

Г. А. КОЗЛОВ, С. В. КАШИН, В. Е. ГУЗЕВ,
А. В. МОЛЧАНОВ, А. В. ТЕРЕХОВ (ВСЕГЕИ)

Минералого-геохимические особенности и рудоносность апокарбонатно-кремнистых гидротермально-метасоматических образований в раннекембрийских отложениях Синско-Ботомской структурно-формационной зоны, Республика Саха (Якутия)

Обсуждаются новые данные о петрографии и геохимии гидротермально-метасоматических образований в раннекембрийских отложениях юго-восточной части Синско-Ботомской структурно-формационной зоны и их связи со стратиформным свинцово-цинковым оруденением в карбонатных толщах. На изучаемой территории эти образования впервые рассмотрены в качестве гидротермально-метасоматической системы и отнесены к тектоногенной апокарбонатно-кремнистой гидротермально-метасоматической формации. Обуславливается их генетическая связь с позднедевонско-раннекаменноугольным этапом континентального рифтогенеза в пределах восточной части Сибирской платформы, моделируется состав и тип породогенерирующего флюида. Продемонстрировано, что ореолы апокарбонатно-кремнистых метасоматитов в совокупности с мультипликативными аномалиями Pb, Zn, Mn, Ag и Sr в коренных породах могут быть использованы в качестве одного из критериев прогнозирования стратиформного Pb-Zn оруденения в карбонатных толщах раннепалеозойского карбонатного чехла Сибирской платформы.

Ключевые слова: карбонатные отложения, геохимические особенности, гидротермально-метасоматические породы, апокарбонатно-кремнистая гидротермально-метасоматическая формация, доломитизация, месторождения миссисипского типа.

G. A. KOZLOV, S. V. KASHIN, V. E. GUZEV,
A. V. MOLCHANOV, A. V. TEREKHOV (VSEGEI)

Mineralogical and geochemical features and ore potential of apocarbonate-siliceous hydrothermally altered rocks in the Early Cambrian deposits of the Sinsk-Botomian Formation, Republic of Sakha (Yakutia)

The article describes new data on petrography and geochemistry of hydrothermally altered rocks in Early Cambrian deposits of the southeastern part of the Sinsk-Botomian Formation and their relationship with MVT-type lead-zinc mineralization. In this area, the mineralization was first identified as a hydrothermal metasomatic system and referred to the tectonogenic carbonate-siliceous hydrothermal formation. Their genetic relationship with the Late Devonian – Early Carboniferous of continental rifting in the eastern Siberian Platform is determined. The composition and type of the rock-generating fluid is simulated. It is shown that halos of carbonate-siliceous hydrothermal mineralization, combined with multiplicative Pb, Zn, Mn, Ag and Sr anomalies in the bedrock can be used as one of the criteria for predicting the MVT-type mineralization in the Early Paleozoic carbonate cover of the Siberian platform.

Keywords: carbonate sediments, geochemical features, hydrothermally altered rock, carbonate-siliceous metasomatism, dolomitization, Mississippi-type deposits.

Для цитирования: 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. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_88_65-83

Введение. При изучении рифогенных раннекембрийских карбонатных отложений Западно-Якутского барьерного рифового комплекса авторы установили, что значительная часть полей развития доломитов, закартированных предшественниками в составе стратиграфических под-

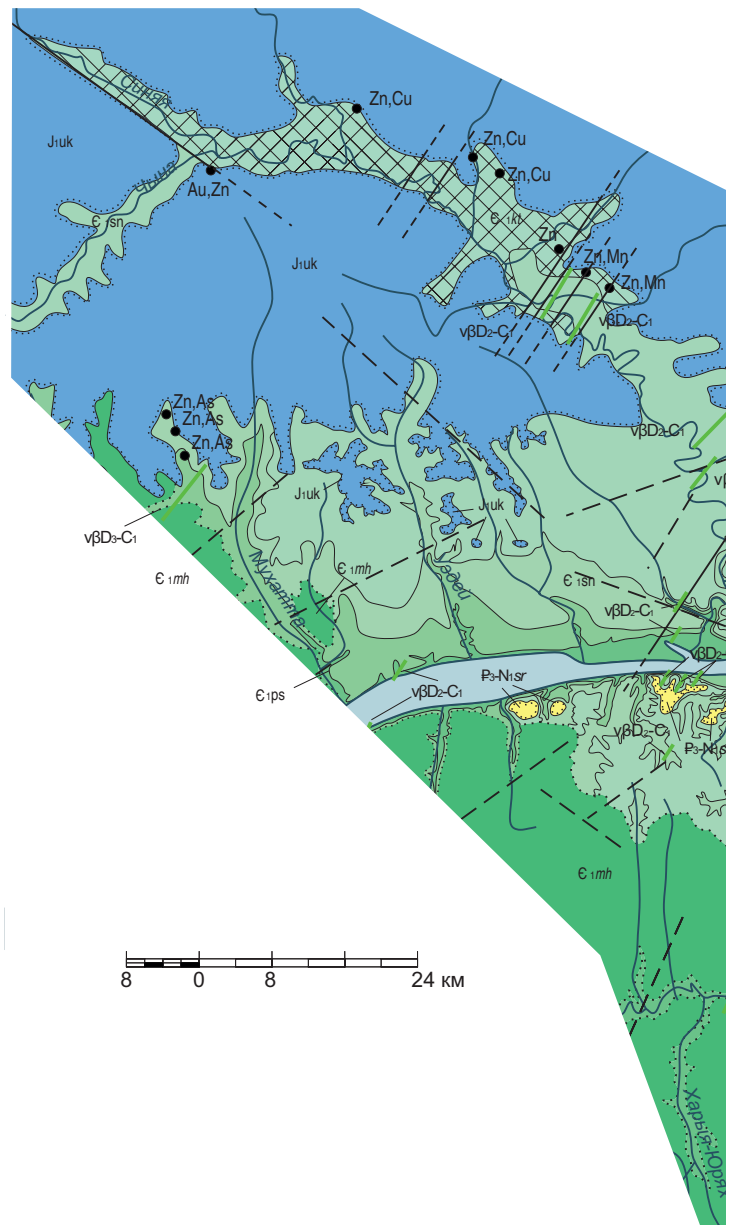
разделений, имеет эпигенетическую природу и пространственную связь с зонами джаспероидизации. Такая ассоциация пород позволила предположить их сингенетичность и рассмотреть в качестве единой гидротермально-метасоматической формации (ГМФ) с характерной

зональностью, отражающей направленность гидротермально-метасоматического (ГМ) процесса. В соответствии с принятой классификацией, разработанной сотрудниками ВСЕГЕИ [4; 22], метасоматиты отнесены к *тектоногенной апокарбонатно-кремнистой ГМФ*.

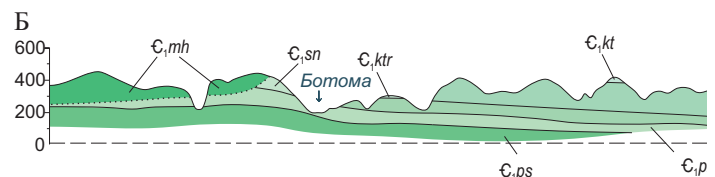
Ранее авторами установлена геохимическая специализация вмещающих данные ГМ-образования раннекембрийских отложений на свинцово-цинковое оруденение стратиформного типа в карбонатных породах (Mississippi Valley Type – MVT-тип) [19; 29]. Связь оруденения с низкотемпературными апокарбонатными метасоматитами является одной из главных особенностей геолого-генетической и прогнозно-поисковой моделей изучаемого типа оруденения [2; 9; 10; 18; 27; 28; 30; 32; 37]. Таким образом, выявление типоморфных петрографических и геохимических характеристик состава ГМ-пород позволит использовать их в качестве основы прогноза стратиформного оруденения в пределах рассматриваемой территории.

Материалы и методы. В настоящей статье применяется комплексный подход к минералогическому петрографическому исследованию постседиментационных ГМ-образований во всей полноте их проявления, что обеспечивает полноту исследования гидротермального и полигенного оруденения в объеме изучаемой территории. В качестве методической основы исследования использованы положения методики петрографо-геохимического изучения и картирования полей слабопроявленных ГМ-изменений пород, разработанной во ВСЕГЕИ Е. В. Плющевым и соавторами [4; 24–26]. Эта методика широко применяется с целью прогнозирования гидротермального оруденения, однако она практически не использовалась применительно к стратиформному свинцово-цинковому оруденению в карбонатных породах [26]. Одной из главных задач настоящей работы является демонстрация на примере Синско-Ботомской структурно-формационной зоны (СФЗ) особенностей применения и целесообразности использования этой методики при прогнозировании стратиформного свинцово-цинкового оруденения в карбонатных толщах.

Исследование включало полевые работы, в рамках которых проводились геологические маршруты масштаба 1:200 000 и 1:50 000 в пределах левобережья р. Лена и на водоразделе рек Амга и Лена с целью уточнения геологического строения территории и изучения вещественного состава потенциально рудоносных ГМ-образований. Детальные геологосъемочные маршруты осуществлялись на участках интенсивного проявления гидротермально-метасоматических рудоформирующих процессов (рис. 1). По результатам работ составлялись карты распространения ГМ-образований, а также карты аномального геохимического поля с выявлением закономерных ассоциаций химических элементов.



Разрез по линии А–Б



Для оценки направленности процесса метасоматоза проведен расчет баланса вещества в пределах зон метасоматических колонок гидротермально измененных пород с использованием атомно-объемного метода [11].

Микроскопическое изучение пород производилось на оптическом микроскопе Leica DM2700P, а состав тонкодисперсных карбонатных минералов – методом рентгеноструктурного фазового анализа на базе электронного микроскопа-микроанализатора модели MV 2300 с энергодисперсионным микроанализатором

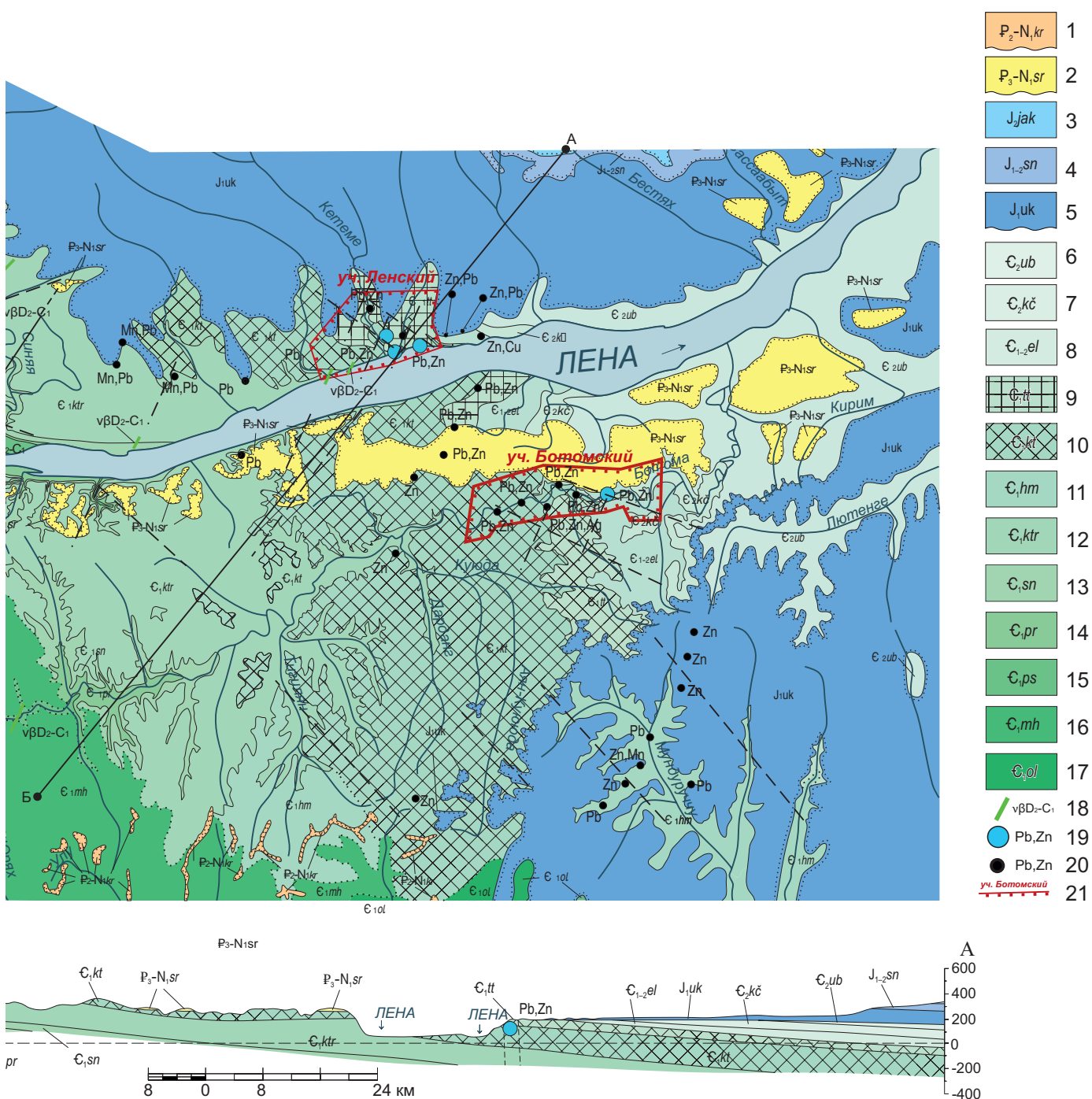


Рис. 1. Карта геологического строения северо-восточной части Приленской минерагенической области (на основе данных О. И. Шербакова и др., [5; 6], В. А. Камалетдинова (1985), С. Д. Костюка (1992), с авт. доп.)

Кайнозойские отложения: 1 – кырбыканская и 2 – сырсарская толщи; 3–5 – ранне-среднеюрские терригенные отложения: толщи якутская (3), сунтарская (4) и укугутская (5); среднекембрийские отложения: 6 – усть-ботомская и 7 – кычкская свиты; ранне-среднекембрийские отложения: 8 – еланская свита; раннекембрийские отложения: свиты 9–15 – титаринская (9), кетемская (10), хомустахская (11), курторгиновая (12), синская (13), переходная (14), пестроцветная (15); 16 – мухаттинская толща; 17 – олёкминская свита; 18 – дифференцированные дайки долеритов – монцо-габбро-долеритов чаро-синского комплекса; 19, 20 – рудопроявления (19) и пункты минерализации (20) полезных ископаемых и их индексы; 21 – контуры участков детализации и их наименования

LINK Pentafet (Oxford Instx). Химический состав пород определялся в ЦЛ ВСЕГЕИ рентгено-спектральным флуоресцентным (силикатным) методом (XRF), микроэлементы и редкоземельные элементы – методом ICP-MS. Определение изотопного состава свинца и серы в сульфидах и породах – на масс-спектрометре DELTA Plus в ЦИИ ВСЕГЕИ.

Геологическое строение территории. В геологическом строении территории принимают участие ранне-среднекембрийские карбонатные отложения, относимые к Анабаро-Синской структурно-формационной области [1; 5; 6; 12; 13; 31; 34]. Она объединяет площадь распространения сложнодифференцированных рифогенных карбонатных отложений так называемого разреза переходного типа. Изученные отложения относятся к фации внешнего предрифового склона и объединяются в Синско-Ботомскую структурно-формационную зону (СФЗ). Породы характеризуются моноклинальным залеганием с пологим падением к северо-востоку, где погружаются под чехол юрских терригенных и прибрежно-морских отложений.

В Синско-Ботомской СФЗ наблюдается выдержанный стратифицированный разрез (рис. 1), представленный существенно глинистыми известняками и мергелями, оолитовыми и комковатыми известняками и доломитами *пестроцветной* и *переходной свит*, в различной степени битуминозными известняками, углеродистыми сланцами *синской* и *куторгиновой свит*, доломитами и известняками *кетеменской* и *титаринской свит* раннекембрийского возраста, известняками, в том числе органогенно-обломочными, *еланской* и *кычикской свит* ранне- и среднекембрийского возраста, переслаиванием глинистых известняков и мергелей *усть-ботомской свиты* среднекембрийского возраста. Предполагается, что карбонатное осадконакопление в пределах эпиконтинентального палеобассейна Юго-Восточной Сибири происходило в течение раннего палеозоя до силура включительно, но данные отложения были денудированы в доюрское время. По карбонатным отложениям развита каолин-монтмориллонитовая кора выветривания, ее мощность максимально достигает 15–20 м. Для карбонатного комплекса характерно пологое, субгоризонтальное залегание пород с падением к северо-востоку. Мощность кембрийского разреза варьируется от 300 до 600 м.

Юрские отложения локально распространены на северной и восточной границах участка исследования и представлены песчано-гравийными и песчано-глинистыми отложениями укугутской свиты с базальным горизонтом в основании, в том числе содержащим прослой бурожелезняковых гидрогенно-инфильтрационных железомарганцевых руд. Мощность юрских отложений в пределах участка не превышает 100 м. Также на левобережье рек Лена и Ботома развиты олигоцен-миоценовые аллювиально-озерные

отложения сырсарской и аллогенные коры выветривания кырбыканской толщ, локализованные в карстовых полостях известняков. Мощность данных образований не превышает 40 м.

В пределах территории широко распространены вещественные проявления палеозойской тектоно-магматической активизации в виде протяженных зон разрывных нарушений северо-восточного простирания, объединяемых в *Чаро-Синскую* тектоническую зону [3; 21; 22; 34]. Ее формирование связано с раскрытием на рубеже девона – карбона Палеовиллюйской грабен-рифтовой системы. Разрывные нарушения формируют кулисообразные зоны разломов и разрывов раздвигового характера без существенного смещения блоков, зачастую залеченных интрузивами гипабиссального дифференцированного чаросинского долерит-граносиенитового комплекса. Также залегание кембрийских отложений осложнено незначительными разрывами конседиментационного характера, ориентированными согласно простиранию пород. Проявления полиметаллической минерализации локализованы в полях развития отложений кетеменской и титаринской свит. На сегодняшний день известно четыре рудопроявления и более 40 пунктов свинцово-цинковой минерализации с повышенными концентрациями Ag, Mn, Fe и Au на левобережье р. Лена и в нижнем течении р. Ботома.

Петрографические особенности вещественных проявлений апокарбонатно-кремнистой ГМФ. Особенности литологического состава раннекембрийских карбонатных пород территории посвящено значительное количество работ [1; 12; 13; 31], однако в качестве ГМ-образований площадные ореолы эпигенетической доломитизации рассмотрены нами впервые. Результаты полевых исследований позволили установить широкое распространение вещественных проявлений ГМ-деятельности. Выделенные петротипические разновидности пород отражают концентрическую зональность ГМ-системы апокарбонатно-кремнистых метасоматитов и направленность метасоматического процесса. Типовая метасоматическая колонка апокарбонатно-кремнистой ГМФ по пелитоморфным известнякам кетеменской свиты выглядит следующим образом (табл. 1):

1. **Внешняя зона** включает ореолы площадной эпигенетической доломитизации, выделяющиеся по резкому замещению пелитоморфных известняков яснозернистыми сахаровидными доломитами. От вмещающих преимущественно серых и светло-серых до известняков они отличаются буро-желтой, желтой или белой окрасками, обусловленными степенью их насыщения железом и марганцем, а также резко повышающейся пористостью. Стоит отметить, что на коренных выходах породы интенсивно пигментируются гидроокислами железа, поступающими из вышележащих кор выветривания и четвертичных глинистых пород. Этой зоне соответствуют *доломитизированные известняки* и *массивные*

Минеральный состав и генетическая типизация гидротермально-метасоматических апокарбонатно-кремнистых образований в пределах изученной площади

Генетический тип, формация	Гидротермально-метасоматическая ассоциация	Индекс зоны	Минеральные ассоциации	Породы
ТЕКТОНОГЕННЫЙ Апокарбонатно-кремнистых метасоматитов, связанный с процессами континентального рифтогенеза	Неизмененные породы	0	Cal ± C	Пелитоморфный известняк
	Неполнопроявленные доломитизированные известняки	D1	Cal + Dol ± C	Доломитизированный пелитоморфный известняк
	Полнопроявленные эпигенетические доломиты	D2	Dol + (Kut-Sd) ± Gp ± Cal ± ± (Gn, Sp, Py)	Эпигенетический неравномерно-зернистый доломит
	Джаспероидизированные эпигенетические доломиты	J1	Dol + (Kut-Sd) + C + Qtz ± Py ± (Gn, Sp)	Джаспероидизированный эпигенетический доломит
	Полнопроявленные джаспероиды	J2	Qtz + C ± Dol ± ± (Kut-Sd) ± (Gn, Sp) ± Cal	Полнопроявленный джаспероид

Примечание: Cal – кальцит; C – халцедон; dol – доломит; Sd – сидерит; Kut – кутнагорит; Qtz – кварц; Py – пирит; Gn – галенит; Sp – сфалерит; Gp – гипс. В пределах минеральных ассоциаций минералы приведены в порядке убывания распространенности.

сахаровидные доломиты, а также локально развитые кальцитизированные доломиты.

Доломитизированные известняки (D1) широко распространены в периферийных частях полей эпигенетической доломитизации (рис. 2). Они представляют собой пелитоморфные аллотриоморфно-зернистые, реже комковатые водорослевые известняки с локальными субпластовыми и субвертикальными зонами замещения кальцита

мелко-среднезернистыми гипидиоморфно-зернистыми кристаллами доломита размерами от 0,05 до 0,2 мм. Мощность этих зон варьируется от 0,5 до 5 мм, иногда до первых десятков сантиметров. Для комковатых известняков, локально распространенных в пределах разреза, характерно избирательное замещение цементирующей оолиты и онколиты пелитоморфной массы. Отметим, что на полях развития мухаттинской тощи

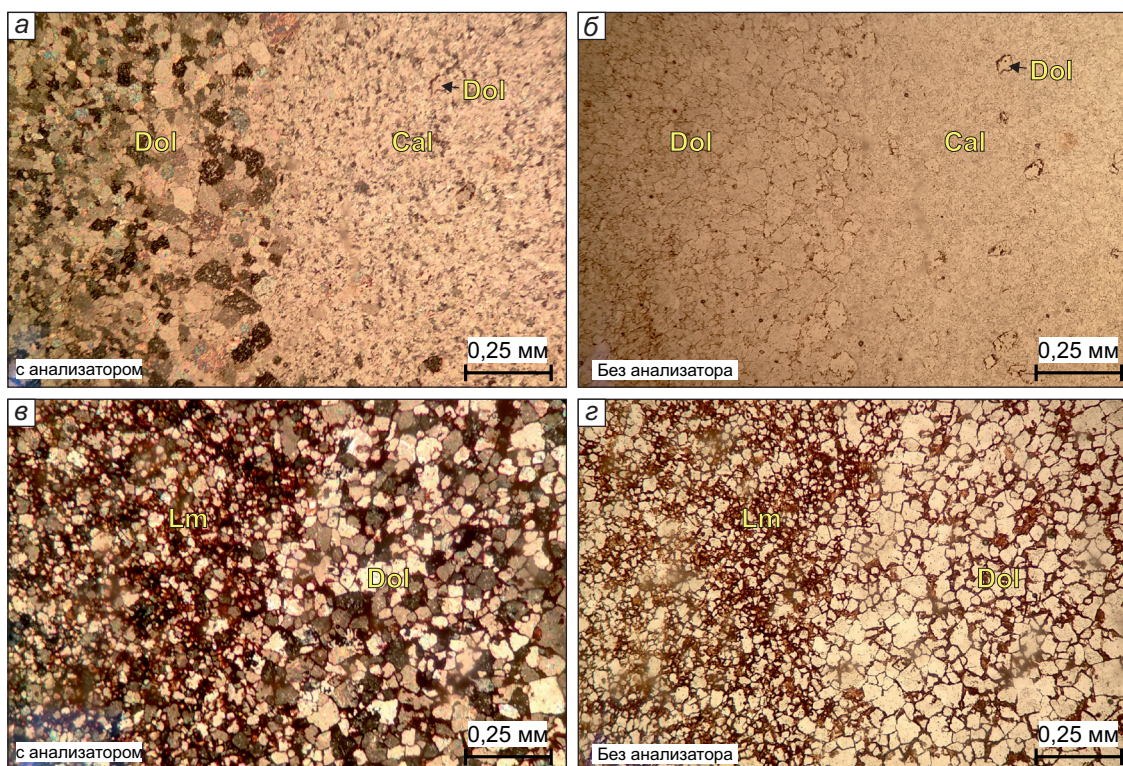


Рис. 2. Микрофотографии шлифов гидротермально-метасоматических образований внешней зоны ГМ-колонки: а, б – левобережье р. Лена (D1); в, з – нижнее течение р. Ботомы (D2)

а, б – доломитизированные пелитоморфные известняки кетеменской свиты; в, з – лимонитизированные эпигенетические гипидиоморфно-зернистые доломиты.

Dol – доломит, Cal – кальцит, Lm – лимонит

и олёкминской свиты за пределами изучаемой территории нами наблюдалось полное замещение вторичным доломитом не только цемента, но и водорослевых оолитов и онколитов (рис. 3).

Мелко-среднезернистые эпигенетические доломиты (D2) – широко распространенная в пределах разреза группа вторичных карбонатных пород. В петрографическом отношении они представлены массивной или тонкослоистой массой гипидиоморфно-зернистых кристаллов доломита ромбического облика размерами от 0,1 до 0,5 мм, формирующих мозаичную структуру породы (рис. 2). Текстуры их преимущественно массивные, а в пределах кетеменской свиты – часто янослоистые с выраженным размером зерен. Кристаллы конформно-зернистые, зональные. Зачастую грани кристаллов, в особенности мелкозернистых, интенсивно корродированы с образованием сплошного сетчатого цемента из бурого железистого вещества, замещающего грани зерен. Каверны занимают от 10 до 25 % объема породы и выполнены преимущественно крустификационными зернами минералов группы доломита-кутнагорита-сидерита с повышенной железистостью и марганцевистостью (рис. 3).

Кальцитизированные эпигенетические доломиты (D3) на изучаемой территории распространены локально, формируя маломощные субвертикаль-

ные зоны в пределах полей трещиноватости и разрывных нарушений в верхних частях кембрийского плато. Они, как правило, ассоциированы с площадями развития эпигенетических доломитов и представляют собой жильные тела мелко-крупнозернистого кальцита, зачастую с друзово-шестоватым внутренним строением. Размеры кристаллов – от 0,5 мм до 5,0 см. В целом вторичная жильная, вкрапленная и прожилковая кальцитизация широко распространена в породах и также фиксируется в пределах центральной и ядерной зон метасоматической колонки (рис. 4). Общая мощность зоны эпигенетической доломитизации составляет первые десятки километров.

2. Центральная зона колонки фиксируется интенсивным проявлением процесса джаспероидизации в эпигенетических доломитах. Гидротермальные изменения выражаются в видимой инкрустации порового пространства доломитов халцедоном и халцедоновидным кварцем в пределах субпластовых зон протяженностью в первые десятки метров. Зона сложена *кварц-карбонатными метасоматитами (джаспероидизированными доломитами)*.

Кварц-карбонатные метасоматиты (J1) формируют узкие, преимущественно субвертикальные линейные зоны, приуроченные к разрывным

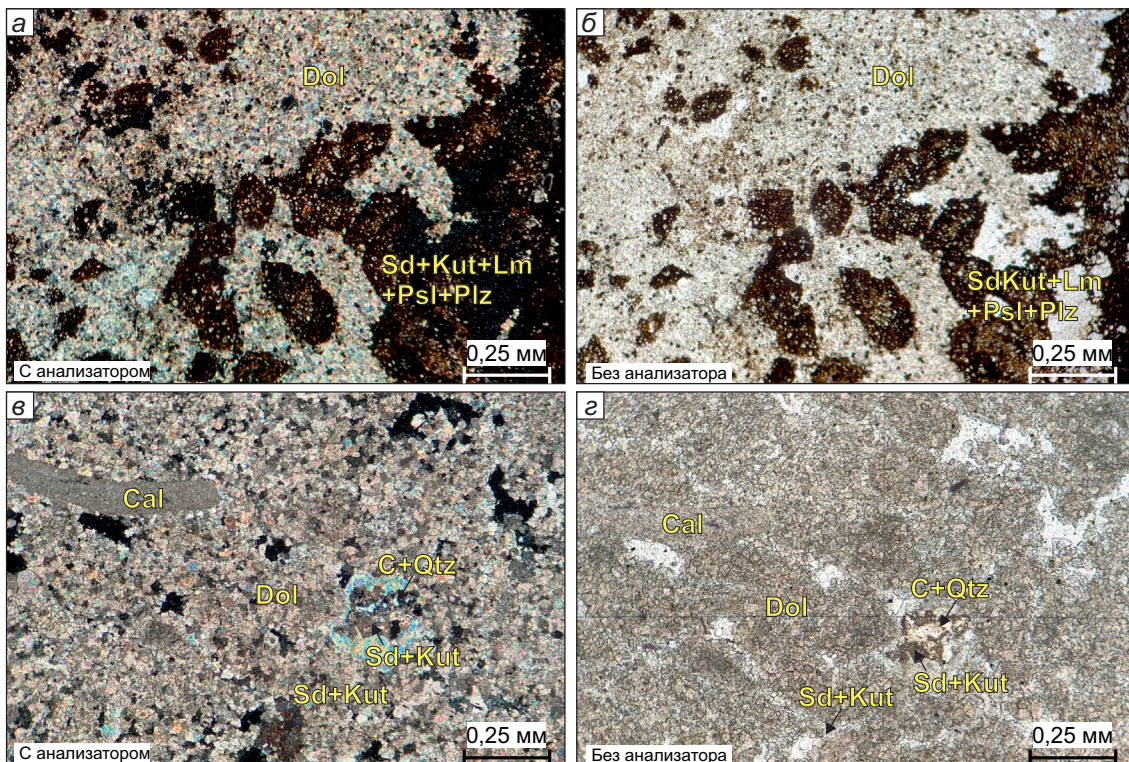


Рис. 3. Микрофотографии шлифов гидротермально-метасоматических образований внешней зоны ГМ-колонки: а, б – район р. Куччугуй-Кетеми (D2); в, г – левобережье р. Лена

а, б – эпигенетические гипидиоморфно-зернистые доломиты, развитые по органогенно-обломочным породам титаринской свиты; в, г – эпигенетические гипидиоморфно-зернистые доломиты со среднезернистыми кристаллами минералов группы доломита-сидерита-пирролизита (D2).

С – халцедон, Qtz – кварц, Sd – минералы группы сидерита, Kut – минералы группы доломита-кутнагорит, Psl – псидомелан, Plz – пирролизит.

Ост. усл. обозн. см. на рис. 2

нарушениям. В петрографическом отношении они представлены сплошными зонально-построенными агрегатами перекристаллизованного доломита, аналогичными вышеописанным полнопроявленным эпигенетическим доломитам, включающим прожилковую и вкрапленную кремнистую минерализацию. Кварц – халцедоновидный, различной степени раскристаллизованности, представлен неравномерно-зернистыми агрегатами неправильной или сфероидальной форм с размерами от 0,1–0,25 до 0,5–1,2 мм. Как правило, приурочен к межзерновому пространству доломита в ассоциации с вкрапленной и прожилково-гнездовой сульфидной минерализацией. Характерно сочетание халцедоновидного и полнокристаллического кварца. Содержание данных минералов в породе не превышает 5–15 % от ее объема.

3. Ядерная зона метасоматической колонки тесно ассоциирована с рудными образованиями, ее минеральный состав зависит от обогащения рудовмещающих пород минералами свинца и цинка. Нами зафиксированы участки полнопроявленной джаспероидизации в виде халцедона с кварцем и окисленными сульфидами вдоль зон разрывных нарушений. Такие породы хорошо идентифицируются на фоне массивных доломитов, однако зачастую приурочены к структурному делювию, а зоны разрывных нарушений геоморфологически выражены овра-

гами. К изучаемой зоне относятся следующие петротипические разновидности пород:

Существенно кварц-халцедоновые с карбонатом метасоматиты (джаспероиды) (J2) наблюдались в ассоциации с краевыми участками рудных тел стратиформной свинцово-цинковой минерализации. Как правило, они слагают маломощные протяженные зоны в пределах разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного простираний, зоны дробления и брекчирования пород, а также субсогласные с напластованием минерализованные зоны. На основании структурных и текстурных особенностей пород выявлены две их разновидности.

В первом случае породы интенсивно кавернозные, с преобладанием крустификационных, массивных зерен. Они представлены сплошной массой мелкозернистых агрегатов (0,1–0,3 мм) преимущественно хорошо раскристаллизованного халцедоновидного кварца с редкими идиоморфными кристаллами доломита размером 0,1–0,2 мм. Облик кристаллов таблитчатый, угловатый. В кавернах наблюдается более крупнозернистый кварц в виде крустификационных и друзовых агрегатов.

Во втором случае для джаспероидов характерна сфероидальная текстура. Основная масса таких образований сложена сферолитовыми агрегатами халцедоновидного кварца, загрязненного

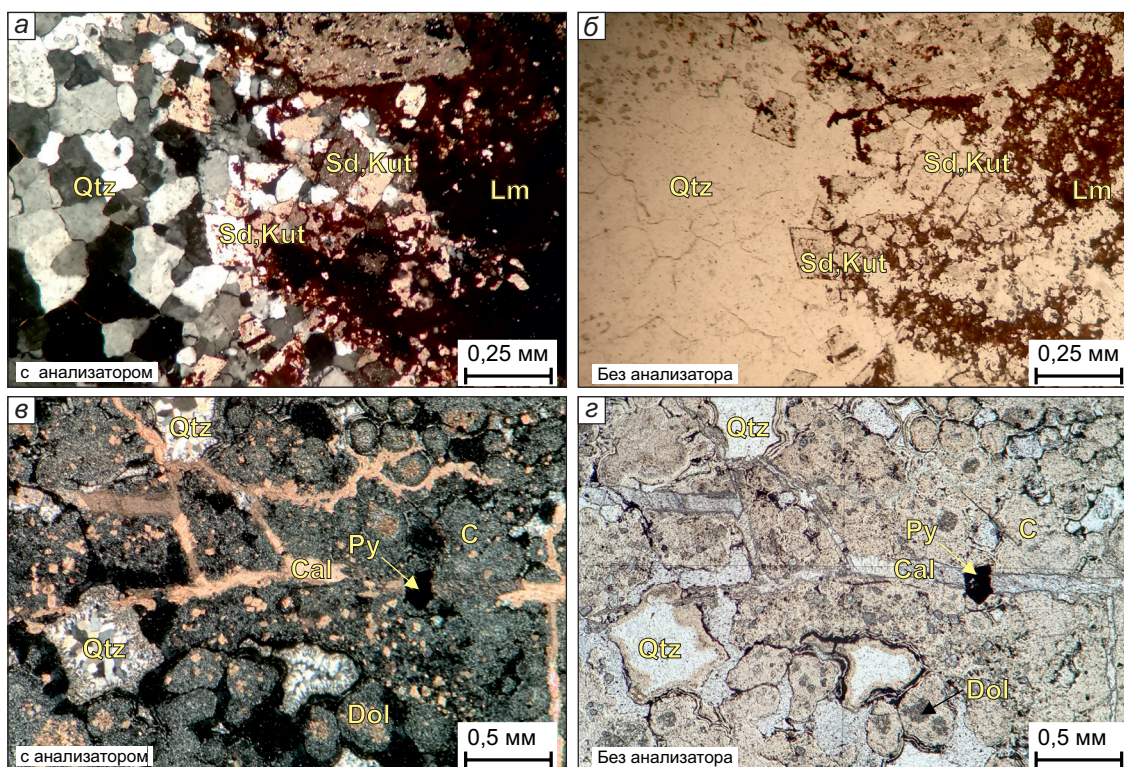


Рис. 4. Микрофотографии шлифов гидротермально-метасоматических образований внешней зоны ГМ-колонки: *a, б* – нижнее течение р. Ботома (J1); *в, г* – водораздел рек Лена и Амга (J2)

a, б – джаспероидизированные эпигенетические доломиты с псевдоморфозами лимонита по сульфидам и сидериту-кутнагору; *в, г* – полнопроявленные колломорфно-друзовые джаспероиды, развитые по оолитовым известнякам. Py – пирит, С – халцедон.

Ост. усл. обозн. см. на рис. 2 и 3

пелитовым материалом, формирующими причудливую колломорфно-друзовую текстуру породы. Характерно присутствие гидроокислов железа, которые образуют вкрапленные включения или мелкие гнезда размером 0,1–1,0 мм, часто неправильной формы, с губчатой структурой. На плоскостях трещиноватости и гранях кристаллов наблюдаются темно-серые, почти черные налеты гидроокислов марганца, а иногда мелкие желваки халцедоновидного кварца, замещенные изометрично-зернистым кварцем (рис. 4).

Для обеих разновидностей свойственно также присутствие поздних секущих кальцитовых жил, иногда в сочетании с ксеноморфными монокристаллами кальцита, выполняющими ядерную часть сферолитов, а также вкрапленные, прожилково-вкрапленные и прожилково-гнездовидные зерна пирита, марказита, сфалерита или галенита, часто замещенные гидроокислами железа.

Геохимические особенности апокарбонатно-кремнистых метасоматитов. Выделенные на основе петрографических особенностей минерального состава зоны колонки обладают различными геохимическими характеристиками. Дисперсия содержаний петрогенных оксидов в пределах зон метасоматической колонки на разных участках территории не значительна, что объясняется выдержанным литологическим составом пород-протолитов. Выявленная зональность ГМ-образований (рис. 5) является типичной для тектоногенного типа апокарбонатных метасоматитов [4; 8; 18; 23–26; 33].

В связи с неустойчивостью кальцита во внешней зоне колонки под воздействием хлоридных растворов происходит его замещение доломитом, в котором фиксируется Mg. Отношение MgO к CaO в породах близко к 1:1, что свидетельствует о стехиометрическом составе доломита (рис. 6, а). Минералы группы доломита-кутнагорита-сидерита фиксируются во внешней зоне метасоматической колонки незначительными

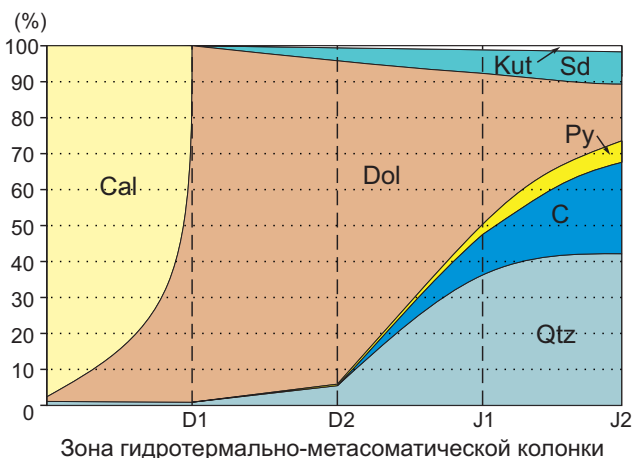


Рис. 5. Графики, отображающие баланс вещества (петрогенных оксидов) в пределах выделенных зон ГМ-колонки апокарбонатно-кремнистых метасоматитов

Усл. обозн. см. на рис. 2–4

концентрациями таких элементов, как Fe и Mn, что отражает и степень закрытости порового пространства. Ближе к центральной зоне происходит заметный рост содержаний кремнезема за счет новообразований в породах кварца и халцедона (рис. 6, б). В ядерной части ГМ-колонки содержания кремнезема продолжают расти, достигая величин в 50 % атомной массы породы. Одновременно с этим наблюдается рост содержаний Fe₂O₃, концентрирующегося как в сульфидной массе, так и в карбонатных минералах группы сидерита-кутнагорита-доломита (рис. 6, в). Незначительное накопление K₂O и Al₂O₃ в ядерной части колонки предположительно связано с наложением на гипогенную минерализацию гипергенных процессов. Концентрации остальных элементов в породах не значительны.

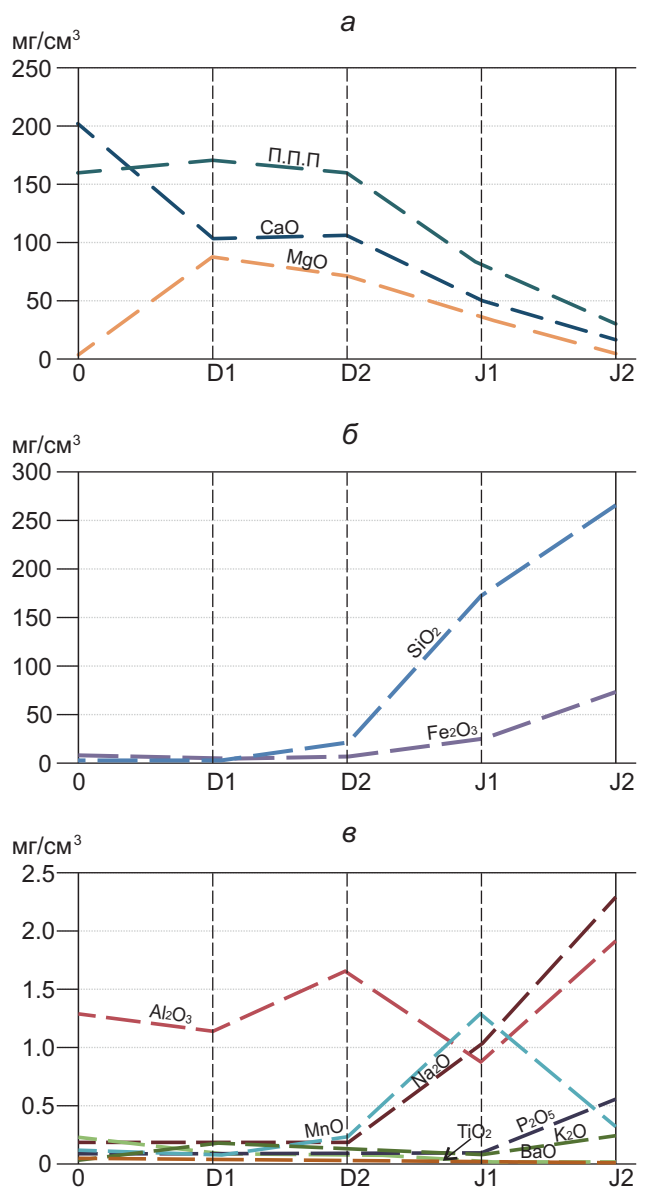


Рис. 6. Петрографо-минералогическая зональность зон ГМ-колонки

Графики баланса для: а – CaO, MgO (п.п.п. – потери при прокаливании); б – SiO₂ и Fe₂O₃; в – Al₂O₃, Na₂O, K₂O, MnO, TiO₂, BaO, P₂O₅

Характер распределения петрогенных и рудных элементов в гидротермально-метасоматических образованиях, развитых по породам кетеманской и титаринской свит раннего кембрия

Индекс зоны	0	D1		D2	J1	J2		
SiO ₂	0,01	0,01	0,01	1,25	4,75	47,46	65,75	58,55
Al ₂ O ₃	0,35	0,32	0,25	0,57	0,46	0,24	0,52	5,75
TiO ₂	0,06	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	<0,01	0,08
Fe ₂ O ₃	1,21	0,73	0,82	0,79	1,41	6,06	19,16	25,88
MnO	0,03	0,02	0,02	0,10	0,06	0,35	0,09	0,62
MgO	0,34	23,58	23,93	22,46	19,78	9,90	1,29	0,24
CaO	54,48	28,44	28,18	27,93	28,98	13,66	4,36	0,08
Na ₂ O	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,28	0,62	0,80
K ₂ O	<0,01	0,05	0,05	0,01	0,03	0,02	0,07	2,54
P ₂ O ₅	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,15	0,14
п.п.п.	43,44	46,77	46,67	46,81	44,46	22,03	8,00	5,17
BaO	0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,19
Сумма	100,00	100,03	100,03	100,02	100,03	100,08	100,00	100,00
Pb	2,75	7,75	1,17	6,29	3,69	4,82	294	15,4
Zn	9,43	19,9	9,56	13,4	14,1	108	1290	60,4
Li	0,5	0,5	0,5	0,5	1,45	1,87	1,7	3,49
Sc	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,28	1,2	0,1
Co	0,25	0,25	0,25	0,25	1,64	2,58	11,4	0,86
Ni	0,25	0,25	0,25	0,25	1,79	4,76	28,4	2,3
Cu	0,25	0,25	0,25	1,83	0,25	2,3	6,64	1,07
Ag	0,02	0,02	0,005	0,036	0,005	0,068	0,044	0,014
Sb	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,12	0,51	0,05
Te	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Bi	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Be	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
V	0,75	5,74	2,84	7,02	3,47	9,44	34,3	2,58
Cr	0,25	1,49	0,25	3,06	18,2	5,07	90,6	17,7
Rb	1	2,83	1	1	1	1	1	1
Sr	172	80,5	50	121	63,4	32,2	49,3	5,92
Y	1,62	1,75	0,72	1,99	2,58	4,31	6,71	0,85
Zr	13,3	20,7	14,2	18	13,5	12,3	5,73	4,33
Nb	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,66
Mo	0,74	0,66	0,3	0,75	2,73	1,07	11,2	1,5
Sn	0,73	0,49	0,55	0,64	0,6	0,59	0,72	0,61
La	1,32	1,27	0,24	1,08	1,07	1,5	3,54	0,33
Ce	2,08	2,38	0,32	1,97	2,19	2,86	5,55	0,64
Pr	0,3	0,3	0,063	0,27	0,28	0,41	0,69	0,077
Nd	1,2	0,99	0,25	1,19	1,2	1,8	2,83	0,3
LREE	4,90	1,37	5,18	8,67	2,59	5,03	7,11	3,30
MREE	0,52	0,11	0,50	0,76	0,46	0,60	1,24	0,57
HREE	0,38	0,08	0,24	0,31	0,21	0,32	0,68	0,39
W	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,98	0,25
Th	0,05	0,31	0,05	0,12	0,05	0,05	0,32	0,05
U	1,07	2,49	0,44	0,76	0,45	0,44	0,95	0,32
As	0,25	0,65	0,72	0,92	1,19	7,32	17,7	1,57
Li	0,5	0,5	0,5	0,5	1,45	1,87	1,7	3,49
Sc	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,28	1,2	0,1
Co	0,25	0,25	0,25	0,25	1,64	2,58	11,4	0,86
Q (г/см ³)	2,72	2,78	2,74	2,57	2,77	2,8	2,51	3,14
Номер пробы	6956	6941	6939	6950-1	6944	6944-1	6945-1	6953

Примечание: индексами обозначены **0** – неизменные пелитоморфные известняки; **D1** – неполнопроявленные эпигенетические доломиты; **D2** – полнопроявленные эпигенетические доломиты; **J1** – джаспероидизированные эпигенетические доломиты; **J2** – неполнопроявленные джаспероиды. Содержания петрогенных оксидов приводятся в процентах, редких и рассеянных элементов – в ppm.

Таблица 3

Баланс вещества редких и рассеянных элементов в ходе формирования апокарбонатно-кремнистых тектоногенных метасоматитов по карбонатным породам кетеменской и тигаринской свиты раннего кембрия

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

Примечание: коэффициент привноса-выноса элементов ΔC приведен в процентах и рассчитывался по формуле: $\Delta C = C_1 - C_2 / C_2 \times 100\%$, где C_1 – содержание элемента в интенсивно/полностью измененной породе, C_2 – содержание элемента в минимально измененной породе пелитоморфного известняка кетеменской свиты в сравниваемых выборках. Общее количество проб – 106.

Они не формируют самостоятельных минеральных фаз и не вносят существенный вклад в минералогическую-геохимическую зональность метасоматической колонки. Петрохимический состав различных зон метасоматической колонки приведен в табл. 2. В случае значительного обогащения вмещающих пород свинцом и цинком в центральной и ядерной частях метасоматической колонки начинает проявляться рудная сульфидная минерализация. В таких случаях в оруденелых породах от 5 до 20 % их объема выполнено агрегатами пирит-сфалерит-галенитового состава в ассоциации с карбонатной и кремнистой минерализацией. Кальцитизированные эпигенетические доломиты – одна из петротипических разновидностей полнопроявленных эпигенетических доломитов. Для них расчет баланса вещества по отношению к петрогенным элементам в настоящей статье не рассматривается.

Характер распределения редких и рассеянных элементов в различных зонах метасоматической колонки имеет незначительные качественные различия на участках распространения метасоматитов в долине рек Ботомы и Лена. Это связано с различиями в геохимической специализации вмещающих метасоматиты кембрийских отложений, заложенными еще на стадии седиментогенеза. Геохимическая характеристика различных зон колонки приводится в табл. 3. В ней же приведены данные по средним содержаниям элементов в ассоциированных с метасоматитами свинцово-цинковых рудах. Видно, что для рассматриваемой ГМ-системы характерна непрерывная концентрационная геохимическая зональность с выраженным закономерным обогащением и обеднением различных зон метасоматической колонки рассеянными и редкими элементами. Для большинства из них наблюдается непрерывный рост концентраций элементов относительно неизменных пород – от внешних зон к внутренним. Примечательно, что для таких элементов, как Pb, Zn, Co, Ni, Ag, характерен резкий рост концентраций на один и более порядок в рудных образованиях по сравнению с околорудными метасоматитами.

Таблица 4

Характер фракционирования изотопов серы сульфидов в гидротермально-метасоматических и рудных образованиях в карбонатных толщах кетеменской и титаринской свит раннего кембрия

Шифр пробы	Минерал	Привязка	$d^{34}\text{S}$, ‰
69187-2	Галенит	Вкрапленные руды, проявление Сульфидное	10,5
69099-2	Пирит	Прожилково-вкрапленные руды, проявление Сульфидное	11,1
69187-1	Галенит	Прожилково-крапленные руды, проявление Сульфидное	11,5
6929	Марказит	Поселок Тит-Ары, полнопроявленные джаспероиды	7,4
6934-2	Галенит	Массивные руды, проявление Сульфидное	12,0
69187-2/1	Галенит	Околорудные джаспероиды, проявление Сульфидное	11,9
6959	Галенит	Прожилково-вкрапленные руды, проявление Тютюнге	11,8
69187-3	Галенит	Прожилково-вкрапленные руды, проявление Сульфидное	10,5

Изотопные характеристики апокарбонатно-кремнистых метасоматитов. Особенности изотопного состава свинца и серы в ассоциированных с рудами ГМ-образованиях являются одними из главных компонентов генетических моделей стратиформного свинцово-цинкового оруденения [2; 10; 14; 18; 28; 30; 32; 33; 36]. Они позволяют моделировать условия формирования руд и рудоносных образований и предполагать природу источника серы сульфидов и сульфатов. Нами изучены характеристики валовых проб безрудных эпигенетических доломитов их оруденелых и джаспероидизированных разновидностей, а также мономинеральные навески галенита из сульфидных руд. Данные о фракционировании изотопов свинца в рудах и рудовмещающих ГМ-породах приведены в табл. 4. Полученные значения варьируются в узком диапазоне, что указывает на парагенетическую связь процессов формирования сульфидной минерализации и ГМ-образований.

Характер фракционирования изотопов серы в сульфидах изучен по мономинеральным навескам пирита, марказита, сфалерита и галенита (табл. 5). Интерпретация полученных данных производилась с учетом трех реперных значений: сульфат морской воды ($d^{34}\text{S} \approx 20,0$ ‰), эндогенная «метеоритная» сера ($d^{34}\text{S} \approx 0$ ‰) и биогенная сера $d^{34}\text{S} \approx -12 \pm 5$ ‰ [7]. Полученные данные в целом имеют узкий диапазон значений от 7,4 до 11,1 ‰. Следует отметить, что в пробе из сфалерита получены аномально низкие значения ($d^{34}\text{S} = -10,4$ ‰). Такие значения характерны для месторождений стратиформного типа в карбонатных толщах с коровым источником флюида и свидетельствуют о заимствовании серы сульфидов из морской воды и частичном смешении ее с биогенным источником [2; 28; 30; 32; 33]. Гетерогенность серы может являться показателем ее биогенной природы, что в целом согласуется как с геологическим строением территории, так

Таблица 5

Характер фракционирования изотопов свинца в галенитах, а также в рудных и гидротермально-метасоматических породах

Шифр пробы	Минерал	m, мг	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
6934-2	Галенит	2,31	18,2029	15,5460	39,0468
69187-1	Галенит	1,92	18,0969	15,5337	38,5589
69187-2/1	Галенит	1,10	18,0895	15,5270	38,5314
69187-3	Галенит	1,30	18,0962	15,5291	38,5253
Шифр пробы	Порода	m, мг	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
69187-1/1	Оруденелый джаспероид	32,39	18,1667	15,5701	38,7398
6934-3	Гнездовидная руда	90,08	18,1476	15,5391	38,6852
69187-2/1	Прожилково-вкрапленная руда	100,58	18,1957	15,5796	38,9987
69187-1	Оруденелый джаспероидизированный доломит	95,8	18,1247	15,5529	38,6884
69187-1/2	Прожилково-вкрапленная руда	101,98	18,1190	15,5543	38,6915
69187-2/2	Околорудный эпигенетический доломит	97,45	18,1674	15,5391	38,8673
6959	Вкрапленная руда	121,74	18,3294	15,6148	39,6577

и представлением о связи оруденения с миграцией нефтяных вод [14; 16–18; 33; 34; 35; 36; 38]. Это первые результаты изотопии серы сульфидов изучаемого региона, но для более точного определения характера источника серы сульфидов необходимо провести дополнительные исследования.

Проведенные ранее исследования особенностей фракционирования изотопов углерода и кислорода в карбонатных породах титаринской и кетемонской свит позволили установить, что и пелитоморфные известняки, и раннедиагенетические и эпигенетические доломиты обладают незначительно различающимися изотопными характеристиками [19], что, по нашему мнению, указывает на седиментогенный катагенетический источник флюида, сохранившего характеристики морских вод палеобассейна.

Минералого-геохимическая зональность апокарбонатно-кремнистых гидротермально-метасоматических образований и их рудоносность. Процессы низкотемпературного апокарбонатно-кремнистого метасоматоза привели к интенсивному перераспределению вещества и формированию положительных и отрицательных мультипликативных аномалий элементов. По результатам комплексного минералого-геохимического и петрографического изучения гидротермально измененных карбонатных отложений Синско-Ботомской СФЗ составлены специализированные карты ГМ-зональности и аномального геохимического поля для участков детализации на левобережье р. Лена и в нижнем течении р. Ботомы, соответствующих доступным для изучения частям потенциальных рудных полей.

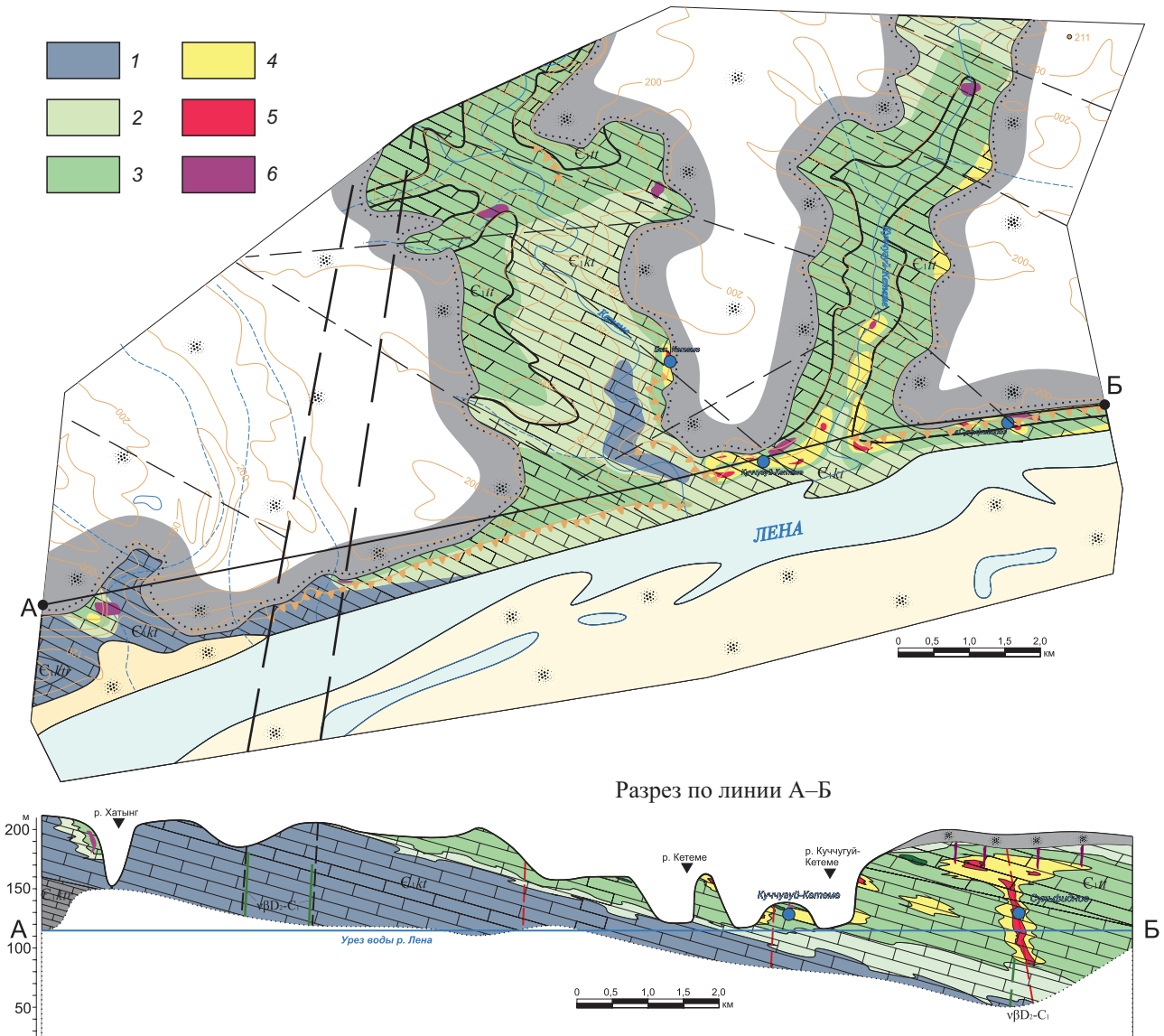


Рис. 7. Карта распространения апокарбонатно-кремнистых гидротермально-метасоматических образований на левобережье р. Лена в устье р. Кетеме и их зональности с разрезом

1 – неизменные раннекембрийские карбонатные породы; 2, 3 – внешняя зона: 2 – доломитизированные известняки, 3 – полнопроявленные эпигенетические доломиты; 4–6 – центральная зона: 4 – джаспериодизированные эпигенетические доломиты, 5 – полнопроявленные джаспериоды, 6 – кальцитизированные эпигенетические доломиты

Приведенные ниже карты составлены непосредственно для ранне- и среднекембрийских карбонатных пород; перекрывающие их мезо-кайнозойские терригенные и покровные четвертичные суглинки не учитывались.

Главные особенности апокарбонатных ГМ-образований территории с точки зрения применения выбранной методики исследования — высокая степень вторичной переработки пород-протолитов с преобладающим распространением полей полнопроявленных метасоматитов, простота и выдержанность минерального состава различных зон ГМ-колонки, значительная площадь региональных и локальных метасоматитов. В соответствии с этим на картах ГМ-зональности участков на реках Лена и Ботома неполнопроявленные эпигенетические доломиты и джаспероидизированные эпигенетические доломиты могут быть отображены в качестве отдельных зон метасоматической колонки.

Рисунок 7 демонстрирует, что поля распространения слабодоломитизированных известняков (неполнопроявленных метасоматитов) в пределах участка Ленский закономерно ассоциированы с верхней частью разреза кетеменской свиты, в то время как зоны распространения полнопроявленных эпигенетических доломитов совпадают с полями выходов титаринской свиты. Джаспероидизированные доломиты и полнопроявленные джаспероиды имеют локальное распространение в пределах территории и закономерно ассоциированы с полиметаллическими

рудопроявлениями. Они сконцентрированы в зонах сочленения разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного простираний, но в то же время геометрия полей их развития имеет отчетливый стратифицированный облик.

В пределах нижнего течения р. Ботома (рис. 8) ореол неполнопроявленных эпигенетических доломитов характеризуется незначительной мощностью. Это связано с преобладанием в основании разреза кетеменской свиты изучаемого участка диагенетических доломитов. Джаспероидизированные доломиты и джаспероиды развиты здесь шире, чем на р. Лена, что обусловлено масштабами проявления дизъюнктивной тектоники. При этом свинцово-цинковое оруденение имеет на участке меньшую степень проявления.

Структура аномального геохимического поля обоих участков выражает концентрическую зональность ГМ-системы со стратифицированным характером распределения положительных и отрицательных геохимических аномалий.

Анализ корреляционных связей между элементами позволил выделить следующие закономерные геохимические ассоциации. Ассоциация Pb-Zn-Ag-Mn ярко выражена на левобережье р. Лена. Она является типоморфной для свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах, ее положительные мультипликативные аномалии в точности совпадают с ГМ-зональностью, а наиболее контрастные аномалии относятся к рудопроявлениям полиметаллической минерализации (рис. 9). Ее аналогом на участке

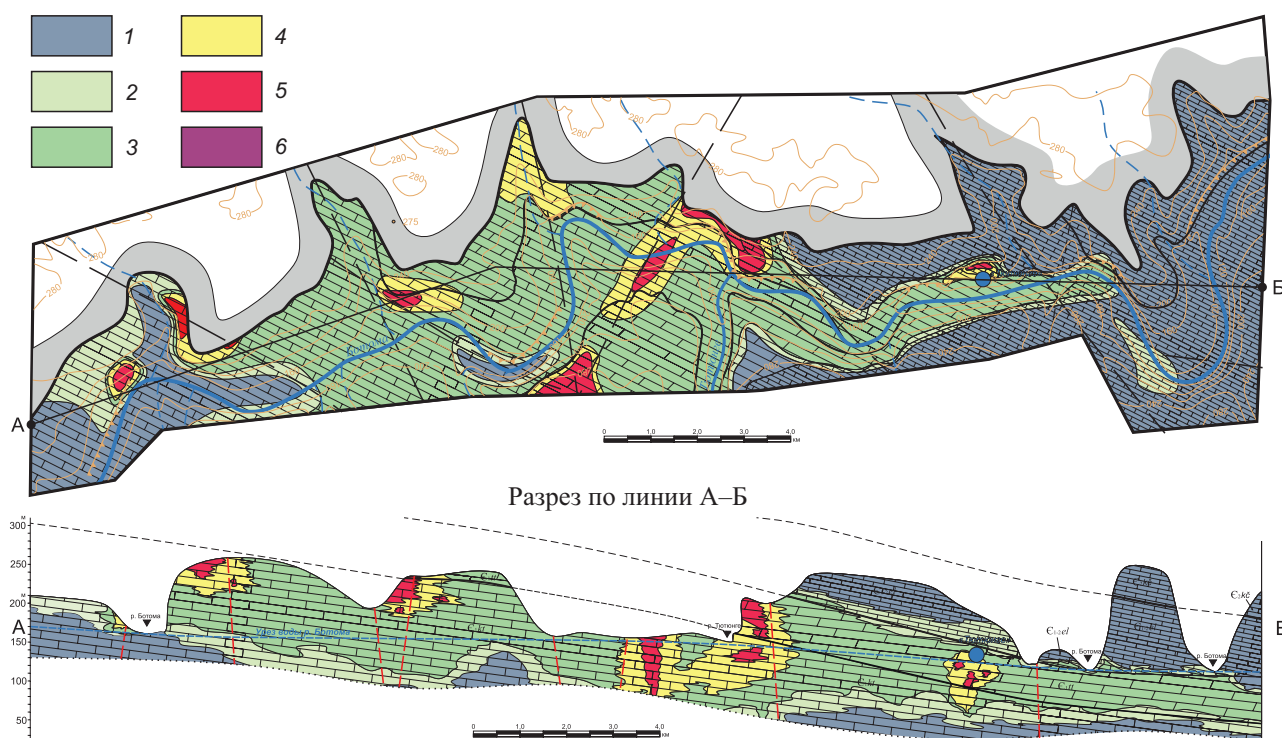


Рис. 8. Карта распространения апокарбонатно-кремнистых гидротермально-метасоматических образований в нижнем течении р. Ботома и их зональности с разрезом

1 — неизменные ранне- и среднекембрийские осадочные породы. Ост. усл. обозн. см. на рис. 7

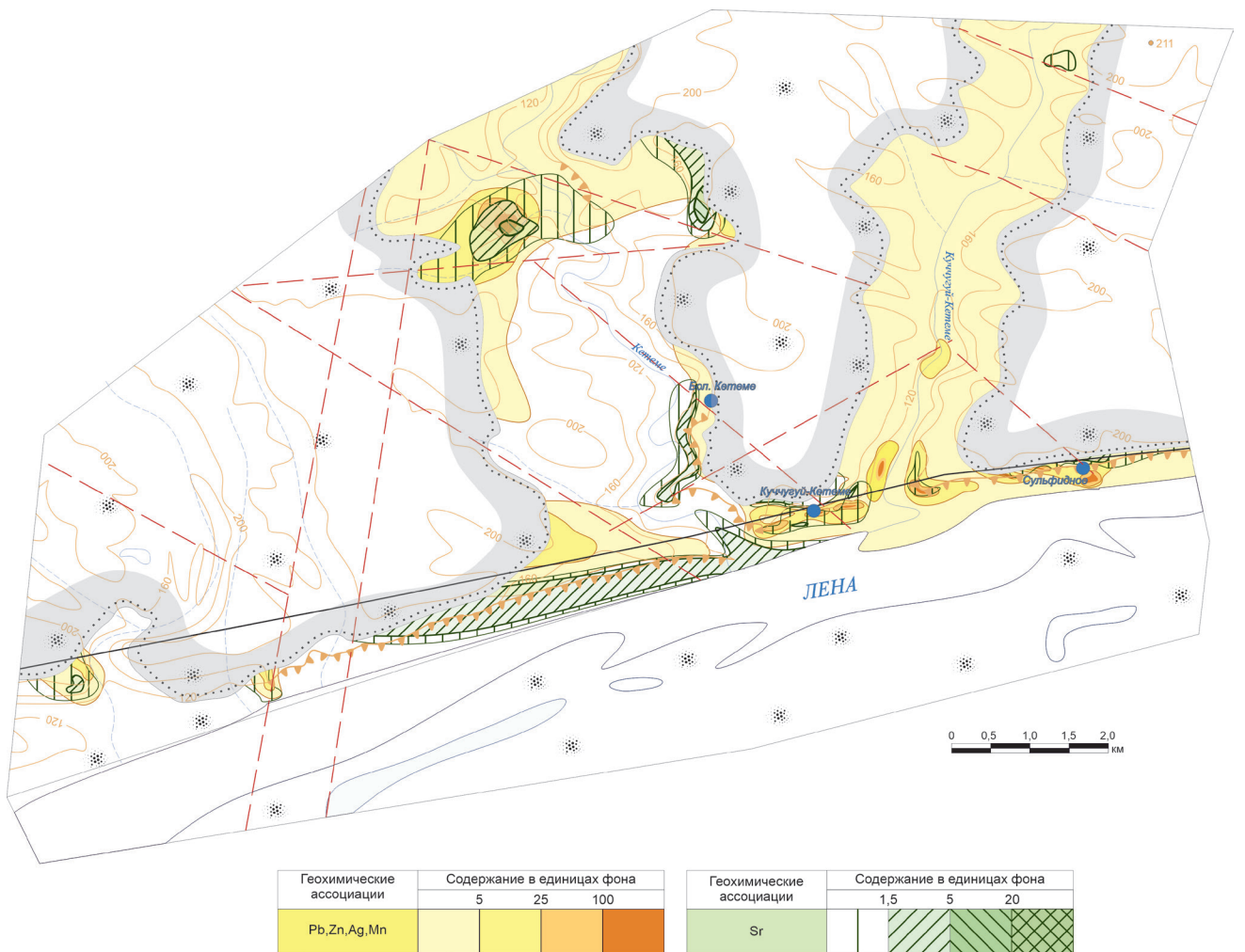


Рис. 9. Карта аномального геохимического поля на левобережье р. Лена в устье р. Кетеме

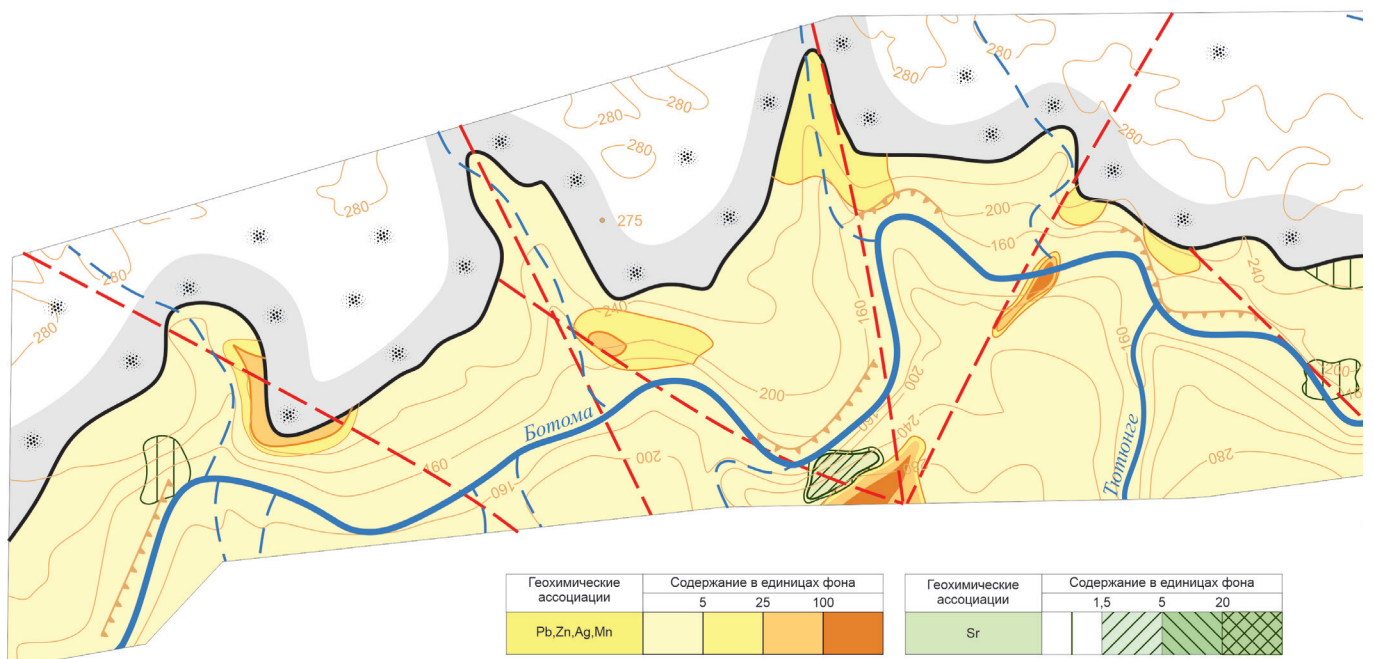
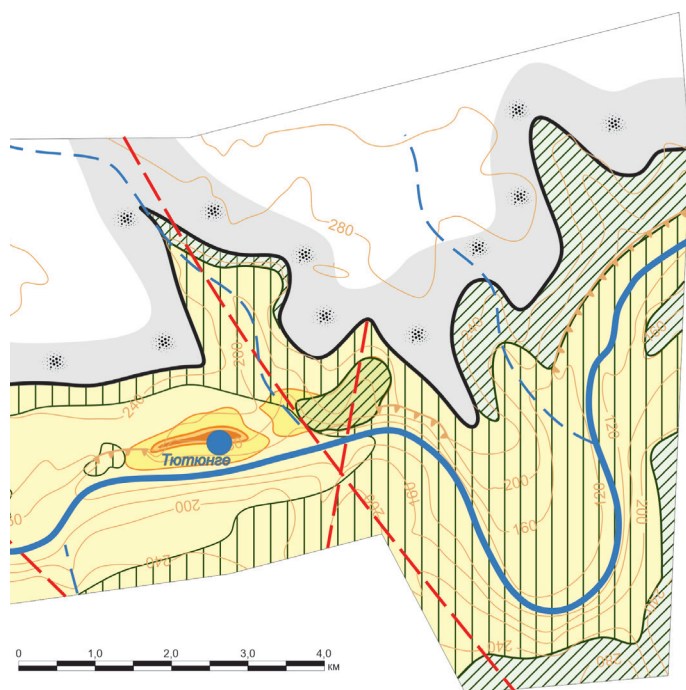


Рис. 10. Карта аномального геохимического поля в нижнем течении р. Ботомы

Ботомский является ассоциация Pb-Zn-W-Fe-P, также совпадающая с ГМ-зональностью. На рис. 10 приведена карта аномального геохимического поля участка Ботомский. Как видно из ее рассмотрения, геохимические аномалии типоморфной рудной Pb-Zn-Ag-Mn ассоциации в его пределах в значительной степени менее контрастные, что связано с незначительными, по сравнению с участком Ленский, концентрациями элементов во вмещающих породах. На левобережье р. Лена также выявлены ассоциации Li-Co-Cu-V-Ni, Zr-Rb-Nb-REEP и Fe-Ba-W-Y-Sb-Be, характеризующие степень насыщения вмещающих пород вулканогенной примесью и нерастворимым остатком. В нижнем течении р. Ботома эти три ассоциации формируют один единый геохимический ореол с нечеткими ветвящимися корреляционными связями между различными группами элементов (рис. 10). Данные ореолы, несмотря на определенные закономерности распределения положительных аномалий, не являются информативными по причине пониженного кларка концентраций большинства элементов. Поэтому их использование в качестве поискового критерия не целесообразно. Более информативными здесь выступают моноэлементные аномалии стронция, не формирующего устойчивых ассоциаций ни с одним из элементов, кроме кальция. Корреляция стронция с последним обусловлена его накоплением в кальците неизменных известняков, а также в зонах кальцитизации, проявленных в кровельной части коренных выходов известняков и поэтому занимающих нарудное положение.



Обсуждение результатов и выводы. Применение комплексного подхода к изучению минералогических, петрографических и геохимических особенностей ГМ-образований в раннекембрийских карбонатных отложениях Синско-Ботомской СФЗ позволило раскрыть историю проявления гидротермальной деятельности на рассматриваемой территории и по геохимическим данным выделить основные рубежи гидротермального рудообразования. Это дало возможность локализовать участки недр, перспективные на выявление стратиформной свинцово-цинковой минерализации в карбонатных толщах (MVT-тип).

На уровне современного эрозионного среза вещественные проявления апокарбонатно-кремнистой ГМФ формируют единый ореол, выделенный предшественниками в качестве самостоятельного стратиграфического подразделения (титаринская свита) [5; 6; 31]. Широкое развитие данных образований зафиксировано авторами и на прилегающей территории в раннекембрийских карбонатных отложениях Амгинской СФЗ, а также в пределах восточной части Мухатгинской СФЗ. Локализация данных метасоматитов и их зональность находятся в прямой зависимости от литологических и тектонических особенностей строения территории. Эпигенетические доломиты образовывались по пелитоморфным или мелкозернистым, реже комковатым водорослевым известнякам, являвшимся благоприятной средой для формирования полнопроявленных метасоматитов. В то же время существенно битуминозные кремнистые известняки и известковые сланцы синской и куторгиновой свит почти не подвергаются эпигенетической доломитизации. Также данные процессы не проявляются в полях развития диагенетических доломитов, распространенных в пределах переходной свиты и нижней части разреза кетеменской свиты в долине р. Ботома, так как породогенерирующий флюид, судя по геологическому строению территории, находился в равновесии с доломитовой средой.

Источниками кремнезема для формирования гидротермальной кварц-халцедоновой минерализации могли служить кремнистые конкреции, широко распространенные как в неизменных карбонатных породах кетеменской свиты, так и в пределах раннекембрийского карбонатного бассейна в целом [1].

Другой важный аспект литологического фактора – эффективная пористость пород, влияющая на способность карбонатных пород пропускать через себя флюид, чем в том числе обуславливается «геометрия» ГМ-системы и степень проявленности метасоматических образований [4; 18; 24]. Петрографические исследования показывают, что глинистые известняки и мергели, а также органо-обломочные породы еланской, хомустанской, кычикской, усть-ботомской свит обладают весьма низкой пористостью в большинстве случаев закрытого типа, почти всегда выполненную раннедиагенетическим крустификационным

кальцитом. Пелитоморфные известняки кетемской и титаринской свит, напротив, характеризуются высокой пористостью открытого типа, составляющей в неизменных породах 5–10 %. Кроме того, характерная стадийность ГМ-процесса изучаемого типа подразумевает значительное увеличение пористости на стадии выщелачивания площадных доломитов [4; 7; 24; 28; 30; 32; 37], предшествующей формированию кристификационных железистых и марганцовистых, а также кремнистых и рудных образований.

Тектонический фактор контроля апокарбонатно-кремнистых метасоматитов также вносит значительный вклад как в концентрационную площадную зональность, так и локальную оклотрещинную. Поля ГМ-образований отчетливо приурочены к зонам разрывных нарушений различного возраста и порядка, участков сопряжения разноориентированных зон.

Вопрос природы растворов данных ГМ-систем на сегодня остается дискуссионным. Некоторые из исследователей сходятся во мнении, что одним из возможных агентов переноса вещества для ГМФ данного типа являются натриево-кальциевые хлоридные захороненные катагенетические седиментогенные воды [4; 10; 16; 17; 35; 38]. Результаты изучения изотопного состава свинца, серы, кислорода и углерода, приведенные авторами, позволяют в совокупности подтвердить данное предположение. Вероятно, захороненные седиментогенные воды находились в погребенном состоянии под давлением, однако в ходе процессов палеозойского рифтогенеза и раскрытия Палеовиллюйской грабен-рифтовой системы с формированием глубинных зон разрывных нарушений Чаро-Синской зоны произошла их мобилизация и миграция в элизионном режиме.

Минералого-геохимические особенности гидротермально-метасоматических и рудных образований позволяют утверждать пространственную и парагенетическую связи низкотемпературных апокарбонатно-кремнистых метасоматитов и свинцово-цинковых руд, отражающиеся в структурах аномальных геохимических полей. Основополагающие элементы изучаемой зональности — мультипликативные аномалии Pb, Zn, Mn и Ag, формирующие концентрическую зональность с непрерывным ростом концентрации от неизменных пород к ядру метасоматической колонки и рудам. Такие закономерности распределения химических элементов, а также резкий рост их концентраций в центральной и ядерной частях колонки позволяют предположить, что внешняя зона колонки, сложенная эпигенетическими доломитами, являлась в том числе и областью питания тектоногенной ГМ-системы, обусловившей концентрацию избыточных элементов в ядерной зоне колонки.

Стоит отметить, что многие исследователи скептически относятся к возможности формирования масштабного стратиформного оруденения только за счет перераспределения вещества вмещающих пород [15; 20; 25; 26; 28; 35; 37] без

эндогенного источника вещества. В пределах территории нами не было установлено вещественных проявлений потенциально рудогенерирующих процессов за исключением связанных раннекембрийского вулканогенного-эксгаляционного, а также девонско-раннекаменноугольного гидротермально-метасоматического. Вероятным источником обогащения пород свинцом и цинком могли послужить сами седиментогенные катагенетические воды, в которых рудные элементы находились в виде комплексных анионов [16; 17; 20; 27]. На возможность этого процесса указывают Л. М. Лебедев и И. Б. Никитина [20], отмечая, что вскрытие скважинами напорных катагенетических металлоносных растворов в районе полуострова Челекен в Туркмении привело к формированию сульфидной минерализации в местах их разгрузки. Только за год этими растворами выносятся на поверхность (т): до 350 свинца, 50 цинка, 34 меди, 24 кадмия и 8 мышьяка [20].

Остальные редкие и рассеянные элементы также характеризуются концентрацией в ядерной части зоны колонки и рудных образованиях. Исключение составляет лишь стронций. Концентрируясь в новообразованных карбонатных жилах в терминальный этап ГМ-процесса, изучаемый элемент позволяет маркировать надрудные зоны, что может быть использовано в качестве одного из критериев прогнозирования скрытого оруденения при слабом эрозионном срезе. Примечательно, что концентрации стронция в надрудных метасоматитах понижены относительно неизменных пелитоморфных известняков (в среднем до –50 %), однако относительно эпигенетических доломитов концентрация стронция значительно повышена (до 20 ф. з. и более).

Применения выбранного подхода к изучению ГМ-образований позволило установить низкую перспективу выявления промышленно-значимых рудных скоплений свинца и цинка в пределах нижнего течения р. Ботома, где, несмотря на значительное распространение ГМ-пород, геохимические ореолы слабоконтрастны, а оруденение проявлено локально. В то же время при изучении гидротермально измененных пород на левобережье р. Лена их связь с оруденением не только подтвердилась, но на северо-западе участка работ — в районе моста через р. Кетеме — была локализована перспективная на выявление свинцово-цинкового оруденения зона.

Авторы признательны директору центра прогнозно-металлогенических исследований ВСЕГЕИ кандидату геол.-минерал. наук В. В. Шатову, профессору кафедры геологии месторождений полезных ископаемых МГРИ РГГРУ доктору геол.-минерал. наук П. А. Игнатову, заведующему отделом цветных металлов ЦНИГРИ кандидату геол.-минерал. наук В. В. Кузнецову и зав. сектором изотопных исследований ЦИИ ВСЕГЕИ И. Н. Ванганен за ценные консультации, содержательные обсуждения, помощь и поддержку в подготовке статьи.

1. Булгакова М. Д. Осадочно-гидротермальные силициты раннего кембрия средней Лены // Металлоносность осадочных и магматических комплексов средней Лены. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1995. — С. 109–119.
2. Виноградов В. И. Основные принципы использования данных по изотопному составу для суждения о генезисе стратиформных руд // Роль изотопов серы в изучении генезиса стратиформных месторождений медистых песчаников и сланцев, руд свинца и цинка в карбонатных породах. — М., 1973. — С. 27–37.
3. Гайдук В. В. Вилюйская среднепалеозойская рифтовая система. — Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. — 128 с.
4. Гидротермально-метасоматические формации России / О. В. Петров, Е. В. Плющев, В. В. Шатов, А. В. Молчанов, Н. С. Соловьев, С. В. Кашин, А. Е. Соболев, А. В. Терехов // Региональная геология и металлогения. — 2016. — № 66. — С. 5–19.
5. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Амгинская, листы Р-52-XXV (Синск), Р-52-XXVI (Тит-Ары), Р-52-XXVII (Булгунняхтах). Объяснительная записка / О. И. Щербачков, Л. А. Юганова, М. Л. Кокоулин и др. — СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, 1999. — 75 с.
6. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Амгинская, листы Р-52-XXXI (верховье р. Кюнгкюй), Р-52-XXXII (Улу), О-52-I (устье р. Нёгючей), О-52-II (Верхняя Амга). Объяснительная записка / О. И. Щербачков, В. А. Мендель и др. — М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015. — 161 с.
7. Гриненко В. А., Гриненко Л. Н. Геохимия изотопов серы. — М.: Наука, 1974. — 274 с.
8. Донец А. И., Конкин В. Д., Крутий В. М. Метасоматические доломиты — основные рудовмещающие породы Сарданского рудного района (Якутия) // Геология рудных месторождений. — 1978. — № 6. — С. 90–93.
9. Донец А. И., Ручкин Г. В., Конкин В. Д. Геолого-промышленные типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах // Отечественная геология. — 2017. — № 6. — С. 31–38.
10. Изотопно-геохимические индикаторы стратиформного свинцово-цинкового оруденения Ангарского рудного района на Енисейском Кряже / В. Г. Пономарев, В. А. Акимцев, С. В. Сараев, Е. Ф. Доильницын // Изотопные исследования процессов рудообразования. — Новосибирск: Наука, СО, 1991. — С. 56–83.
11. Казицын Ю. В., Рудник В. А. Руководство к расчету баланса вещества и внутренней энергии при формировании метасоматических пород. — М.: Недра, 1968. — 364 с.
12. Кембрий Сибири / ред. Л. Н. Репина, А. Ю. Розанов. — Новосибирск: Наука, СО, 1992. — 135 с. — (Труды института геологии и геофизики; вып. 788).
13. Кембрий Сибирской платформы. Кн. 1: Алдано-Ленский регион / А. И. Варламов, А. Ю. Розанов, В. В. Хоментовский и др. — М.: ПИН РАН, 2008. — 298 с.
14. Ковалев К. Р., Перцева А. П., Бусленко А. И. Изотопные исследования в решении проблем рудообразования озернинского рудного узла // Изотопные исследования процессов рудообразования. — Новосибирск: Наука, СО, 1991. — С. 56–83.
15. Конкин В. Д., Донец А. И., Ручкин Г. В. Минералого-геохимические типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах // Отечественная геология. — 2018. — № 4. — С. 51–62.
16. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Черкасова Е. В. Геохимические причины формирования подземных хлоридных рассолов, генерирующих стратиформные полиметаллические рудные формации // Геохимия. — 2005. — № 6. — С. 634–660.
17. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Черкасова Е. В. Гидродинамические и геохимические условия формирования стратиформной Zn-Pb сульфидной рудной минерализации хлоридными рассолами // Геохимия. — 2006. — № 4 — С. 298–425.
18. Кунц А. Ф. Гидротермально-метасоматическое рудообразование в карбонатных породах. Экспериментальные модели и их приложения. — Екатеринбург: Коми НЦ, 2002. — 334 с.
19. 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. Гусев, А. В. Молчанов, А. В. Терехов // Региональная геология и металлогения. — 2021. — № 86. — С. 31–44.
20. Лебедев Л. М., Никитина И. Б. Особенности химического состава и рудоносных гидротерм Челенкена // ДАН СССР. — 1968. — Т. 183, № 2. — С. 439–442.
21. Левашов К. К. Среднепалеозойская рифтовая система востока Сибирской платформы // Советская геология. — 1975. — № 10. — С. 49–58.
22. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Вулканизм и тектоника Патомско-Вилюйского среднепалеозойского авлакогена. — М.: Недра, 1975. — 183 с.
23. Метасоматизм и метасоматические породы = Metasomatism and metasomatic rocks / отв. ред. В. А. Жариков, В. Л. Русинов. — М.: Научный мир, 1998. — 492 с.
24. Методика изучения гидротермально-метасоматических образований / Е. В. Плющев, О. П. Ушаков, В. В. Шатов, Г. М. Беляев. — Л.: Недра, 1981. — 262 с.
25. Плющев Е. В., Шатов В. В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. — Л.: Недра, 1985. — 247 с.
26. Плющев Е. В., Шатов В. В., Кашин С. В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. — 559 с.
27. Пономарев В. Г., Вострокнутов Е. П., Акимцев В. А. Экспертная система — инструмент прогнозирования стратиформного полиметаллического оруденения. — Новосибирск: ОИГГМ СО АН СССР, 1991. — 119 с.
28. Принципы и методы построения геолого-генетических моделей стратиформных свинцово-цинковых месторождений в карбонатных и терригенных формациях / Д. И. Горжевский, В. Д. Конкин, А. И. Донец, В. В. Кузнецов, Е. Б. Соловьев // Геолого-генетические модели стратиформных месторождений свинца и цинка. — Новосибирск: Наука, СО, 1991. — С. 5–41.
29. 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. Гусев, О. Л. Соловьев, Е. И. Хорохина, Ю. Л. Светлова // Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов — от прогноза к добыче: Сборник тезисов докладов II Молодежной научно-образовательной конференции. — М.: ЦНИГРИ, 2021. — С. 77–78.
30. Ручкин Г. В., Донец А. И. Стратиформные свинцово-цинковые месторождения в карбонатных толщах. — М.: ЦНИГРИ, 2002. — 124 с.
31. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы. В 2 т. Т. 1: Стратиграфия / ред. Ю. Я. Шабанов. — Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН. — 2016. — 497 с.
32. Стратиформные свинцово-цинковые месторождения в отложениях венда Юго-Восточной Якутии / В. Г. Пономарев, Ю. В. Давыдов, А. А. Тьшинский и др. — Новосибирск: Наука, 1979. — 232 с.
33. Скрипченко Н. С. Гидротермально-осадочные полиметаллические руды известково-сланцевых формаций. — М.: Недра, 1980. — 215 с.
34. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Л. М. Парфенов,

М. И. Кузьмин и др. — М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. — 571 с.

35. Хэнор Д. Гидротермальные флюиды осадочного генезиса // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. — М.: Мир, 1982. — С. 122–147.

36. Широбокова Т. И. Стратиформное, полиметаллическое и баритовое оруденение Урала. — Свердловск: АН СССР, 1992. — 140 с.

37. A deposit model for Mississippi Valley-type lead-zinc ores / L. D. Leach, R. D. Taylor, D. L. Fey, S. F. Diehl, R. W. Saltus. — Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. — 2010. — 64 p.

38. White D. Environment of generation of some base metal ore deposits // *Economic Geology*. — 1968. — Vol. 63. — No. 4. — Pp. 301–335.

1. Bulgakova M. D. Osadochno-gidrotermal'nye silitsity rannego kembriya sredney Leny [Early Cambrian sedimentary hydrothermal silicites of the middle Lena]. *Metallic content of sedimentary and magmatic complexes of the middle Lena*. Yakutsk, 1995, pp. 109–119. (In Russian).

2. Vinogradov V. I. Osnovnye printsipy ispol'zovaniya dannykh po izotopnomu sostavu dlya suzhdeniya o genezise stratiformnykh rud [Basic principles of using data on isotopic composition for judging the genesis of stratiform ores]. *The role of sulfur isotopes in the study of the genesis of stratiform deposits of cuprous sandstones and shales, lead and zinc ores in carbonate rocks*. Moscow, 1973, pp. 27–37. (In Russian).

3. Gayduk V. V. Vilyuyskaya srednepaleozoyskaya riftovaya sistema [Vilyui Middle Paleozoic rift system]. Yakutsk, 1988, 128 p.

4. Petrov O. V., Plyushchev E. V., Shatov V. V., Molchanov A. V., Solov'ev N. S., Kashin S. V., Sobolev A. E., Terekhov A. V. Gidrotermal'no-metasomaticheskie formatsii Rossii [Hydrothermal-metasomatic formations of Russia]. *Regional Geology and Metallogeny*, 2016, no. 66, pp. 5–19. (In Russian).

5. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 200 000. Seriya Amginskaya, Listy P-52-XXV (Sinsk), P-52-XXVI (Tit-Ary), P-52-XXVII (Bulgunnyakhtakh). Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Amginskaya series, sheets P-52-XXV (Sinsk), P-52-XXVI (Tit-Ary), P-52-XXVII (Bulgunnyakhtakh). Explanatory note]. Eds.: O. I. Shcherbakov, L. A. Yuganova, M. L. Kokoulin et al. St. Petersburg, Kartfabrika VSEGEI, 1999, 75 p.

6. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 200 000. Izdanie vtoroje. Seriya Amginskaya, Listy P-52-XXXI (verkhov'e r. Kyungkyuy), P-52-XXXII (Ulu), O-52-I (ust'e r. Negyuchey), O-52-II (Verkhnyaya Amga). Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second edition. Amginskaya series, sheets P-52-XXXI (upper reaches of the Kyungkyuy river), P-52-XXXII (Ulu), O-52-I (mouth of the Nogychai river), O-52-II (Upper Amga). Explanatory note]. Eds.: O. I. Shcherbakov, V. A. Mendel' et al. Moscow, 2015, 161 p.

7. Grinenko V. A., Grinenko L. N. Geokhimiya izotopov sery [Geochemistry of sulfur isotopes]. Moscow, Nauka, 1974, 274 p.

8. Donets A. I., Konkin V. D., Krutiy V. M. Metasomaticheskie dolomity — osnovnye rudovmeshchayushchie porody Sardaninskogo rudnogo rayona (Yakutiya) [Metasomatic dolomites — the main ore-bearing rocks of the Sardaninsky ore region (Yakutia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1978, no. 6, pp. 90–93. (In Russian).

9. Donets A. I., Konkin V. D., Ruchkin G. V. Mineralogical-geochemical types and regional geological special characteristic of stratiform carbonate-hosted lead-zinc deposits. *National Geology*, 2017, no. 6, pp. 31–38. (In Russian).

10. Ponomarev V. G., Akimtshev V. A., Saraev S. V., Doil'nitsyn E. F. Izotopno-geokhimicheskie indykatory stratiformnogo svintsovo-tsinkovogo oрудneniya Angarskogo rud-

nogo rayona na Eniseyskom Kryazhe [Isotope-geochemical indicators of stratiform lead-zinc mineralization of the Angarsk ore region on the Yenisei Ridge]. *Izotopnye issledovaniya protsessov rudoobrazovaniya*. Novosibirsk, 1991, pp. 56–83. (In Russian).

11. Kazitsyn Yu. V., Rudnik V. A. Rukovodstvo k raschetu balansa veshchestva i vnutrenney energii pri formirovaniy metasomaticheskikh porod [Guide to the calculation of the balance of matter and internal energy in the formation of metasomatic rocks]. Moscow, Nedra, 1968, 364 p.

12. Kembriy Sibiri [Cambrian of Siberia]. Eds.: L. N. Repina, A. Yu. Rozanov. Novosibirsk, 1992, 135 p.

13. Kembriy Sibirskoy platformy. Kn. 1: Aldano-Lenskiy region [Cambrian of the Siberian platform. Book 1: Aldan-Lenskiy region]. Eds.: A. I. Varlamov, A. Yu. Rozanov, V. V. Khomentovskiy et al. Moscow, 2008, 298 p.

14. Kovalev K. R., Pertseva A. P., Buslenko A. I. Izotopnye issledovaniya v reshenii problem rudogeneza ozerninskogo rudnogo uzla [Isotope studies in solving the problems of ore genesis of the Ozerninsky ore cluster]. *Izotopnye issledovaniya protsessov rudoobrazovaniya*. Novosibirsk, 1991, pp. 56–83. (In Russian).

15. Konkin V. D., Donets A. I., Ruchkin G. V. Mineralogical-geochemical types and regional geological special characteristic of stratiform carbonate-hosted lead-zinc deposits. *National Geology*, 2018, no. 4, pp. 51–62. (In Russian).

16. Krainov S. R., Ryzhenko B. N., Cherkasova E. V. Geochemical prerequisites for the origin of subsurface chloride brines generating stratiform base-metal ore formations. *Geochemistry International*, 2005, no. 6, pp. 634–660. (In Russian).

17. Krainov S. R., Ryzhenko B. N., Cherkasova E. V. Hydrodynamic and geochemical conditions of the formation of stratiform Zn-Pb ore mineralization by chloride solutions. *Geochemistry International*, 2006, no. 4, pp. 298–425. (In Russian).

18. Kunts A. F. Gidrotermal'no-metasomaticheskoe rudoobrazovanie v karbonatnykh porodakh. Eksperimental'nye modeli i ikh prilozheniya [Hydrothermal-metasomatic ore formation in carbonate rocks. Experimental models and their applications]. Ekaterinburg, 2002, 334 p.

19. Kozlov G. A., Guzev V. E., Molchanov A. V., Terekhov A. V. Lithology and geochemistry of the Early Cambrian carbonate deposits in the SE Anabar-Sin region, the Republic of Sakha (Yakutia), and their implication to stratiform Pb-Zn mineralization. *Regional Geology and Metallogeny*, 2021, no. 86, pp. 31–44. (In Russian).

20. Lebedev L. M., Nikitina I. B. Osobennosti khimicheskogo sostava i rudonosnykh gidroterm Chelenkena [Peculiarities of the chemical composition and ore-bearing hydrotherms of Chelenken]. *Doklady Earth Sciences*, 1968, vol. 183, no. 2, pp. 439–442. (In Russian).

21. Levashov K. K. Srednepaleozoyskaya riftovaya sistema vostoka Sibirskoy platformy [Middle Paleozoic rift system in the east of the Siberian platform]. *Sovetskaya geologiya*, 1975, no. 10, pp. 49–58. (In Russian).

22. Masaytis V. L., Mikhaylov M. V., Selivanovskaya T. V. Vulkanizm i tektonika Patomsko-Vilyuyskogo srednepaleozoyskogo avlakogena [Volcanism and tectonics of the Patom-Vilyui Middle Paleozoic aulacogen]. Moscow, Nedra, 1975, 183 p.

23. Metasomatizm i metasomaticheskie porody [Metasomatism and metasomatic rocks]. Ex. eds. V. A. Zharikov, V. L. Rusinov. Moscow, Nauchnyy mir, 1998, 492 p.

24. Plyushchev E. V., Ushakov O. P., Shatov V. V., Belyaev G. M. Metodika izucheniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy [Methods of studying hydrothermal-metasomatic formations]. Leningrad, Nedra, 1981, 262 p.

25. Plyushchev E. V., Shatov V. V. Geokhimiya i rudonost' gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy [Geochemistry and ore content of hydrothermal-metasomatic formations]. Leningrad, Nedra, 1985, 247 p.

26. Plyushchev E. V., Shatov V. V., Kashin S. V. Metallogeniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy [Metallogeny of hydrothermal-metasomatic formations]. St. Petersburg, 2012, 559 p.

27. Ponomarev V. G., Vostroknutov E. P., Akimtsev V. A. *Ekspertnaya Sistema – instrument prognozirovaniya stratiformnogo polimetallicheskogo orudneniya* [Expert system – a tool for forecasting stratiform polymetallic mineralization]. Novosibirsk, 1991, 119 p.
28. Gorzhevskiy D. I., Konkin V. D., Donets A. I., Kuznetsov V. V., Solov'ev E. B. *Printsipy i metody postroeniya geologo-geneticheskikh modeley stratiformnykh svintsovo-tsinkovykh mestorozhdeniy v karbonatnykh i terrigenykh formatsiyakh* [Principles and methods of constructing geological and genetic models of stratiform lead-zinc deposits in carbonate and terrigenous formations]. *Geologo-geneticheskie modeli stratiformnykh mestorozhdeniy svintsa i tsinka*. Novosibirsk, 1991, pp. 5–41. (In Russian).
29. Kozlov G. A., Terekhov A. V., Guzev V. E., Solov'ev O. L., Khorokhorina E. I., Svetlova Yu. L. *Rudno-formatsionnaya prinadlezhnost' Pb-Zn-Mn orudneniya v rannekembriyskikh karbonatnykh otlozheniyakh Sinsko-Botomskoy strukturno-formatsionnoy zony, Respublika Sakha (Yakutiya)* [Ore-formational affiliation of Pb-Zn-Mn mineralization in the Early Cambrian carbonate deposits of the Sinsko-Botom structural-formation zone, Republic of Sakha (Yakutia)]. *Mineral'no-syr'evaya baza almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov – ot prognoza k dobyche: Sbornik tezisev dokladov II Molodezhnoy nauchno-obrazovatel'noy konferentsii*. Moscow, 2021, pp. 77–78. (In Russian).
30. Ruchkin G. V., Donets A. I. *Stratiformnye svintsovo-tsinkovye mestorozhdeniya v karbonatnykh tolshchakh* [Stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata]. Moscow, 2002, 124 p.
31. Shabanov Yu. Ya. (ed.) *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Kembriy Sibirskoy platformy. V 2 t. Vol. 1: Stratigrafiya* [Stratigraphy of Siberian oil and gas basins. Cambrian of the Siberian platform. In 2 volumes. Vol. 1: Stratigraphy]. Novosibirsk, 2016, 497 p.
32. Ponomarev V. G., Davydov Yu. V., T'shinskiy A. A. et al. *Stratiformnye svintsovo-tsinkovye mestorozhdeniya v otlozheniyakh venda Yugo-Vostochnoy Yakutii* [Stratiform lead-zinc deposits in the Vendian deposits of Southeastern Yakutia]. Novosibirsk, Nauka, 1979, 232 p.
33. Skripchenko N. S. *Gidrotermal'no-osadochnye polimetallicheskie rudy izvestkovo-slantsevykh formatsiy* [Hydrothermal-sedimentary polymetallic ores of lime-shale formations]. Moscow, Nedra, 1980, 215 p.
34. Parfenov L. M., Kuz'min M. I. et al. *Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya)* [Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]. Moscow, 2001, 571 p.
35. Khenor D. *Gidrotermal'nye flyuidy osadochnogo genezisa* [Hydrothermal fluids of sedimentary genesis]. *Geokhimiya gidrotermal'nykh rudnykh mestorozhdeniy*. Moscow, Mir, 1982, pp. 122–147. (In Russian).
36. Shirobokova T. I. *Stratiformnoe, polimetallicheskoe i baritovoe orudnenie Urala* [Stratiform, polymetallic and barite mineralization of the Urals]. Sverdlovsk, 1992, 140 p.
37. Leach L. D., Taylor R. D., Fey D. L., Diehl S. F., Saltus R. W. *A deposit model for Mississippi Valley-type lead-zinc ores*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey, 2010. 64 p.
38. White D. *Environment of generation of some base metal ore deposits*. *Economic Geology*, 1968, vol. 63, no. 4, pp. 301–335.

Козлов Глеб Александрович – аспирант, геолог, ВСЕГЕИ¹. <Gleb_Kozlov@vsegei.ru>

Кашин Сергей Васильевич – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <sergey_kashin@vsegei.ru>

Гузов Владислав Евгеньевич – инженер, ВСЕГЕИ¹. <Vladislav_Guzev@vsegei.ru>; аспирант, Санкт-Петербургский горный университет (СПГУ). 21-я линия, Васильевский остров, д. 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106. <s195007@stud.spmi.ru>

Молчанов Анатолий Васильевич – доктор геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ¹. <Anatoly_Molchanov@vsegei.ru>

Терехов Артем Валерьевич – канд. геол.-минерал. наук, зам. зав. отделом, ВСЕГЕИ¹. <Artem_Terekhov@vsegei>

Kozlov Gleb Aleksandrovich – Ph. D. Student, Geologist, VSEGEI¹. <Gleb_Kozlov@vsegei.ru>

Kashin Sergey Vasil'evich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI¹. <sergey_kashin@vsegei.ru>

Guzev Vladislav Evgen'evich – Geologist, VSEGEI¹. <Vladislav_Guzev@vsegei.ru>; Ph. D. Student, Saint-Petersburg Mining University (SPMU). 2 21st Line, St. Petersburg, Russia, 199106. <s195007@stud.spmi.ru>

Molchanov Anatoly Vasilyevich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI¹. <Anatoly_Molchanov@vsegei.ru>

Terekhov Artem Valerievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Head of the Department, VSEGEI¹. <Artem_Terekhov@vsegei>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.