочены к полям развития вещественных проявлений девонско-раннепалеозойского рифтогенеза (южный фланг обрамления Палеовиллойской грабен-рифтовой системы). Всего в пределах территории выявлено 4 рудопроявления и более 45 пунктов минерализации свинца и цинка в карбонатных породах. Наиболее перспективные рудопроявления приурочены к отложениям кетеменской и титаринской свит раннего кембрия. Рудные тела имеют пластообраз-

ную, лентовидную, линзовидную, реже трубообразную форму. Содержание свинца в породах варьирует от 0.25 % до 1.0–1.5 %, максимумом 13.19 %, в среднем 3,4 %. Содержания цинка варьируют от 0.25 % до 6.0 %, в среднем 2,84 %.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Свинцово-цинковое оруденение юго-восточной части Анабаро-Синской структурно-формационной области, локализуется в кембрийских известково-доломитовых отложениях фации предрифового склона в дистальной (удаленной) части осадочного бассейна. Формирование повышенных концентраций Pb и Zn в рудомещающих карбонатных отложениях было связано с процессом осадконакопления, протекавшим при незначительном влиянии производных вулканической и эксгальационной деятельности.

Анабаро-Синская СФО объединяет область распространения рифогенных раннекембрийских карбонатных отложений со сложной внутренней фациальной зональностью, основной структурной единицей которой является Западно-Якутский барьерный риф. В пределах изучаемой СФО выделяется три СФЗ, объединяющие отложения фации барьерного рифа (Толбо-Мухаттинская СФЗ), предрифового склона (Синско-Ботомская СФЗ) и мелководноморские рифоидные отложения Амгинской СФЗ (рисунок 2.). Геохимические особенности карбонатных отложений данных зон зависят от литологического состава пород, условий осадконакопления и палеогеографических особенностей территории. В основу геохимических исследований положена методика, основанная на характере корреляции химических элементов в карбонатных отложениях, условно подразделенных на две основные группы. Первая – типоморфные элементы (Ti, Zr, Mn, Sr, Ba), которые дают представление о физико-химических условиях осадконакопления. Во вторую группу входят элементы-примеси, которые характеризуют петрогенетический характер питающей провинций. Из 25 измеренных элементов информативным оказались концентрации 17: Co, Ni, Cr, V, Y, Cu, Zn, Ag, Li, Sb, Pb, Rb, Mo, Sn, W, Th, U. Характеристика распределения элементов выполнялась по выборкам неизмененных или слабоизмененных карбонатных пород.

Полученные результаты позволяют моделировать положение области осадконакопления в ранне-среднекембрийское время в ди-

стальной части бассейна на значительном удалении от континентального источника сноса. Это хорошо согласуется с представлениями о палеографии карбонатного бассейна Сибирской платформы (Журавлёва, 1979; Казанский, 1986; Мельников и др., 1989; Булгакова 1995; Варламов и др., 2008, 2016). В таких обстановках влияние континентального сноса в качестве источника поступления вещества в осадок являлось незначительным.

Изученные отложения в значительной степени обеднены примесными элементами, концентрация которых варьирует на уровне 0.2-0.7 кларковых концентраций (КК) для карбонатных пород (таблица 1.). Исключение составляют Li и Rb. В разрезе Анабаро-Синской СФО в целом наблюдается обеднение пород такими элементами, как Y, Ag, Cu, Zn, Sb, Pb, Sn.

На положение бассейна осадконакопления в дистальной его части указывает и характер распределения HREE/LREE, варьирующий для большинства пород в значении 1:6-1:8, что характерно для осадочных эпиконтинентальных карбонатных бассейнов древних платформ (Летникова, 2005).

Рудомещающие отложения кетеменской и титаринской свит Синско-Ботомской СФЗ, сформировавшиеся в обстановке внешнего предрифового склона, имеют отличные от общего тренда бассейна характеристики, обусловленные кратковременным этапом вулканизма в пределах осадочного бассейна. На это указывает обогащение пород кремнистым материалом, наличие в разрезе реликтов гиллобазальтов и вулканогенно-осадочных пород, характерные геохимические особенности пород. Маркерами вулканического процесса являются закономерные ассоциации Ba и Mn с Pb, Zn, Co, Ag; пологий угол наклона фигуративных линий спектров распределения REE, с отношением HREE/LREE выше 1:4 (рисунок 3.), соответствующий карбонатным отложениям, сформировавшихся в обстановке задугового бассейна и океанических островов (Летникова, 2005); аномальные для карбонатного эпиконтинентального бассейна значения Eu-аномалии (более 0.7), характерные для карбонатных островодужных и докембрийских субплатформенных отложений (Летникова, 2003); значения Ce-аномалии от слабо отрицательной до положительной, которые в отсутствие континентальных источников сноса не могут объясняться размывом пород основного состава (Летникова, 2003).

Литолого-геохимические особенности кетеменской и титаринской свиты не проявляются в их фациальных аналогах, в выше и ниже лежащих отложениях. Это позволяет предположить кратковременность магматической активности и положение её очага в пределах внешней зоны рифогенных отложений, в пределах погруженной части Алданской антеклизы, где кембрийские породы перекрыты толщами мезо-кайнозойского возраста. В таких условиях Западно-Якутский риф, выполняя функцию барьера, не позволял Pb и Zn мигрировать с морскими течениями на юго-восток. В условиях гумидного климата карбонатные отложения кетеменской и титаринской свит формировались в пределах неглубокого шельфа, где такие элементы как Pb и Zn могли осаждаться на окислительном геохимическом барьере, сорбироваться оксидами и гидроксидами Mn и Fe (Летникова, 2005, Юдович и др., 2011), что подтверждается их литолого-геохимическими особенностями.

2. Стратиформное свинцово-цинковое оруденение приурочено к участкам проявления интенсивных апокарбонатно-кремнистых гидротермально-метасоматических изменений осадочных пород. Для этих участков характерна латеральная концентрическая зональность, представленная обширными по размерам периферическими ореолами эпигенетической доломитизации, которые к центру сменяются локальными телами гидротермалитов джаспероидного состава, образующими «ядро» зональности и контролирующими размещение рудной минерализации.

Генезис и классификация доломитов и других вторичных образований территории являются дискуссионными. Комплексное минералого-петрографическое исследование постседиментационных преобразований карбонатных и магматических пород территории позволило установить широкое распространение вещественных проявлений низкотемпературных гидротермально-метасоматических (ГМ) процессов (доломитизация, джаспероидизация, аргиллизит-березитизация). Поля выходов эпигенетических доломитов картировались предшественниками в качестве самостоятельных стратиграфических единиц или их составляющих (мухатинская толща, титаринская, олёкминская и барылайская свиты) (Хан, 1963ф; Камалетдинов, 1984ф; Гаев, 1992ф; Щербаков и др., 1999). ГМ образования формируют обширный ореол, распространяющийся за пределы Лена-Амгинского междуречья. Только на

изучаемой территории его площадь составляет около 12 000 км². Пространственная связь данных образований с зонами кремнисто-карбонатных метасоматитов и ассоциация с оруденением позволили предположить их сингенетичность и рассмотреть в качестве единой *тектоногенной апокарбонатно-кремнистой гидротермально-метасоматической формации (ГМФ)* с характерной минералогическо-петрографической зональностью (Петров и др., 2016; Плющев и др., 2017), отражающей направленность метасоматического процесса (таблица 2.).

Морфология и степень проявленности метасоматитов зависит от литологического состава, пористости, микротрещиноватости и тектонической неоднородности вмещающих пород. Наиболее процессу апокарбонатно-кремнистого метасоматоза подвержены пелитоморфные массивные известняки. В оолитовых и комковатых водорослевых известняках, а также органогенно-обломочных породах перекристаллизации подвержен преимущественно цемент, а в раннедиагенетических тонко-мелкозернистых доломитах перекристаллизация проявлена только в пределах трещин и пустот. На юге площади, в верховьях рек Улу, Кырбыкан и Нялгабар зона вторичной доломитизации зачастую редуцирована.

Содержание примесных элементов в различных зонах гидротермально-метасоматической колонки зависит от концентрации элементов в неизмененных карбонатных породах, сформировавшейся на стадии седиментогенеза (таблица 3.). Для пород, развитых по карбонатным отложениям Амгинской СФЗ, характерно обогащение Cu, Mo, W. Для метасоматитов, протолитом которых выступают рудовмещающие отложения кетеменской и титаринской свит Синско-Ботомской СФЗ, характерна Co, Mn, Pb, Zn, Ag специализация. В случае значительного обогащения вмещающих пород Pb и Zn в центральной и ядерной части гидротермально-метасоматической колонки формируется рудная сульфидная минерализация. В таких породах от 5 до 20 % объема выполнено кристаллами пирита, марказита, сфалерита и галенита в ассоциации с карбонатной и кремнистой минерализацией. Рудная минерализация распространена только в ассоциации с метасоматитами, развитыми по карбонатным отложениям кетемнской и титаринской свиты.

Использованная диссертантом в ходе выполнения работы специальная методика крупномасштабного картирования гидротермаль-

но-метасоматических образований в полном объеме их проявления позволила составить карты гидротермально-метасоматической зональности (рисунок 4.) для участков детализации в масштабе 1:50 000. Она характеризуется площадным ореолом эпигенетической доломитизации, вмещающим субвертикальные зоны кремнисто-кварцевой минерализации массивного и брекчиевидного типа, субпластовые линзовидные тела или рассеянную гнездовидную вкрапленность. Идентичные значения изотопного состава Pb в рудах, околорудных метасоматитах и эпигенетических доломитах подтверждают связь оруденения с вещественными проявлениями апокарбонатно-кремнистой ГМФ.

Ассоциированные с процессами эпигенетической доломитизации проявления *тектоногенной аргиллизит-березитовой ГМФ* развиты по долеритам чаро-синского комплекса и вулканогенным и вулканогенно-осадочным породам в разрезе кетеменской свиты. Они пространственно-сопряжены с зонами апокарбонатно-кремнистых метасоматитов и являются производными одного процесса, по-разному проявленного в карбонатной и силикатной среде. Аргиллизит-березиты не оказывают значительного влияния на концентрацию и локализацию свинцово-цинкового оруденения, однако позволяют установить, что формирование руд происходило после кристаллизации долеритов. По результатам U-Pb датирования их возраст варьирует от 371 ± 5 до 369 ± 1 млн лет (Гузев и др., 2021), что позволяет связать оруденение с процессами раскрытия Палеовиллойской грабен-рифтовой системы (Масайтис и др., 1975; Олейников и др., 1984) и оценить возраст формирования сульфидной минерализации как позднедевонско-раннекаменноугольный. Эти данные подтверждаются результатами Pb-Pb изотопии пород территории.

Вопрос природы растворов данных ГМ систем на текущий момент остается дискуссионным. Большинство исследователей сходятся во мнении, что агентом переноса вещества для оруденения данного типа являются захороненные катагенетические седиментогенные воды (White, 1968; Хэнор, 1982; Пономарёв и др., 1991; Крайнов и др., 2005, 2006; Петров и др., 2016). Результаты изучения изотопного состава свинца, серы, кислорода и углерода пород и сульфидов позволяют в совокупности подтвердить данное предположение. Характер фракционирования изотопов $\delta^{13}\text{C}$ (-0,9 – 1,1 ‰ PDB) и $\delta^{18}\text{O}$ (22,8 – 24,5 (-0,9 – 1,1 ‰ SMOW) идентичен для неиз-

менных известняков, эпигенетических доломитов и джаспероидов. Характер фракционирования изотопов $d^{34}S$ (7,4-12,0) свидетельствует о заимствовании серы сульфидов из морской воды и частичном смешении её с биогенным источником, предположительно, поступавшим из углеродистых отложений синской и куторгниовой свит. (Виноградов, 1973; Донец и др., 1978, 2017, Ковалёв и др., 1991, Крайонов и др., 2005, 2006, Ковешников и др., 2012). Захороненные седиментогенные воды находились в погребенном состоянии под давлением, но в ходе процессов палеозойского рифтогенеза с формированием разрывных нарушений чаро-синской зоны произошла их мобилизация и миграция в элизионном режиме. Данные о степени катагенеза углеродистого вещества синской свиты (ранняя стадия мезокатагенеза) указывают на глубины погружений пород от 1900 м на западе до 2200 м на востоке, что в условиях установленного температурного градиента территории в $5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ позволяло нагревать седиментогенные воды до $110\text{-}127,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Геология нефти и газа Сибирской платформы, 1981; Парфёнова и др., 2017). Результаты Pb-Pb изотопного анализа руд и околорудных метасоматитов, на основе двухстадийной модели развития Pb-Pb системы Стейси-Крамера (Stacey, 1975), позволяют оценить возраст формирования оруденения в интервале 350-400 млн лет.

3. Оруденение, расположенное в долинах рек Лена и Ботома, относится к «Миссисипскому» стратиформному свинцово-цинковому в карбонатных толщах геолого-промышленному типу. В структуре аномального геохимического поля рудоносные участки осадочных пород маркируются контрастными положительными мультипликативными аномалиями PbZnAgMn состава. При этом центрально-рудные уровни вертикальной рудно-геохимической зональности выделяются контрастными аномалиями Pb и Zn. Надрудные уровни представлены положительными аномалиями стронция, обусловленными проявлением в осадочных породах эпигенетической кальцитизации, что может быть использовано в качестве минералого-геохимических индикаторов скрытого на глубине стратиформного свинцово-цинкового оруденения.

Свинцово-цинковое оруденение территории локально изучалось предшественниками только в рамках работ по составлению геологической карты масштаба 1:200 000 и в ходе поисковых работ на марганец (Хан и др., 1963; Камалетдинов, 1984; Костюк, 1992;

Щербаков и др., 1999). Выявленные в ходе работ особенности латеральной и вертикальной минералого-геохимической зональности отражают полихронность процессов, сформировавших своевременную морфологию оруденения.

До 90 % свинцово-цинковых руд в пределах территории интенсивно окислены. Это затрудняет выделение минеральных парагенезисов и ассоциаций. В зависимости от структурно-вещественных и минералого-геохимических характеристик рудных тел в пределах рудоносного разреза выделяется *три уровня* (таблица 4.), различных по морфологии, минеральному составу и продуктивности рудных тел.

Нижний уровень характеризуется преобладанием субпластовых линзовидных тел с вкрапленной, редко прожилково-вкрапленной минерализацией, представлен *существенно пиритовыми и существенно марказитовыми рудами* в нижних пачках кетеменской свиты и на контакте с куторгиновой свитой. *Центральный уровень* характеризуется лентовидными субпластовыми рудными телами с прожилково-гнездовидной, массивной субколчеданной минерализацией, представлен *сфалерит-галенит-марказит-пиритовыми рудами, реже существенно сфалеритовыми рудами* в объёме кетеменской свиты и нижних пачек титаринской свиты. *Верхний рудный уровень* представлен пластовыми, трубообразными рудными телами с массивной, прожилковой, прожилково-гнездовидной и брекчиевидной минерализацией, представлен *пирит-сфалерит-галенитовыми, сфалерит-галенитовыми и существенно галенитовыми рудами* в объёме титаринской свиты. Также в разрезе присутствуют специфические *псиломелан-пиролозитовые руды*, приуроченные к зальбандовым частям свинцово-цинковых рудных тел нижнего и центрального уровня или формирующие собственные пластовые залежи в верхней части разреза кетеменской свиты. Мощность рудного разреза варьирует от 40 до 150 м.

Стратифицированный характер распределения уровней оруденения при моноклинальном залегании рудовмещающих толщ закономерно отражается в особенностях состава и строения выявленных пунктов минерализации и рудопроявлений (рисунок 5.). Структурно-вещественные особенности выявленных объектов приводятся в *таблице 4* и демонстрируют характерную смену рудных уровней в пределах рудовмещающих отложений от ниже-рудного на северо-

западе к центрально-рудному и верхне-рудному на северо-востоке. Для окисленных руд характерно развитие лимонита, гётита, гидрогётита, гидрогематита, псиломелана, пиролюзита, бернессита и церуссита.

Содержания Pb и Zn зависит от состава руд и структурно-текстурных особенностей рудных тел, степени влияния гипергенных и гидрогенно-инфильтрационных процессов. Отношение Pb к Zn для нижне-рудного уровня варьирует 1:2-1:5, для центрально-рудного уровня 1:1-1:1.2 и до 1:0.8-1:0.2 в рудных телах верхне-рудного уровня. Пониженное отношение Pb к Zn в верхних и центральных горизонтах во многом связано с интенсивным их окислением. Микрозондовые исследования тонкодисперсных минералов показали, что в зонах окисления Zn фиксируется гидроокислами железа и марганца. Это может указывать на наличие на глубоких горизонтах невоскрытого, несulfидного цинкового оруденения.

Минералого-геохимические особенности гидротермально-метасоматических и рудных образований позволяют утверждать о пространственной и парагенетической связи низкотемпературных апокарбонатно-кремнистых метасоматитов и свинцово-цинковых руд, что находит свое отражение в структуре аномального геохимического поля (рисунок 6.). Последнее характеризуется концентрической зональностью и стратифицированным характером распределения положительных и отрицательных геохимических аномалий. Анализ корреляционной связи элементов позволил выделить их закономерные ассоциации. Наиболее важная из них – **PbZnAgMn** ассоциация – является типоморфной для свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах, её положительные мультипликативные аномалии в точности совпадают с гидротермально-метасоматической и рудной зональностью, а наиболее контрастные аномалии относятся к рудопроявлениям полиметаллической и марганцевой минерализации. Ассоциации **LiCoCuVNi**, **ZrRbNbREEP** отражают степень насыщения вмещающих пород вулканогенной примесью и нерастворимым остатком, ассоциация **FeBaWYSbBe** маркирует внешнюю зону Г-М колонки, а также зону гипергенеза. Использовать их в качестве поискового критерия не целесообразно. В то же время, **Sr** не формирует устойчивых ассоциаций ни с одним из элементов кроме **Ca**. Петрографически это выражается его накоплением в кальците неизменных известняков, а также зонах

кальцитизации, наблюдающихся в кровельной части коренных выходов и занимающих *надрудное положение*, в связи с чем аномалии Sr могут использоваться в качестве поискового критерия для выявления нескрытого оруденения.

По совокупности прогнозно-поисковых признаков, оруденение соответствует стратиформному свинцово-цинковому в карбонатных толщах (MVT) рудно-формационному типу, *миссисипскому геолого-промышленному типу* (Донец, 2003, 2017), но имеет свои региональные особенности геохимической специализации руд и связь парагенетическую рудоформирования с процессами континентального рифтогенеза (таблица 5.). Полученные результаты позволяют моделировать в пределах северного склона Алданской антеклизы крупную рудоносную структуру ранга минерагенической зоны, основной объём которой перекрыт чехлом мезозойских отложений на водоразделе рек Лена и Вилюй (рисунок 7.). Геологическая изученность кембрийских отложений данной части территории имеет точечный характер, они вскрыты лишь единичными скважинами. В её пределах по результатам работ выделен Кетеманский потенциальный рудный узел, в пределах которого установлены руды центрального и верхнего уровней с промышленно-значимыми концентрациями полезных компонентов. В его пределах локализованы три участка для проведения крупномасштабных поисковых работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных работ позволили локализовать и типизировать свинцово-цинковое оруденение в юго-восточной части Анабаро-Синской СФО.

1. Кембрийские карбонатные отложения формировались в пределах внутриконтинентального бассейна Сибирской платформы в рифогенной обстановке в условиях повышенной температуры и солёности вод бассейна.

2. Значительная часть доломитов в карбонатном разрезе имеет эпигенетическую природу и ассоциирована с зонами джаспероидизации, имеющими околорудное положение. Формирование ГМ системы и оруденения связано с процессами девонско-каменноугольного рифтогенеза в центральной части Сибирской платформы.

3. Оруденение относится к стратиформному свинцово-цинковому типу в карбонатных толщах (МVT-тип), «миссисипско-му» геолого-промышленному типу.

4. Оруденение сформировалось в три этапа (рисунок 8.). В первый происходило формирование повышенной концентрации рудных элементов в отложениях кетеменской и титаринской свиты в рифогенной обстановке. Во второй, в связи с процессами континентального рифтогенеза происходит формирование площадных горизонтов джаспероидизации и эпигенетической доломитизации, мобилизация рудного вещества рассольными элизионными катагенетическими водами и концентрация его на геохимических и гидродинамических барьерах. В третий этап с формированием площадной апокарбонатной коры выветривания происходит окисление и частичное перераспределение рудного вещества с предполагаемым выносом Zn на глубокие горизонты.

5. По совокупности геоморфологических, структурно-магматических, гидротермально-метасоматических и геохимических критериев выделены перспективные участки, в пределах которых может быть обнаружено скрытое свинцово-цинковое оруденение (рисунок 7.). Показано, что ореолы апокарбонатно-кремнистых метасоматитов в совокупности с приуроченными к ним положительными аномалиями *PbZnAgMn* и *Sr* состава могут быть использованы в качестве критериев прогнозирования свинцово-цинковой минерализации.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. *Козлов Г. А.* Литолого-геохимические особенности раннекембрийских карбонатных отложений юго-восточной части Анабаро-Синской структурно-формационной области Республики Саха (Якутия) и их связь со стратиформным свинцово-цинковым оруденением / *Г.А. Козлов*, В.Е. Гузев, А.В. Молчанов, А.В. Терехов // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 86. – С. 31–44. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_86_31-44.

2. *Гузев В. Е.* Чаро-Синский дайковый пояс (среднее течение р. Лена): локальный U-Pb возраст циркона и петролого-геохимические особенности / В.Е. Гузев, *Г.А. Козлов*, А.В. Терехов, А.В. Молчанов, И.О. Лебедев, Ю.Л. Светлова // Региональная гео-

логия и металлогения. – 2021. – № 87. – С. 28–41. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_87_28-412.

3. *Молчанов А.В.* Алдано-Вилуйская рудно-россыпная золотоносная провинция (Россия). / А.В. Молчанов, А.В. Терехов, **Г.А. Козлов**, И.О.Лебедев, Е.И. Хорохорина, В.Е. Гузев // Руды и металлы. – 2021. – №2. – С. 25–39. DOI: 10.47765/0869- 5997-2021-10009.

4. **Козлов Г.А.** Минералого-геохимические особенности и рудоносность апокарбонатно-кремнистых гидротермально-метасоматических образований в раннекембрийских отложениях Синско-Ботомской структурно-формационной зоны, Республика Саха (Якутия) / Г.А. Козлов, С.В. Кашин, В.Е. Гузев, А.В. Молчанов, А.В. Терехов // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 88. – С. 65-83. 00–00. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_88_00-00.

В других изданиях:

5. **Козлов Г.А.** Новые данные о коренной (Pb-Zn-Ag-Rh) рудоносности центральной части Алданской антеклизы, Центральная Якутия: состав руд и закономерности размещения / **Г.А. Козлов**, А.В. Терехов // Материалы VIII молодёжной научно-практической школы «Новое в познании процессов рудообразования». М.: – ИГЕМ РАН. – 2018 г. – С. 193-195.

6. **Козлов Г.А.** Рудно-формационная принадлежность Pb-Zn-Mn оруденения в раннекембрийских карбонатных отложениях Синско-Ботомской структурно-формационной зоны, республика Саха (Якутия) / **Г.А. Козлов**, А.В. Терехов, В.Е. Гузев, О.Л. Соловьев, Е.И. Хорохорина, Ю.Л. Светлова // Материалы конференции «Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов – от прогноза к добыче». М.: ЦНИГРИ. – 2021. – С. 77-78.

7. **Козлов Г.А.** Факторы контроля стратиформного свинцово-цинкового оруденения (MVT-тип) в раннекембрийских карбонатных отложениях Анабаро-Синской СФО как основа регионального прогнозирования нового свинцово-цинкового рудного бассейна Сибирской платформы. // Материалы XXXII «Молодёжной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии». Петрозаводск.: ИГ КарНЦ РАН. – 2021. – С. – 80-82.

Справа – Рис. 1. Карта геологического строения юго-восточной части Анабаро-Синской СФО (на основе данных Камалетдинова В.А. (1985ф), С.Д Костока (1992ф), с авторскими дополнениями)

Условные обозначения: 1-2: Кайнозойские отложения: 1 – кырбыканская толща: аллювиальные коры выветривания, 2 – сырсарская толща: гравелиты, песчаники, глины, бурые железняки; 3-5: **Ранне-среднеюрские отложения:** 3 – якутская свита: песчаники, алевролиты, прослои бурых углей, 4 – сунтарская свита: песчаники, алевролиты, 5 – укугутская свита: галечники, песчаники, алевролиты; 6-7: **Среднекембрийские отложения:** 6 – усть-ботомская свита: переслаивание глинистых известняков и мергелей, 7 – кычикская свита: известняки органогенно-обломочные, водорослевые, доломиты, мергели, песчаники и алевролиты известковые; **Ранне-среднекембрийские отложения:** 8 – еланская свита: известняки, в том числе органогенно-обломочные, доломиты, песчаники известковые; 9-17: **Раннекембрийские отложения:** 9 – титаринская свита: массивные доломиты, известняки, 10 – кетеменская свита: известняки массивные, доломиты, 11 – хомустахская свита: известняки и доломиты органогенные, 12 – курторгиновая свита: известняки и доломиты битуминозные, 13 – синская свита: битуминозные сланцеватые алевролиты, аргиллиты, 14 – переходная свита: известняки, глинистые известняки, доломиты, 15 – пестроцветная свита: пестроцветные известняки, мергели, доломиты, 16 – мухаттинская толща: массивные кавернозные доломиты, в том числе водорослевые и оолитовые, 17 – олёкминская свита: доломиты, известняки, в том числе органогенно-обломочные; 18 – дифференцированные дайки долеритов и монцо-габбро-долеритов чаро-синского комплекса; 19 – рудопоявления полезных ископаемых и их индексы; 20 – пункты минерализации полезных ископаемых и их индексы; 21 – контуры Кетеменского потенциального рудного узла; 22 – контуры Синско-Ботомской потенциальной металлогенической зоны; 23 – контуры опорных участков исследования и их наименования.

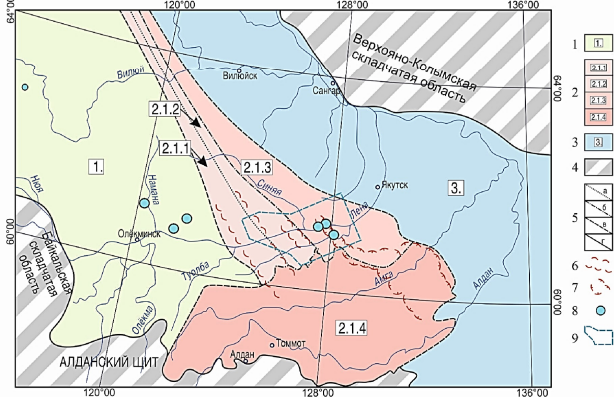
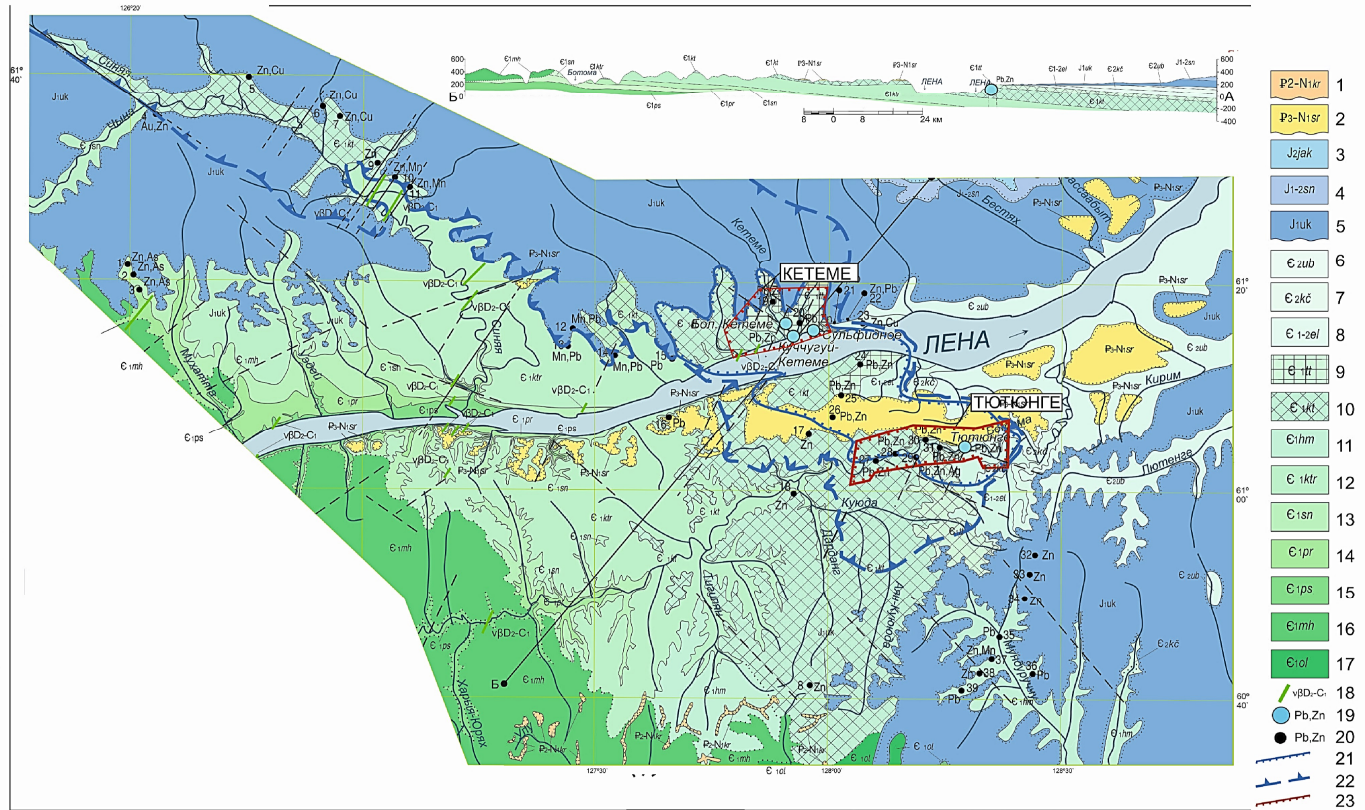


Рис. 2. Схема структурно-формационного районирования раннекембрийских отложений юго-восточной части Восточно-Сибирской платформы
Условные обозначения: 1 – Турухтано-Олёкмо-Иркутская СФО, 2 – Анабаро-Синская СФО; 2.1.1 – Мальканская СФпЗ; 2.1.2 – Мухаттинская СФпЗ (Толбо-Мухаттинская СФЗ); 2.1.3 – Синско-Ботомская СФЗ; 2.1.4 – Амгинская СФЗ; 3. – Куонамская СФЗ. 4 – Область отсутствия раннекембрийских отложений. 5 – Границы структурно-формационных подразделений. а – границы Восточно-Сибирской платформы; б – Границы СФО; в – границы СФЗ; г – границы СФпЗ. 6-7 – границы распространения раннекембрийских рифовых отложений (6 – Западно-Якутский барьерный рифовый комплекс; 7 – Танахайско-Усть-Мильский риф). 8 – положение известных рудопоявлений свинца и цинка. 9 – контуры участка исследования.

Ярус	СФЗ	Свита	Co	Ni	Cr	V	Y	Cu	Zn	Ag	Li	Sb	Pb	Rb	Sr	Zr	Mo	Sn	W	Th	U
Амгинский	Синско-Ботомская	Еланская свита	0,50	0,27	0,70	0,65	0,22	0,38	0,42	0,24	0,36	0,55	0,63	0,66	0,61	0,60	2,75	0,31	0,47	0,19	1,01
	Синско-Ботомская	Кычикская свита	0,74	0,32	1,53	0,50	0,29	0,38	0,27	0,09	0,87	0,40	0,21	0,97	1,13	0,53	0,79	0,33	0,51	0,25	0,56
	Синско-Ботомская	Усть-Ботомская свита	1,06	0,49	1,92	0,57	0,30	0,56	0,35	0,17	0,91	0,44	0,28	1,42	1,53	1,02	0,91	0,31	0,51	0,37	0,53
	Амгинская	Танахайская и амгинская свиты	0,30	0,12	1,04	0,17	0,09	0,17	0,15	0,37	0,22	0,31	0,18	0,46	1,11	1,03	0,83	0,40	0,47	0,09	0,38
Толбо-Синский	Синско-Ботомская	Титаринская свита	1,72	0,42	0,49	0,36	0,22	0,32	2,82	0,51	0,36	0,48	0,98	0,41	0,12	0,50	1,90	0,19	0,54	0,11	0,32
	Амгинская	Хомустахская свита	0,29	0,10	0,75	0,15	0,06	0,37	0,19	0,33	0,11	0,22	0,13	0,27	0,15	0,72	0,60	0,29	0,47	0,07	0,15
	Синско-Ботомская	Кетеменская свита (р. Ботоме)	0,31	0,08	0,20	0,19	0,09	0,13	1,27	0,21	0,11	0,27	0,54	0,22	0,15	0,62	1,35	0,25	0,52	0,04	0,34
	Синско-Ботомская	Кетеменская свита (р. Лена)	1,25	0,25	0,31	0,42	0,28	0,29	4,94	0,40	0,18	0,34	2,27	0,26	0,26	0,51	0,97	0,06	0,66	0,14	0,88
Ботомский	Синско-Ботомская	Кетеменская свита (р. Кырбыкан)	1,74	0,46	0,58	0,38	0,24	0,37	0,47	0,15	1,23	0,26	0,16	0,45	0,15	0,41	0,74	0,12	0,64	0,18	0,32
	Синско-Ботомская	Кетеменская свита (р. Мундурочку)	0,35	0,21	1,39	0,21	0,06	0,42	0,19	0,28	2,91	0,25	0,15	0,68	0,10	1,05	0,73	0,34	0,49	0,17	0,56
	Синско-Ботомская	Барылайская свита	0,84	0,27	0,61	0,46	0,19	0,74	0,39	0,08	0,54	0,48	0,17	1,12	0,50	0,42	0,61	0,07	0,47	0,37	0,28
	Толбо-Мухаттинская	Унгельнская свита (р. Нальгатах)	1,17	0,30	0,68	0,86	0,19	0,35	0,23	0,10	2,35	0,33	0,07	1,60	0,39	1,42	1,25	0,35	0,83	0,51	0,47
Томто-Амгинский	Синско-Ботомская	Унгельнская свита (р. Кырбыкан)	1,28	0,19	0,99	0,29	0,07	0,25	0,18	0,27	1,19	0,38	0,12	0,42	0,08	0,82	2,67	0,27	0,59	0,18	0,33
	Синско-Ботомская	Унгельнская свита (р. Улуу)	1,80	0,59	0,79	0,86	0,24	1,33	0,38	0,11	1,93	0,59	0,23	1,11	0,25	0,63	1,34	0,11	1,66	0,50	0,59
	Синско-Ботомская	Синская свита	0,38	0,23	0,58	0,44	0,17	0,50	0,25	0,09	0,54	0,39	0,22	0,72	0,75	0,33	0,68	0,06	0,47	0,31	0,33
	Синско-Ботомская	Курторгиновая свита	0,16	0,09	0,31	0,22	0,05	0,24	0,09	0,07	0,10	0,22	0,29	0,20	0,67	0,12	0,60	0,10	0,47	0,10	0,35
Томто-Амгинский	Синско-Ботомская	Олёкминская свита	0,44	0,14	0,76	0,54	0,08	0,24	0,14	0,13	0,56	0,34	0,11	0,35	0,19	0,77	1,13	0,22	1,12	0,15	0,44
	Синско-Ботомская	Пестроцветная свита	0,90	0,30	0,86	0,57	0,22	0,44	0,37	0,09	0,76	0,32	0,13	1,54	0,48	0,57	0,60	0,08	0,83	0,46	0,23
	Толбо-Мухаттинская	Пестроцветная свита Ой-Муранский рифовый массив	0,85	0,31	0,75	0,54	0,16	0,82	0,32	0,10	1,00	0,25	0,10	1,23	0,28	0,55	0,66	0,10	0,49	0,33	0,21
Толбо-Мухаттинская	Толбо-Мухаттинская	0,16	0,07	0,11	0,11	0,09	0,14	0,03	0,07	0,40	0,22	0,06	0,32	0,19	0,10	0,60	0,21	0,47	0,08	0,07	

Таблица 1. Геохимическая специализация карбонатных отложений юго-восточной части Анабаро-Синской СФО
Примечание: (значения нормированы относительно кларка в карбонатных породах по Беусу. (Перельман, 1998) Синим цветом отмечено обеднение пород элементом менее 0,5 кларк-концентрации (КК), зеленым от 1,0 до 2,0 КК, желтым до 2,5 КК, красным свыше 2,5 КК. Повышенные концентрации Pb, Zn, Co являются локальной геохимической особенностью пород кетеменской и титаринской свиты и не проявляются в их фациальных аналогов, а степень обогащения пород данными элементами увеличивается с юга на северо-запад.

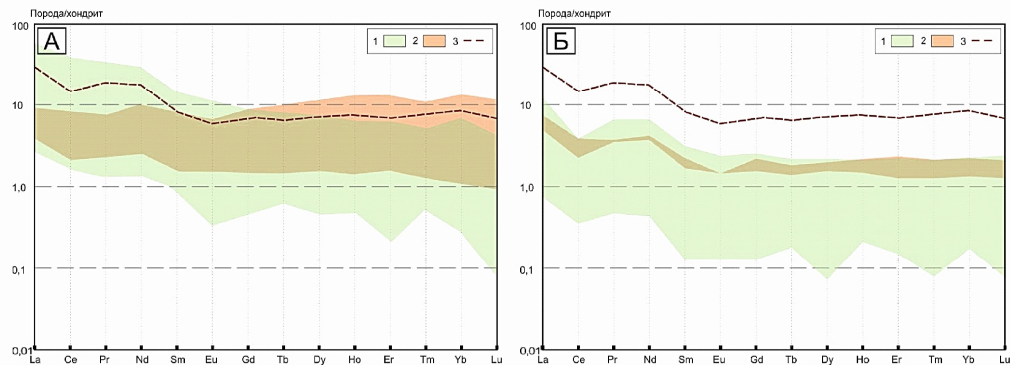


Рис.3 Характер распределения спектров РЗЭ в раннекембрийских карбонатных отложениях кетеменской и титаринской свит Сисско-Ботомской СФЗ
Условные обозначения: А – пробы с левобережья р. Лена; Б – пробы с нижнего течения р. Ботома и р. Мундуручу. 1 – Породы 1-го типа с низкими значениями LREE/HREE отношений <1.4; 2 – породы 2-го типа с высокими LREE/HREE отношениями; 3 – выветрелые вулканические образования. Количество проб в выборках по выделенным типам: Для реки Лена – 9:15; Для реки Ботома: 2:21. Значения нормированы на стандарт CI Хондрит.

Генетический тип, формация	Гидротермально-метасоматическая ассоциация	Индекс зоны	Минеральные ассоциации	Реакции замещения
ТЕКТОНОГЕННЫЕ Апокарбонатно-кремнистые метасоматиты, связанные с процессами континентального рифтогенеза	Неизменные породы	0	Cal±C	Кальцит→Доломит
	Неполностью доломитизированные известняки	D1	Cal±Dol±C	Кальцит→доломит, гипс
	Полностью измененные эпигенетические доломиты	D2	Dol±(Kut-Sd)±Gp±Anh±Cal±(Gn,Sp,Py)	Доломит → Fe-Mn доломит, сидерит; Гипс→Ангидрит; Кальцит
	Джаспероидизированные эпигенетические доломиты	J1	Dol±(Kut-Sd)±C±Qtz±Py±(Gn,Sp)	Доломит → Fe-Mn доломит, сидерит; Гипс→Ангидрит; Кальцит Халцедон → Халцедоновидный кварц, кварц
	Полностью измененные джаспероиды	J2	Qtz±C±Dol±(Kut-Sd)±(Gn,Sp)±Cal	

Таблица 2. Минеральный состав и генетическая типизация гидротермально-метасоматических апокарбонатно-кремнистых образований.

Примечание: в пределах минеральных ассоциаций минералы приведены в порядке убывания распространенности. Буквенные обозначения: Cal – кальцит; C – халцедон; Dol – доломит; Kut – Мн-доломит; манганокальцит и кунтагорит; Gp – гипс; Anh – ангидрит; Gn – галенит; Py – сфалерит; Pu – пирит; Qtz – кварц;

Гидротермально-метасоматические образования			Привнос (%)					Вынос (%)		
Тип	Породы	Индекс	> +1000	+1000 +500	+500 - +100	+100 - +50	+50 - +20	-10 - -25	-25 - -50	< -50
Тектоногенные связанные с известняками рифтогенеза	Неполностью измененные эпигенетические доломиты	D1	As Mg	Zn Mn As HREE	Cu, V LREE MREE Zn	Na V Cu	Li Cr Sr Th Ca, Ba Cr	LREE Ti P Sr	Zr MREE HREE Si Al, K Al Sn Zr	
	Полностью измененные эпигенетические доломиты	D2	Si	K P Mn Zr Zn Ni Co	Mg Fe Al Th Sn Cr	Y Rb Pb Ag Li	Ba, Ca As	Na Ti U LREE HREE MREE SR		
	Джаспероидизированные доломиты	J1	Si Zn	P Mn Pb Co	Fe As Th MREE HREE Y V Sb Ag Cu Ni	K U LREE Cr Li	Ba	Na Ca Mg Ti Al Sr		
	Полностью измененные джаспероиды	J2	Si		As Th W Ta Sn Mo Nb Zr Rb Cr Be Cu Li	K V	Na Ba LREE Bi Sb Ni Co	Ti U HREE	Ca Mg Mn Zn	
	Свинцово-цинковые руды	Руды	Pb Zn	Ag	Ba Na Mn Fe U	P W Sr	Ti Al HREE MREE Y Cu	Th	K Ca As Ta Mo V Sb	Mg Si Sn Nb Zr Rb Cr Li
Нарудные кальцитизированные доломиты	D3			P Fe Li	K Mn Fe U Th HREE LREE MREE Nb Zr Y Sr Pb Ag Cu Ni	Na Si As W Ta Sn Mo Zr Rb Cr V Sb Zn Co	Ti	Ba Al		

Таблица 3. Баланс элементов апокарбонатно-кремнистых тектоногенных метасоматитов по карбонатным породам кетеменской и титаринской свит раннего кембрия

Примечание: Коэффициент привноса-выноса элементов ΔC приведен в процентах и рассчитывался по формуле: $\Delta C = C_i - C/C \times 100\%$, где C_i – содержание элемента в интенсивно/полностью измененной породе, C – содержание элемента в минимально измененной породе пелитоморфный известняк кетеменской свиты в сравниваемых выборках. Общее количество проб – 164.

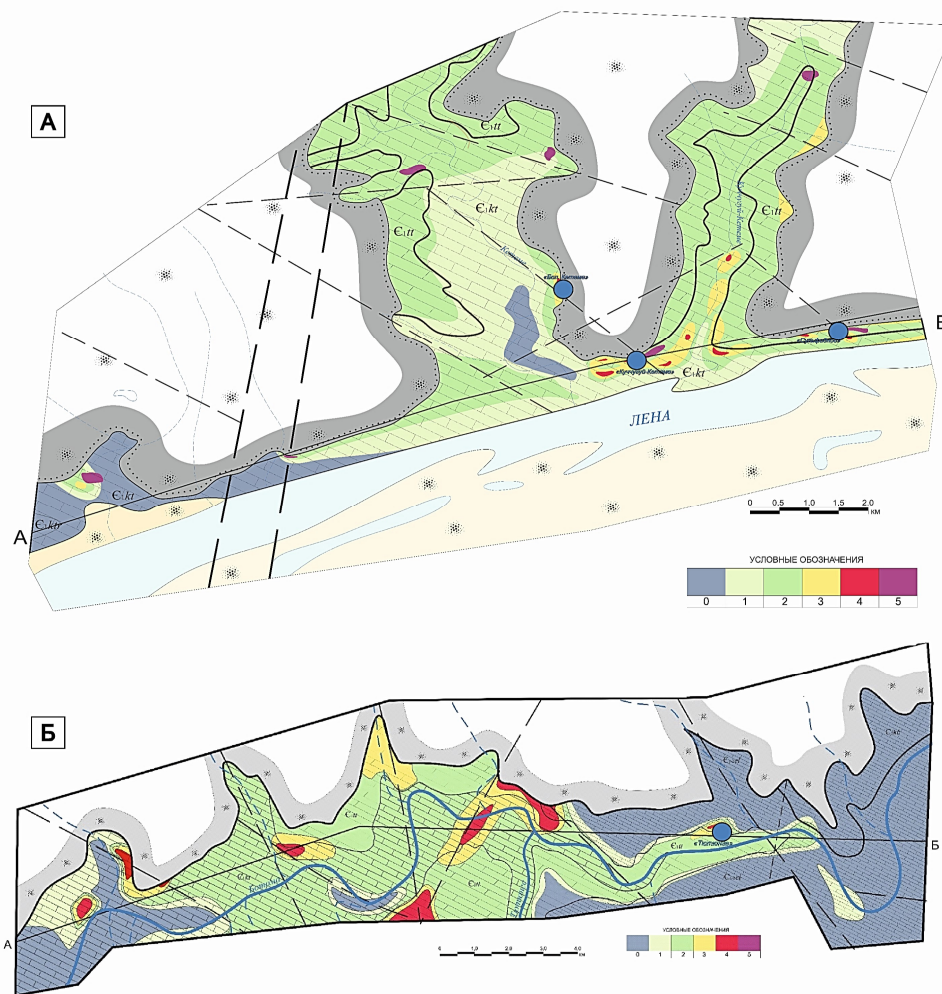


Рис 4. Карты распространения гидротермально-метасоматических образований по карбонатным отложениям в пределах участка Кетеменский левобережье р. Лена (А) и участка Ботомский (Б)

Условные обозначения: Цветовая схема отображает соответствующую зону Г-М колонки апокарбонатно-кремнистых метасоматитов (джаспероидов): 0 – неизменные породы, 1 – доломитизированные известняки; 2 – полностью измененные эпигенетические доломиты; 3 – джаспероидизированные доломиты; 4 – полностью измененные джаспероиды; 5 – кальцитизированные джаспероидизированные доломиты. На карте видно, что ореолы Г-М образований имеют стратифицированный облик, согласующийся с границами стратиграфических подразделений с локализацией ядерных зон колонки с зонах разрывных нарушений.

Уровень оруденения	Нижний уровень	Центральный уровень	Верхний уровень	Зона гипергенеза
Минеральные разновидности руд	Пиритовые, марказитовые	Сфалерит-марказит пиритовые, сфалерит-галенит-марказит-пиритовые, существенно сфалеритовые	пирит-марказит-галенитовые и существенно галенитовые с пиритом	Лимонит-гётитовые с галенитом и церусситом, реже пиролозит-пшиломелан-лимонитовые
Текстура	Вкрапленная, гнездовидно-вкрапленная, редко массивная	Вкрапленная, гнездовидно-вкрапленная, массивная, колчеданная	Прожилково-вкрапленная, вкрапленная, массивная, брекчиевая	Наследует текстуры первичных руд, колломорфная
Структура	Гранобластовая, аллотриоморфно-зернистая мелкозернистая	Гранобластовая, аллотриоморфно-зернистая Мелко-среднезернистая	Мелко-среднезернистая до крупнозернистой аллотриоморфно-зернистая	Тонко-мелкозернистая, реликтовая аллотриоморфно-зернистая
Рудные минеральные ассоциации	Пирит-марказит-сфалерит	Пирит-марказит-сфалерит-галенит	Галенит-сфалерит, пирит	Лимонит-гётит-церуссит-галенит
Нерудные минералы	Доломит, Мп-доломит, кварц, халцедон	Доломит, Fe-доломит, Мп-кальцит, сидерит, лимонит	Манганодоломит, доломит, Мп-доломит, сидерит, халцедон, кварц, лимонит	Редки, преимущественно халцедоновидный кварц
Акцессорные минералы		Кварц, халцедон, пиролозит, вернадит, кальцит	Пиролозит, вернадит, гётит, гидрогётит, смитсонит, пирит	Гематит, смешанно-слоистые смектиты
Среднее содержание (%)	Zn: 0.025-0.5% Pb; - 0.02%	Zn: 0.5-6.0% Pb; - 0.5-3.2%	Zn: 1.0-3.0% Pb; - 2.5-13.1%	Zn в среднем до 0.5%; Pb 0.5-4.2%
Элементы-примеси	Fe, Ag	Fe, Mn, Ag, Cu, Ba	Fe, Mn, Ag, Cu, Ba	Fe, Mn, Ba, Ag, Cu
Морфология рудных тел	Пласты, линзовидные зоны	Пласты, линзы, рудные ленты	Линзы, рудные ленты, реже рудные столбы	Наследуют морфологию первичных руд
Проявления и пункты минерализации	Куччугуй-Кетеме	Куччугуй-Кетеме, Сульфидное, Тотонге	Сульфидное	Тотонге, Сульфидное, Куччугуй-Кетеме

Таблица 4. Характеристика уровней оруденения в пределах изученной территории и их основные отличительные особенности

ПРИЗНАКИ	КЕТЕМЕНСКИЙ ТИП
Региональная тектоническая позиция	Внутренняя впадина кратона
Палеотектоническая позиция	Рифогенный карбонатный комплекс с сложной фациальной зональностью.
Рудоносная формация и субформация	Кремнисто-известково-доломитовая формация; известково-доломитовая субформация
Палеофациальная обстановка отложения рудовмещающих пород	Мелководно-морские условия с органогенными постройками, активная гидродинамика
Рудовмещающие отложения	Рифогенные массивные хемогенные известняки, эпигенетические доломиты
Возраст вмещающих пород	С ₁
Возраст формирования оруденения	D ₂ -С ₁
Плкативная тектоника	Крыло пологой складки II порядка (угол на крыльях 1-2°), малоамплитудные брахиантиклинальные складки III порядка
Дизъюнктивная тектоника	Не активная. Слабоамплитудные разломы и трещины СВ простирания 20-30° (в пределах проявления не более 1 м)
Магматические образования	Долериты, габбро-долериты D ₂ -С ₁ , эффузивы и туфы Э ₁
Рудоконтролирующие тектонические структуры	Зоны сочленения конседиментационных разломов северо-западного простирания и рифогенных разломов северо-восточного простирания
Количество рудоносных уровней	Два (три, включая пирит-марказитовый непродуктивный)
Морфология рудных тел	Нижний горизонт – пласты, зоны, линзы; Средний горизонт – рудные ленты, субпластовые залежи; Верхний уровень – рудные столбы, субпластовые лентовидные залежи.
Преобладающие текстуры руд	прожилково-вкрапленная, гнездовидная, массивная до колчеданной, брекчиевидная
Гидротермально-метасоматические процессы	Вторичная доломитизация, джаспериодизация, кальцитизация
Основные сульфидные минералы	Пирит, марказит, галенит, сфалерит
Второстепенные сульфидные минералы	Халькопирит, арсенопирит (ед.)
Вторичные минералы	Гётит, гидрогётит, гидрогематит, лимонит, вернадит, пиролозит, церуссит
Нерудные минералы	Кальцит, доломит, кварц, монтмориллонит, гидрослюда, гипс
Преобладающий тип руд	Сфалерит-галенит-марказит-пиритовый
Элементы примеси	Ag, Mn, Fe, Co
Зональность оруденения	Рост Pb, Zn, Mn к центру, преобладание Zn над Pb в внешней зоне, рост Pb вверх по рудному разрезу.
Вторичные преобразования руд	Интенсивный гипергенез
Изотопный состав свинца сульфидов	Близок к составу вмещающих пород
Изотопный состав серы сульфидов	От 7.4 до 12.0 ‰
Парагенетические магматические образования	Раннекембрийские гиаобазальты и вулканогенно-осадочные породы.
Генезис месторождения	Гидротермально-метасоматический.
Источник рудного вещества	Вмещающие и подстилающие породы.
Механизм транспортировки и способ мобилизации вещества	Мобилизация металлов агрессивными катагенетическими, в том числе, нефтидными флюидами в хлоридной и комплексной форме. Осаждение рудных элементов на геохимических и гидродинамических барьерах.

Таблица 5. Сравнительная характеристика основных элементов прогнозно-поисковой модели свинцово-цинкового оруденения «кетеманского типа» и известных геолого-генетических типов
По набору элементов модели, оруденение в наибольшей степени соответствует миссисипскому геолого-промышленному типу, однако имеет свой ряд локальных геохимических и минералого-геохимических особенностей.

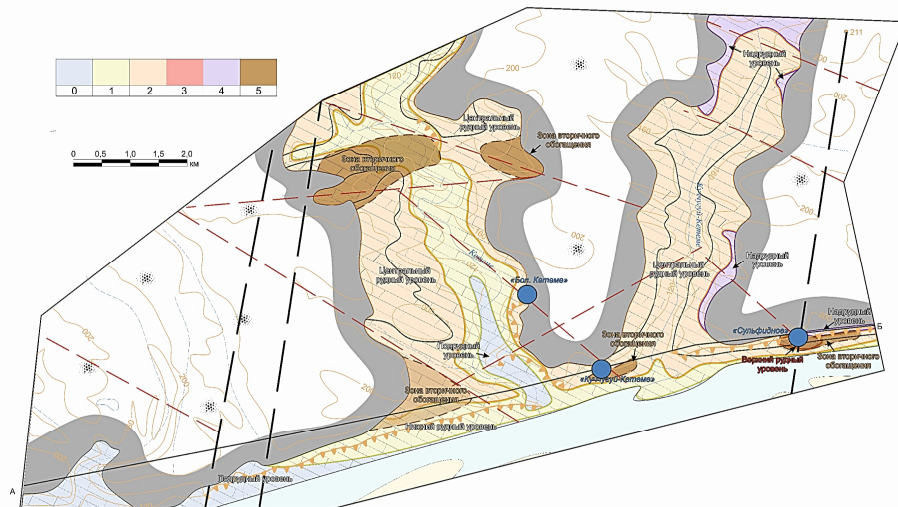


Рис. 5. Фрагмент карты отображающей распределение различных уровней Pb-Zn оруденения в пределах участка «Кетеманский» с условными обозначениями
Примечание: Цветом обозначены различные уровни оруденения. 0 – «подрудный уровень»; 1 – нижний рудный уровень; 2 – центральный рудный уровень; 3 – верхний рудный уровень; 4 – надрудные отложения; 5 – зона вторичного обогащения (гипергенеза).

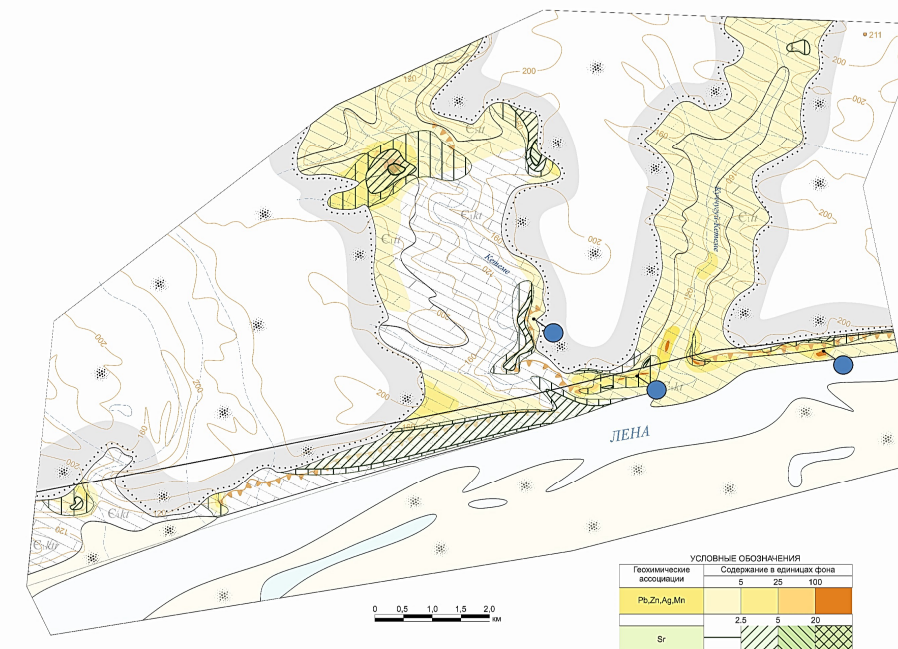
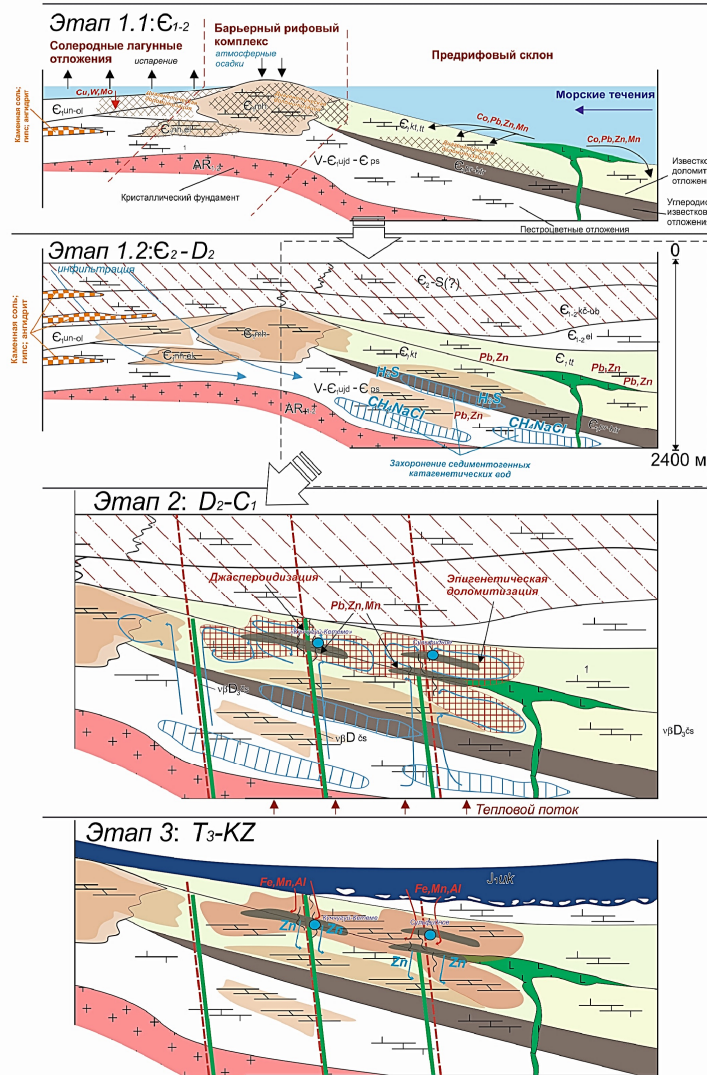
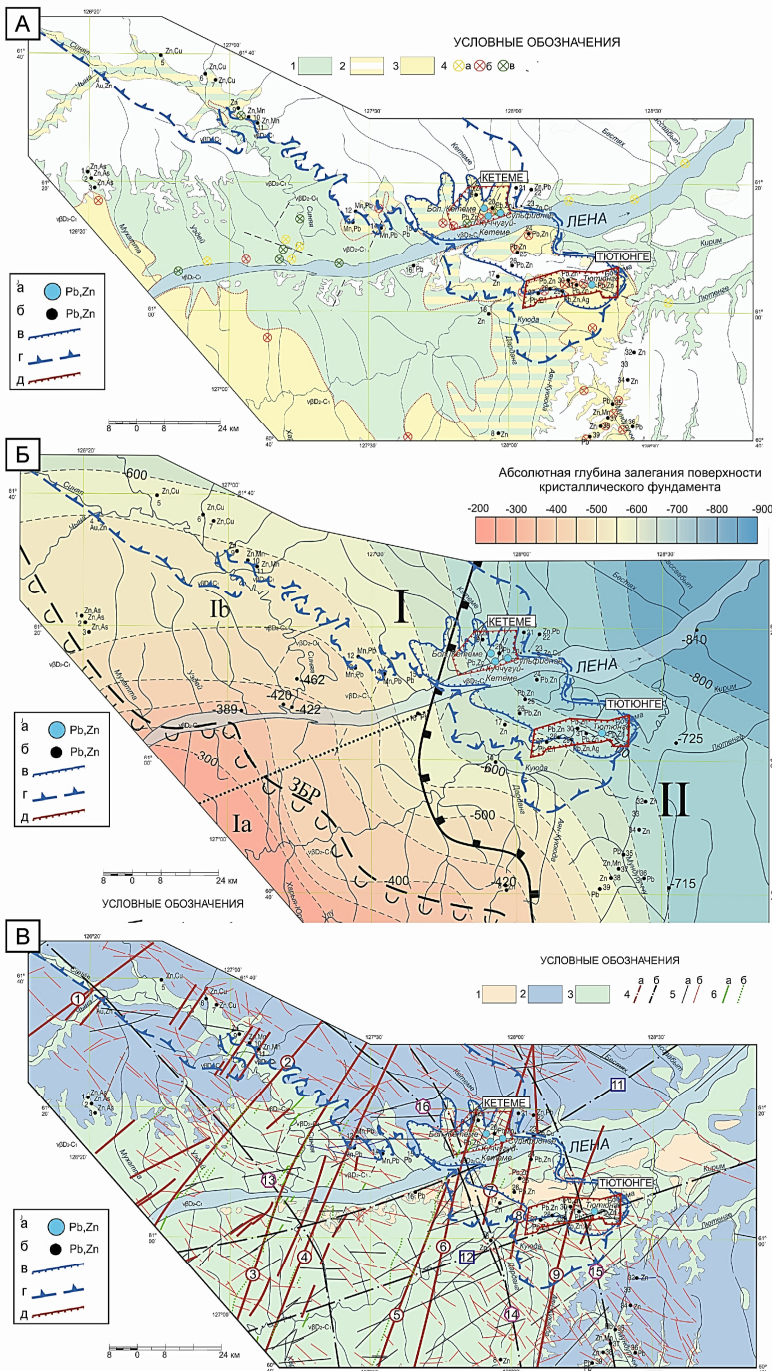


Рис. 6. Карта аномального геохимического поля в пределах участка Кетеманский (совмещение мультипликативных аномалий Pb-Zn-Ag-Mn и Sr) с условными обозначениями
Примечание: Цветом обозначается степень обогащения относительно фоновое содержание элементов (см. условные обозначения).



ЭТАП 1.1 Формирование раннекембрийской рифогенной структуры на восточном склоне Алдано-Ленского поднятия. Дифференциация обстановок осадконакопления на солеродные лагуны на западе, рифовые и рифогенные в центральной части и открыто-морские на востоке. Кратковременный этап подводного вулканизма основного состава и экзальзионной деятельности в условиях континентального рифтогенеза. Сингенетическое накопление Pb,Zn,Mn в рассеянном виде в тонкодисперсных карбонатных осадках (кетемская и титаринская свиты).

ЭТАП 1.2 Захоронение седиментогенных рассольных катагенетических вод в пределах осадочного бассейна, содержащих H₂S, CH₄ и NaCl и CO₂ частично обогащенных Pb,Zn. Мезокатагенетические преобразования углеродсодержащих и углеродистых сланцев синской и кургоиновой свит. Нагрев седиментогенных вод до температур 110-127,5 градусов в условиях повышенного температурного градиента (до 5°C/100 км).

ЭТАП 2 Континентальный рифтогенез, формирование протяженных зон разрывных нарушений и внедрение дак долеритов чаро-синского комплекса. Трансформация седиментогенных вод в гидротермальные растворы. Формирование площадных ореолов эпигенетической доломитизации в слабоокислительных условиях, локальных зон джасперидизации и в умеренно-кислых условиях, рудной сульфидной минерализации, зоны березитизации по долеритам.

ЭТАП 3 Эволюция ранне-среднекембрийских карбонатных отложений с формированием площадной апокарбонитной коры выветривания. Отложение терригенных пород укугутской свиты. Обогащение карбонатных пород Al,Si,Fe,Mn в результате гидрогенно-инфильтрационной деятельности. Частичный вынос Zn с разложением сульфидов и Fe-содержащих карбонатов, перетолжения Zn на глубюкие, не вскрытые горизонты

Рис. 8. Геолого-генетическая модель формирования свинцово-цинкового оруденения MVT-типа в раннекембрийских карбонатных отложениях кетемской и титаринской свит Синско-Ботомской СФЗ

Рис. 7. (слева). Графическое отображение Гидротермально-метасоматического (А), глубинного строения и палеогеографического (Б) и тектонического критериев (В) прогноза стратиформного Pb-Zn оруденения MVT-типа в пределах юго-восточной части Анабаро-Синской СФЗ
Условные обозначения: А: Зоны неполнопроправленной (1) и полнопроправленной (2) эпигенетической доломитизации; 4 – точечные находки полнопроправленной эпигенетической доломитизации; 4 – точечные находки полнопроправленной эпигенетической доломитизации; 4 – точечные зоны березитизации; Б: 1 – внешняя граница распространения рифовых фация Западно-Якутского барьерного рифа (современное положение) 2 – границы структур III-го порядка; 3 – границы структур II-го порядка; В: I – Алдано-Ленское поднятие; II – Амгинский прогиб и Суолинская котловина; Ia – Усть-Синский выступ. В: 1 – кайнозойский комплекс; 2 – мезозойский комплекс; 3 – венд-палеозойский комплекс. 4 – разрывные нарушения главные; а – Чаро-Синской зоны; б – прочие: 5 – разрывы и трещины низшего порядка. б – консолидационное заложения, б – прочие. б – дайки долеритов чаро-синского комплекса; а – в коренном залегании, б – установленные геофизическими методами. 7 – рудопроизведения Pb,Zn минерализации; 8 – пункты минерализации. Цифрами обозначены: 1-9 – разломы Чаро-Синской зоны (D₂-C₁); 10-12 – Ботомо-Амгинская зона разломов (AR-PR); 13-16 Улун-Кубалахская и Кеджигейская зоны разломов (AR-PR). **Общие условные обозначения:** а – рудопроизведения Pb,Zn; б – пункты минерализации Pb,Zn; в – контуры Синско-Ботомской потенциальной минерогенетической зоны; г – контуры Кетемской потенциальной рудного узла; д – контуры участков детализации и их наименования

Подписано в печать 02.03.2023 г.

Формат бумаги 60x90/16

Тираж 99 экз.

Полиграфическая база ФГБУ «ЦНИГРИ»

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