

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

## 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

Обсуждаются новые данные о петрографических и геохимических особенностях карбонатных отложений юго-восточной части Анабаро-Синской структурно-формационной области. Впервые в пределах разреза тойонских отложений фации предрифового склона выявлены прямые и косвенные признаки синхронных седиментогенезу вулканогенной и эксгальционной деятельности. Результаты проведенных исследований позволяют использовать положительные геохимические аномалии Co, Pb, Zn, Ba и Mn в коренных породах, а также величины отношений HREE/LREE, Ce/Ce\* и Eu/Eu\* в качестве одного из поисковых критериев проявления стратиформного Pb-Zn оруденения в пределах Синско-Ботомской структурно-формационной зоны.

*Ключевые слова:* карбонатные отложения, геохимические особенности, палеогеодинамические реконструкции, свинцово-цинковые руды, стратиформное оруденение, месторождения миссисипского типа.

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

## 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

The paper presents new data of petrographic and geochemical features of carbonate deposits in the southeastern part of the Anabar-Sinsk basin. Direct and indirect signs of volcanogenic and exhalation activity synchronous to sedimentogenesis have been identified in the section of Toyonian deposits of the pre-reef slope facies for the first time. Results of the studies allow using positive geochemical Co, Pb, Zn, Ba and Mn anomalies, the values of the HREE/LREE, Ce/Ce\* and Eu/Eu\* ratios in bedrocks as a search criterion for the lead-zinc Mississippi-Valley-type mineralization within the Sinsk-Botomian Group.

*Keywords:* carbonate deposits, geochemical features, paleogeodynamic reconstructions, lead-zinc ore, stratiform mineralization, MVT.

*Для цитирования:* 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

**Введение.** Фациально-палеогеографическим реконструкциям ранне-среднекембрийского карбонатного бассейна южной части Сибирской платформы посвящено значительное количество публикаций [3; 6–8; 12–14; 16–18; 21–23]. Однако полученные авторами статьи новые данные по этому вопросу позволяют расширить и дополнить имеющиеся представления об истории развития и условиях осадконакопления этого сложного в геологическом отношении региона.

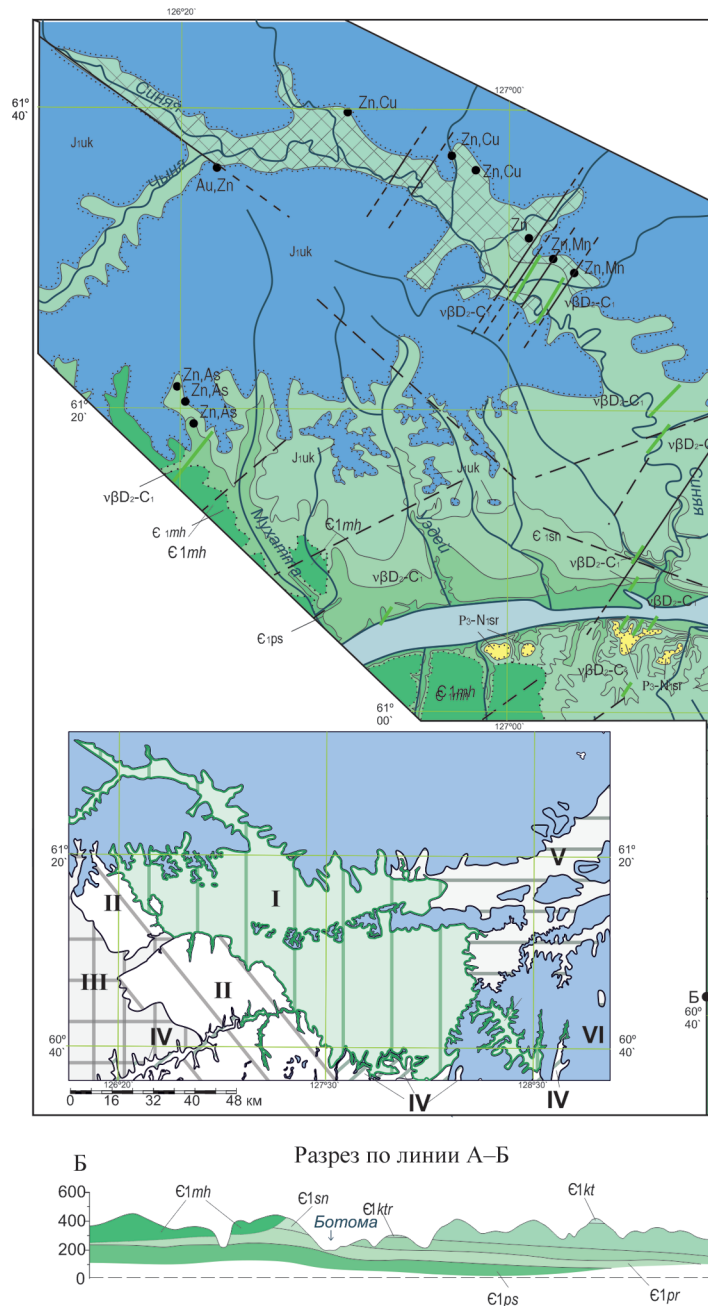
Основным структурным элементом районирования территории является уникальная в своем роде область развития рифовых построек, известная как Сахайская ограногенная полоса [6; 11; 13; 14], или Западно-Якутский барьерный рифовый комплекс [3; 4; 7; 12; 21]. Эти

комплексы считаются наиболее древними рифогенными образованиями юго-восточной части Сибирской платформы. Рассматриваемые в статье отложения фации предрифового склона объединяются в Синско-Ботомскую структурно-формационную зону (СФЗ). Со слагающими эти комплексы породами связаны рудопроявления стратиформной свинцово-цинковой минерализации в карбонатных толщах (Mississippi Valley Type – MVT-тип), одно из условий формирования которых – накопление рудного вещества в рудовмещающих карбонатных отложениях в рассеянном виде на стадии седиментогенеза [5], а одним из возможных источников вещества – проявления подводной эксгальционной деятельности и вулканизма.

**Материалы и методы.** При проведении литолого-геохимического изучения пород была использована методика диагностики карбонатных комплексов различных геодинамических обстановок, предложенная Е. Ф. Летниковой, Я. Э. Юдовичем и соавторами [9; 10; 19; 20]. Методика направлена на выявление условий осадконакопления карбонатных отложений и парагенетического типа источников сноса питающей провинции и хорошо зарекомендовала себя при изучении карбонатных отложений с незначительной долей нерастворимого остатка и терригенных примесей. В соответствии с этой методикой проводилось площадное геохимическое опробование коренных выходов и стратотипических разрезов таксономических единиц с их детальным литологическим изучением.

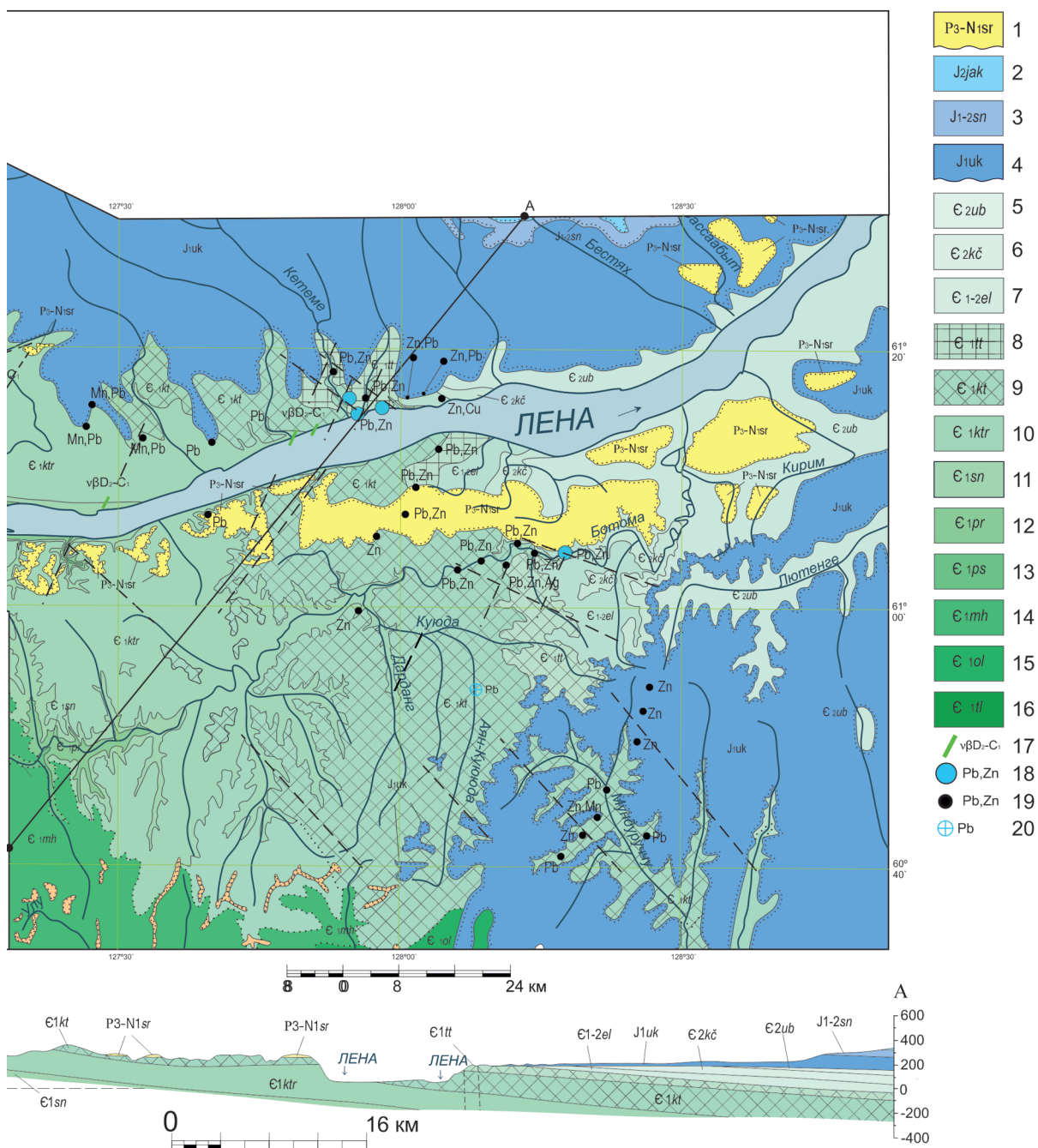
Микроскопическое исследование пород осуществлялось на оптическом микроскопе Leica DM2700P. Изучение состава тонкодисперсных карбонатных минералов произведено методом рентгеноструктурного фазового анализа на базе электронного микроскопа-микроанализатора модели MV 2300 с энергодисперсионным микроанализатором LINK Pentafet (Oxford Instx). В ЦЛ ВСЕГЕИ определялись химический состав пород рентгеноспектральным флуоресцентным (силикатным) методом (XRF), а микроэлементы и редкоземельные элементы – методом ICP-MS. Определение изотопного состава углерода и кислорода в карбонатных породах производилось на масс-спектрометре DELTA Plus в ЦИИ ВСЕГЕИ.

**Геологическое строение района работ.** Основу структурно-формационного районирования территории составляет полоса рифогенных отложений северо-восточного простирания. В пределах юго-восточной части Анабаро-Синской структурно-формационной области (СФО) дифференциация обстановок осадконакопления на зарифовые, рифовые и предрифовые происходит неравномерно, что обуславливает диахронность границ стратиграфических подразделений и внутриформационные различия [3; 13] (рис. 1). Развитие осадочного палеобассейна протекало в условиях глобальной трансгрессии [2; 3; 6; 13]. В раннеботомское время зарождающийся карбонатный риф постепенно проградировал в северо-восточном направлении. Соответственно, к северо-востоку и юго-западу от него формировались фации рифового склона (Синско-Ботомская СФЗ) и зарифовые мелководные отложения (Толбо-Мухаттинская СФЗ) [4; 17]. На юге площади в мелководно-морских условиях образовалась серия периодически затопляемых биогермных массивов при сохранении относительно активного водообмена с открыто-морским бассейном (Амгинская СФЗ) [4; 6; 13; 17]. В тойонское время на севере территории еще продолжал существовать рифовый массив, выполнявший роль структурного барьера, в то время как на юге области все большее развитие получали мелководные органогенно-обломочные фации. К амгинскому



времени они были распространены и на севере, и на юге территории. Судя по тесному соседству в разрезе этого возраста мергелей и водорослевых известняков, карбонатных алевролитов и песчаников, колебание уровня моря было значительным, пока к концу амгинского века обстановка в пределах площади не сменилась относительно глубоководным открыто-морским шельфом (Бестяхо-Мундуруччинская СФЗ) [3; 4; 17].

Внешняя зона карбонатных рифогенных отложений Синско-Ботомской СФЗ характеризуется выдержанным стратифицированным разрезом (рис. 2). Отложения формировались во временном интервале от томмотского яруса нижнего кембрия до аюсокканского яруса среднего кембрия. В томмотское и атдабанское время в пределах рассматриваемой территории образовалась



**Рис. 1.** Карта геологического строения северо-восточной части Приленской минерагенической области; схема фациального зонирования кембрийских отложений Анабаро-Синской СФО (на основе данных [4], (С. Д. Костюк и др., 1989) с авторскими дополнениями)

На врезке: I – мелководные известково-карбонатные отложения, фации предрифового передового склона (Синско-Ботомская СФЗ); II – рифогенные отложения, фации погруженного рифа, рифа-волнолома (Мухаттинская СФЗ); III – солеродно-лагунные внутриконтинентальные отложения с ограниченным водообменом, ближние зарифовые фации (Малыканская СФЗ); IV – мелководно-морские известково-карбонатные отложения переходного типа, шельфовые фации со свободным отложением, редко рифогенные фации (Амгинская СФЗ); V – карбонатно-глинистые отложения, открыто-морские фации шельфа (Бестяхо-Мундуручинская СФЗ); VI – юрские терригенные отложения.

I – ранний палеоген: кырбыканская толща; 2–4 – ранне-среднеюрские терригенные отложения: 2–4 – свиты: якутская (2), сунтарская (3), укугутская (4); 5, 6 – среднекембрийские отложения свит: 5 – усть-ботомской и 6 – кычикской; 7 – ранне-среднекембрийские отложения: еланская свита; 8–16 – раннекембрийские отложения: 8 – титаринская свита, 9 – кетеманская свита, 10 – куторгиновая свита, 11 – синская свита, 12 – переходная свита, 13 – пестроцветная свита, 14 – мухаттинская свита, 15 – олёмминская свита, 16 – тулмудурская свита; 17 – дайки долеритов чаро-синского комплекса; 18 – рудопроявления полезных ископаемых и их индексы; 19 – пункты минерализации полезных ископаемых и их индексы; 20 – шлиховые аномалии свинца

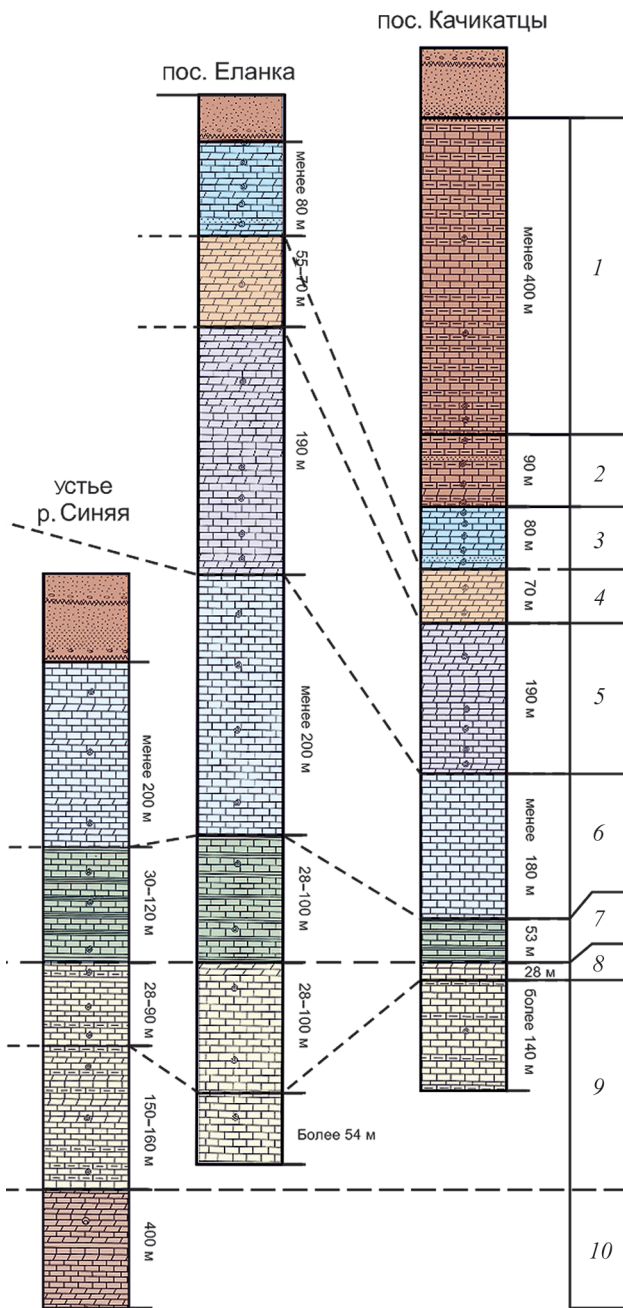


Рис. 2. Стратиграфическая колонка, изображающая разрез карбонатных отложений Синско-Ботомской СФЗ в восточной, центральной и западной областях распространения отложений (по данным [4] с авторскими дополнениями)

1 – усть-ботомская свита, переслаивание глинистых известняков и мергелей; 2 – кычикская свита, известняки рифогенные, в основании песчаники известковые; 3 – еланская свита, доломиты, известняки массивные, песчаники известковые; 4 – титаринская свита, эпигенетические доломиты, известняки; 5 – кетеменская свита, доломиты массивные, слоистые пористые, кавернозные, известняки слоистые и массивные, прослои вулканогенных пород; 6 – куторгиновая свита, известняки и доломиты битумнозные; 7 – синская свита, известняки битумнозные, сланцы глинистые; 8 – переходная свита, известняки глинистые, доломиты; 9 – пестроцветная свита, известняки глинистые пестроокрашенные; 10 – юдомская свита

выраженная пестроцветная толща переслаивания известняков и мергелей, объединяемая в *пестроцветную свиту*. В ботомское время здесь формируются глинистые известняки и доломиты *переходной свиты*, битуминозные сланцеватые аргиллиты, известняки и органогенно-обломочные породы *синской свиты*, слабобитуминозные известняки *куторгиновой свиты*. Отложения тойонского яруса представлены толщей известняков, доломитизированных известняков и массивных доломитов *кетеменской* и *титаринской свит*. В конце тойонского века раннего кембрия и начале амгинского века среднего кембрия на площади возникают органогенно-обломочные известняки и доломиты, карбонатные брекчии, известковые песчаники и алевролиты *еланской свиты*. К концу амгинского века территория представляет собой открыто-морской бассейн с некомпенсированным прогибанием, в пределах которого формируются известняки, реже доломиты, мергели и карбонатные алевролиты *кычикской свиты* и ритмичные известково-глинистые отложения *усть-ботомской свиты*.

С минерагенической точки зрения основной интерес представляют кетеменская и титаринская свиты, являющиеся рудовмещающими для свинцово-цинкового стратиформного оруденения.

*Кетеменская свита* ( $E_1kt$ ) согласно залегает на породах куторгиновой свиты. Распространена на лево- и правобережье рек Ботомы и Лена, а также в верховьях р. Мундуруччу. Стратотипический разрез расположен на левом берегу р. Лена во вдольбереговом скальном выходе у пос. Тит-Ары. Свита обладает выдержанным составом с преобладанием тонкозернистых известняков, редко массивно-плитчатых, серых, голубовато-серых в чередовании или тонком переслаивании с желтыми, буро-желтыми до коричневого мелко-среднезернистыми, пористо-кавернозными доломитами. Доломиты формируют слои различной мощности, толщиной от первых сантиметров до 6,3–6,8 м. Фациальные изменения заключаются в увеличении мощности доломитов в юго-восточном направлении.

Также в пределах долины р. Лена в кровельной части зафиксированы горизонты интенсивно выветрелых вулканических пород. Автором они наблюдались в коренном залегании в кровельной части разреза свиты на водоразделе рек Кетеме и Куччугуй-Кетеме, а также в виде деллювиальных шлейфов на правобережье р. Кетеме и левобережье р. Куччугуй-Кетеме. Мощность прослоев не превышает первых метров. Породы представляют собой темно-коричневые, светло-черные порфириформные пористые и кавернозные породы. Реликты порфириформных кристаллов сложены светло-белой глинистой массой. Мощность стратотипического разреза составляет 158 м. К востоку от него скважинами вскрыт разрез мощностью 50–55 м у пос. Качикатцы и у устья р. Лютенге.

*Титаринская свита* ( $E_1tt$ ). Залегает согласно на породах кетеменской свиты. Распространена

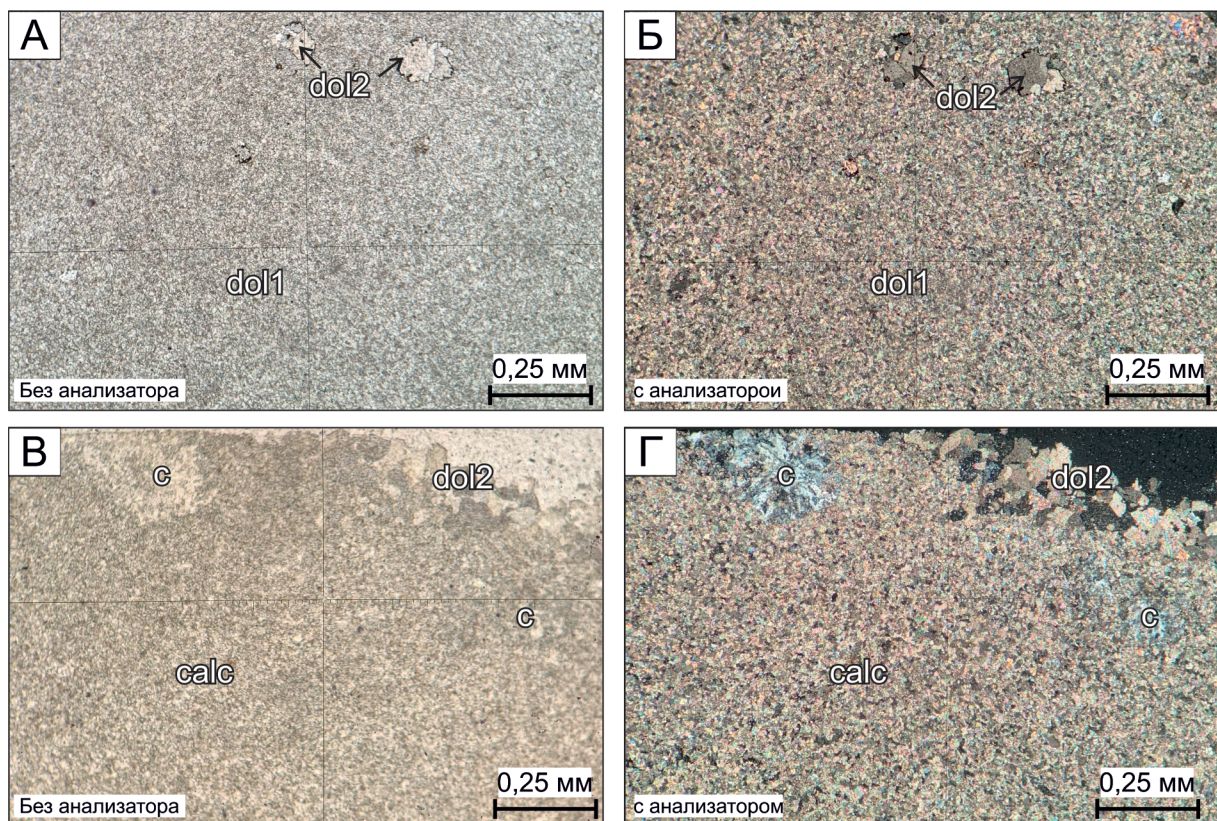
на лево- и правобережье рек Лена и Ботома. Стратотипический разрез расположен на левобережье р. Лена у пос. Еланка, в 8,5 км ниже устья р. Кетеме. Основная часть разреза сложена желто-серыми, бурыми до коричневого, пятнистыми разномасштабными массивными тонкослоистыми разноплитчатыми интенсивно пористыми и кавернозными доломитами. В кровельной части свиты отмечены слои доломитов зеленовато-серых с глауконитом мощностью 2,5 м и слой чередования доломитов и известняков светло-серых и белых, похожих на нижележащие известняки кетеменской свиты, мощностью 8,4 м. Суммарная мощность стратотипического разреза составляет 69 м.

**Петрографическая характеристика пород.** Литологический состав отложений тойонского яруса достаточно однообразен.

*Пелитоморфные известняки* распространены в нижней и верхней частях разреза тойонских отложений. Они представлены плотной массой аллотриоморфно-зернистого кальцита размером менее 0,005 мм (рис. 3). Оттенок пород в шлифе светло-желтый, серо-желтый. Из аксессуарных минералов присутствуют кристаллокласты кальцита с размерами от 0,005 до 0,1 мм. Содержание их в породе невелико и редко превышает 2–3 %. Для отложений кетеменской свиты характерно присутствие сферолитовых агрегатов

халцедоновидного кварца, равномерно распределенных в породе. Как правило, эти образования имеют хорошо выраженную округлую, реже эллипсоидную, гантелевидную до неправильной форму. Размеры таких образований варьируются от 0,01 до 0,05 мм, достигая 1–4 см. Реже отмечается выполнение халцедоновидным кварцем межзернового пространства в известняках в пределах незначительной зоны площадью в несколько квадратных миллиметров.

*Тонко-мелкозернистые доломиты* распространены в нижней части разреза тойонских отложений и петрографически схожи с пелитоморфными известняками. Они представлены сплошной, реже неяснослоистой массой тонко- и мелкозернистого гипидиоморфно-зернистого доломита размерами от 0,005 до 0,05 мм (рис. 3). Форма выделения зерен таблитчатая, реже изометричная, формирующая нечеткую мозаичную структуру. Для данного типа пород характерны те же примесные и аутигенные минералы, что и для пелитоморфных известняков. Наблюдаются кристаллокласты кальцита, как правило, размером не более 0,1 мм с содержанием в породе не более 1–2 %, редкие единичные зерна молочно-белого окатанного кварца алевритовой размерности, значительно реже алевритовые зерна полевого шпата и глауконита, а также кремнистые стяжения, аналогичные таковым в пелитоморфных известняках. Примесь глинистого вещества, равномерно



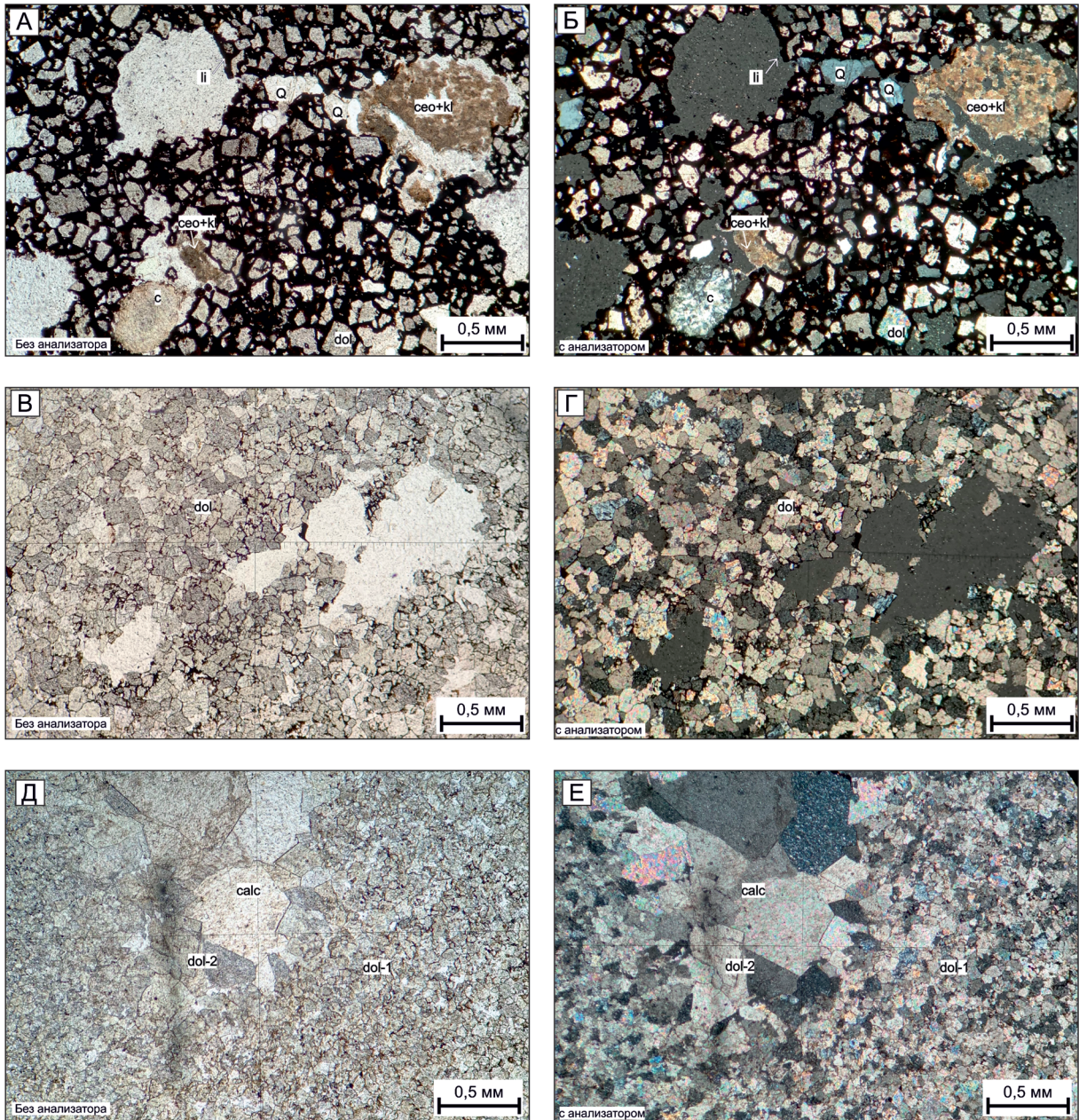
**Рис. 3.** Микрофотографии шлифов карбонатных пород титаринской и кетеменской свит Синско-Ботомской СФЗ. А, Б – мелкозернистые диагенетические доломиты; В, Г – пелитоморфные известняки; dol – доломит (цифрами обозначены разные генерации); calc – кальцит

распределенного по породе, незначительна и не превышает долей процента.

*Мелко-среднезернистые доломиты* обладают эпигенетической природой. Они формируются по массивным пелитоморфным известнякам, слагая кровельную часть разреза кетеменской и большую часть разреза титаринской свиты, и представлены массивной или тонкослоистой массой гипидиоморфно-зернистых кристаллов доломита ромбического облика размерами от 0,1 до 0,5 мм, формирующих мозаичную структуру (рис. 4). Текстуры породы массивные, в объеме кетеменской свиты часты яснослоистые, выраженные

размерностью зерен доломита. Кристаллы конформно-зернистые, редко зональные. Грани кристаллов, в особенности мелкозернистых, зачастую интенсивно корродированы с образованием сплошного сетчатого коррозионного цемента из бурого железистого вещества. Одна из отличительных черт данных пород – интенсивная кавернозность.

В зависимости от выполнения каверн выявляются три литотипических разновидности. Для первой характерны полые каверны, инкрустированные поздними скаленоэдрическими шестоватыми зёрнами доломита размерами от 0,01 до



**Рис. 4.** Микрофотографии шлифов эпигенетических доломитов и выветрелых вулканических образований в верхней части разреза кетеменской свиты Синско-Ботомской СФЗ (левобережье р. Лена, устье р. Куччугуй-Кетеме)

*А, Б* – измененные вулканические образования; *В, Г* – кавернозные эпигенетические доломиты; *Д, Е* – кальцитизированные эпигенетические доломиты с кристификационными зёрнами доломита; dol – доломит (цифрами обозначены разные генерации); calc – кальцит; Q – кварц; c – халцедон; seo + kl – цеолит + каолин; li – лимонит

0,1 мм. Для второй – *кальцитизированных эпигенетических доломитов* – свойственно выполнение пустот мелко-среднезернистыми до крупнозернистыми шестоватыми кристаллами кальцита, часто в сочетании с секущими напластование кальцитовыми жилами (рис. 4). Для третьего литотипа – *джаспероидизированных эпигенетических доломитов* – выполнения каверн и пустот коломорфными образованиями халцедоновидного кварца, иногда со сфероидальной структурой при подчиненном значении крустификационных зерен доломита. Часто внутренние и внешние полости агрегатов халцедона выполнены друзовыми мелкозернистыми зернами кварца. Кальцитизированные разновидности преобладают в кровельной части коренных выходов как кетеменской, так и титаринской свит. Джаспероидизированные разновидности распространены в средней и нижней частях разреза титаринской свиты, в особенности в пределах нижнего течения р. Ботома. По отношению к массивным доломитам эти разновидности имеют подчиненное значение. Группа пород переходного типа со слабопроявленной эпигенетической доломитизацией рассматривается как отдельный литотип *доломитизированных известняков*.

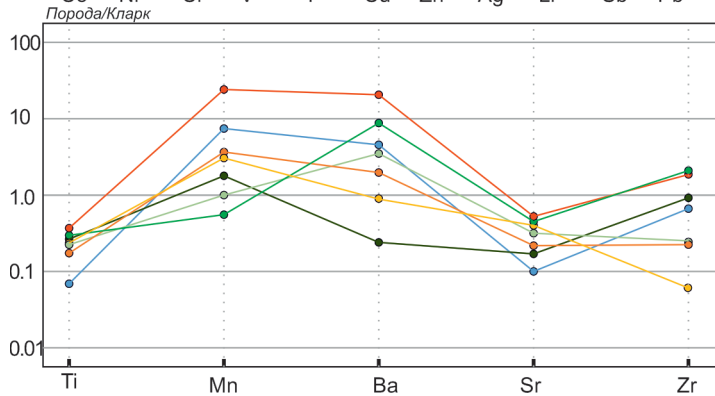
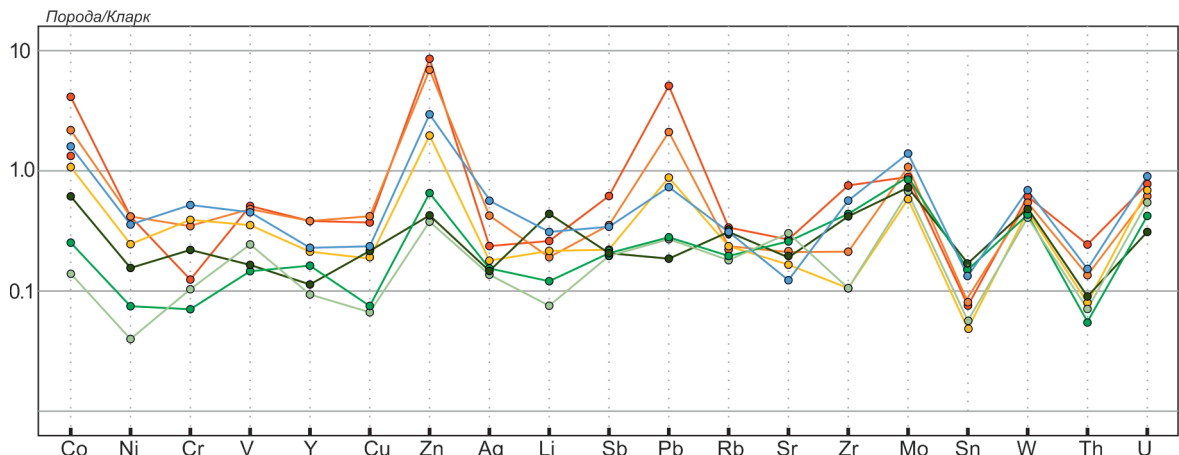
*Гипергенезированные вулканические породы* проблемного генезиса определялись предшественниками как выветрелые гиалобазальты и «криптокарбонатиты» девонского или триасового возраста (С. Д. Костюк и др., 1989). Они подвержены интенсивному гипергенному преобразованию, а петрографические особенности указывают на предшествующий гипергенезу низкотемпературный пропилит-цеолитовой метасоматоз и доломитизацию. Порода представляет собой сплошную массу бурого, аморфного железистого вещества, цементирующего реликты порфирированных кристаллов, предположительно плагиоклаза и пироксена, определить состав которых не представляется возможным. В породе распространены гипидиоморфно-зернистые мелко-среднезернистые кристаллы доломита, наблюдаются зональные сферолитоподобные тонкочешуйчатые агрегаты цеолита, частично замещенного и пегментированного глинистым веществом, приуроченного к крупным пустотам в тесной ассоциации с каолином. Среди обломков хорошо идентифицируются слабоокатанные агрегаты и кристаллокласты мелкозернистого молочно-белого кварца, реже сферолиты халцедона. Породы интенсивно пористые и кавернозные. Структурно-вещественные особенности позволяют определять их как интенсивно измененные гиалобазальты (рис. 4).

**Литолого-геохимическая характеристика карбонатных отложений кетеменской и титаринской свит.** Особенностью геохимических исследований карбонатных пород является малая информативность отношений петрогенных элементов и системы генетических модулей [9; 20], широко применяемых при изучении терригенных

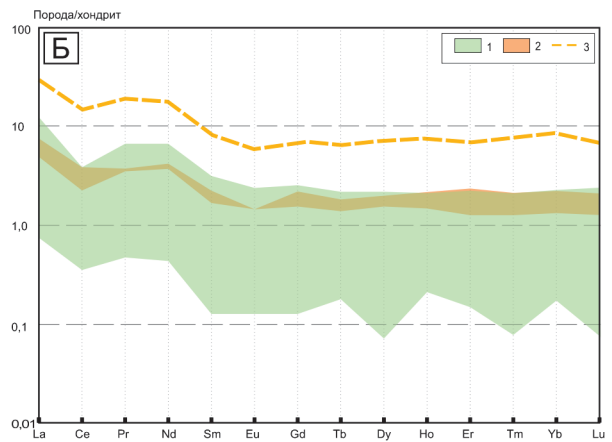
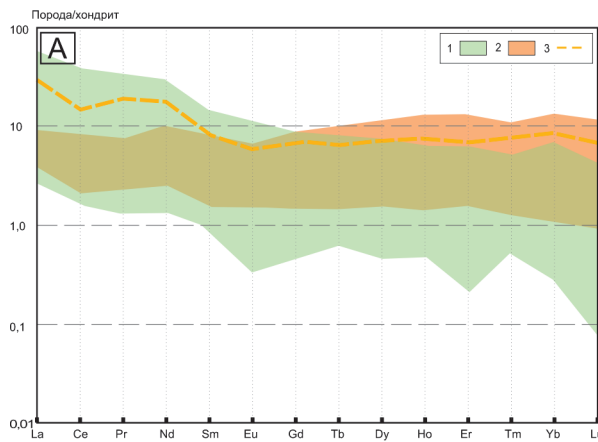
и вулканогенно-осадочных отложений. Для геохимического исследования карбонатных отложений была использована характеристика распределения типоморфных (Ti, Mn, Zr, Sr, Ba) и редкоземельных элементов, позволяющих охарактеризовать условия накопления карбонатного осадка и пути его транспортировки в бассейн осадконакопления, а также рассеянных элементов, отражающих состав петрофонда питающей провинции [9; 10; 19; 20]. Всего измерялись содержания 30-ти рассеянных элементов, однако информативными оказались концентрации только 17: Li, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Pb, V, Cr, Rb, Y, Nb, Mo, Sn, W, Th и U. При изучении спектров распределения типоморфных и примесных элементов геохимические данные нормировались на кларковые значения в карбонатных породах по А. А. Беусу [1], (А. И. Перельман, 1989). Спектры распределения редкоземельных элементов нормировались на хондриты CI. Геохимическое опробование пород тойонского яруса, как потенциально рудоносных, проводилось детально на трех участках: на левобережье р. Лена, реках Ботома и Мундуруччу. В выборку не включались околорудные и оруденелые доломиты и известняки, а также интенсивно окисленные и в значительной степени джаспероидизированные разновидности осадочных пород.

На рис. 5 приводится характеристика распределения концентраций типоморфных и рассеянных элементов в зависимости от литологического состава пород. Установлено, что диагенетические мелкозернистые доломиты значительно обеднены рассеянными элементами. Для пелитоморфных и доломитизированных известняков, эпигенетических доломитов, а также их кальцитизированных и слабоджаспероидизированных разновидностей наблюдается схожий характер наклона фигуративных линий. Пелитоморфные известняки обладают близкларковыми концентрациями Zn и Mo и резким обеднением остальными рассеянными элементами. Эпигенетические доломиты характеризуются ярко выраженным обогащением Co, Zn, Pb и Mo при резком обеднении Sr, Ni, Sn и Th. Схожий наклон фигуративных линий установлен для выветрелых вулканических образований в кровельной части разреза кетеменской свиты при более выраженном обогащении данных пород рассеянными элементами.

Характер распределения типоморфных элементов также различен и для выделяемых литотипов пород (рис. 5). Пелитоморфные известняки и их слабодоломитизированные разновидности обладают пониженными концентрациями Ti, Zr, Sr при близкларковых концентрациях Mn и повышенной концентрации Ba. Диагенетические доломиты характеризуются повышенными значениями концентраций Mn при резком обеднении Ti, Ba, Sr и Zr, а эпигенетические доломиты – схожим наклоном фигуративных линий для всех литотипических разновидностей. Для них свойственно выраженное обогащение пород Mn и Ba, слегка затушеванное для



**Рис. 5. Распределения типоморфных и рассеянных элементов в раннекембрийских карбонатных отложениях кетеменской и титаринской свит Синско-Ботомской СФЗ**  
 1 – выветрелые вулканические породы; 2 – эпигенетические доломиты; 3 – кальцитизированные эпигенетические доломиты; 4 – доломитизированные известняки; 5 – пелитоморфные известняки; 6 – диагенетические доломиты; 7 – джаспероидизированные эпигенетические доломиты



**Рис. 6. Характер распределения спектров редкоземельных элементов в раннекембрийских карбонатных отложениях кетеменской и титаринской свит Синско-Ботомской СФЗ**

*А* – пробы с левобережья р. Лена; *Б* – пробы с нижнего течения рек Ботома и Мундуруччу. 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 рек Лена – 9:15 и Ботома – 2:21

кальцитизированных разностей, при обеднении Ti, Sr и Zr.

Концентрация REE и характер их фракционирования не зависит от состава пород, но имеет четкие различия для разных участков распространения свит (рис. 6). Сумма содержаний редкоземельных элементов ( $\Sigma$ REE) для пород в пределах долины р. Лена варьируется от 4,42 до 88,52 г/т, в среднем составляя 20,75 г/т. На спайдер-диаграммах видно, что по характеру распределения

REE в долине р. Лена выявляются два типа пород. Для первого свойствен пологий угол наклона фигуративных линий с обогащением пород HREE, в том числе с аномально низкими значениями отношения HREE/LREE 1,49–2,95. Для второго типа – крутой угол наклона фигуративных линий с отношениями HREE/LREE более 4,0. Для пород характерна преимущественно отрицательная европиевая аномалия со значениями Eu/Eu\* от 0,35 до 1,22, в среднем



составляя 0,67. Интересно поведение цериевой аномалии. Значения  $Ce/Ce^*$  варьируются от 0,62 до аномально высоких значений 2,41, в среднем составляя 0,98. Повышенные значения европиевой и цериевой аномалий коррелируются друг с другом.

В то же время карбонатные породы долины р. Ботома и Мундуроччу содержат  $\Sigma REE$  от 1,75 до 95 г/т, но в среднем их концентрация составляет 10,7 г/т. Здесь преобладают породы с крутым наклоном фигуративных линий (19 проб из 21) и значительным обогащением LREE (среднее отношение HREE/LREE – 1:6,2). Значения европиевой аномалии варьируются от 0,13 до 0,61, в среднем 0,33, а цериевой аномалии – от 0,28 до 1,11, в среднем 0,64. Различия, как видно, весьма существенны, хотя описанные выше разрезы разделяет расстояние всего 30 км.

**Геохимическая характеристика тойонских отложений в общей структуре ранне-среднекембрийского разреза Синско-Ботомской СФЗ.** Литолого-геохимические особенности пород тойонского

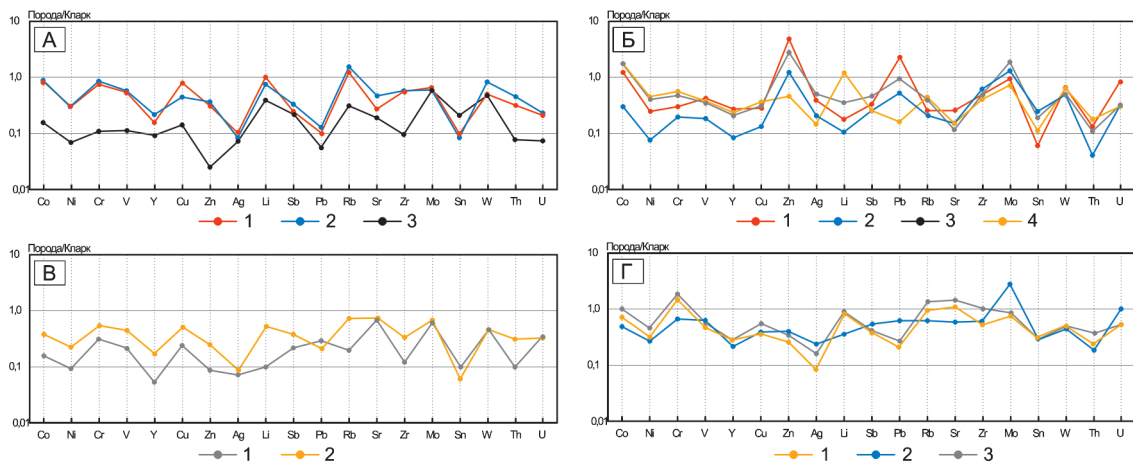
яруса с точки зрения моделирования условий осадконакопления и источника вещества могут быть полноценно отражены только в сравнении с особенностями всего разреза предрифтового склона (табл. 1). Установлено, что рассматриваемые породы Синско-Ботомской СФЗ в значительной степени обеднены рассеянными элементами, концентрация которых варьируется на уровне 0,2–0,7 кларковых значений (рис. 7). Локальные особенности состава пород обусловлены фаціальными условиями осадконакопления. Так для пород пестроцветной, переходной синской, а также кычкской и усть-ботомской свит, в составе которых значительный объем составляют известняки и другие кальциевые породы, характерны близкларковые концентрации Li и Rb, в то время как имеющие в составе значительную примесь доломитовой составляющей отложения кетеменской, титаринской и еланской свит ими обеднены. Обращает на себя внимание и постепенное увеличение концентрации Sr вверх по разрезу, и аномальное обогащение пород еланской свиты Mo. Заметим, что резкое обогащение

Таблица 1

Геохимическая специализация карбонатных отложений Синско-Ботомской СФЗ

Элементы	Пестроцветная свита	Переходная свита	Чуранская и нохойской толщи	Синская свита	Куртинговая свита	Кетеменская свита (Ботома)	Кетеменская свита (Лена)	Кетеменская свита (Мундуроччу)	Титаринская свита	Еланская свита	Кычкская свита	Усть-Ботомская свита
Co	0,90	0,85	0,16	0,38	0,16	0,31	1,25	1,74	1,72	0,50	0,74	1,06
Ni	0,30	0,31	0,07	0,23	0,09	0,08	0,25	0,46	0,42	0,27	0,32	0,49
Cr	0,86	0,75	0,11	0,56	0,31	0,20	0,31	0,58	0,49	0,70	1,53	1,92
V	0,57	0,54	0,11	0,44	0,22	0,19	0,42	0,38	0,36	0,65	0,50	0,57
Y	0,22	0,16	0,09	0,17	0,05	0,09	0,28	0,24	0,22	0,22	0,29	0,30
Cu	0,44	0,82	0,14	0,50	0,24	0,13	0,29	0,37	0,32	0,38	0,38	0,56
Zn	0,37	0,32	0,03	0,25	0,09	1,27	4,94	0,47	2,82	0,42	0,27	0,35
Ag	0,09	0,10	0,07	0,09	0,07	0,21	0,40	0,15	0,51	0,24	0,09	0,17
Li	0,76	1,00	0,40	0,54	0,10	0,11	0,18	1,23	0,36	0,36	0,87	0,91
Sb	0,32	0,25	0,22	0,39	0,22	0,27	0,34	0,26	0,48	0,55	0,40	0,44
Pb	0,13	0,10	0,06	0,22	0,29	0,54	2,27	0,16	0,98	0,63	0,21	0,28
Rb	1,54	1,23	0,32	0,72	0,20	0,22	0,26	0,45	0,41	0,66	0,97	1,42
Sr	0,48	0,28	0,19	0,75	0,67	0,15	0,26	0,15	0,12	0,61	1,13	1,53
Zr	0,57	0,55	0,10	0,33	0,12	0,62	0,23	0,41	0,50	0,60	0,53	1,02
Mo	0,60	0,66	0,60	0,68	0,60	1,35	0,97	0,74	1,90	2,75	0,79	0,91
Sn	0,08	0,10	0,21	0,06	0,10	0,25	0,06	0,12	0,19	0,31	0,33	0,31
W	0,83	0,49	0,47	0,47	0,47	0,52	0,66	0,64	0,54	0,47	0,51	0,51
Th	0,46	0,33	0,08	0,31	0,10	0,04	0,14	0,18	0,11	0,19	0,25	0,37
U	0,23	0,21	0,07	0,33	0,35	0,34	0,88	0,32	0,32	1,01	0,56	0,53
Кол-во проб	25	8	5	7	5	51	14	11	20	6	13	22

Примечание: Значения нормированы относительно кларка в карбонатных породах по Беусу [1], (А. И. Перельман, 1989). Красным цветом отмечено обеднение пород элементом менее 0,5 кларка концентрации, зеленым – обогащение пород элементом выше 1,0 кларка концентрации.



**Рис. 7. Геохимическая специализация ранне-среднекембрийских карбонатных пород изученных свит Анабаро-Синской СФЗ**

Свиты: **А:** 1 – пестроцветная, 2 – переходная, 3 – чуранская и нохоройская толщи; **Б:** 1 – кетеменская, левобережье р. Лена, 2 – кетеменская, нижнее течение р. Ботома, 3 – кетеменская, верховья р. Мундуруччу, 4 – барылайская; **В:** 1 – синская, 2 – курторгиновая; **Г:** 1 – кычикская, 2 – еланская, 3 – усть-ботомская

пород Pb, Zn и Co характерно только для отложений кетеменской и титаринской свиты тойонского яруса. Стоит отметить и резкое несовпадение спектров распределения рассеянных элементов в породах кетеменской свиты в пределах долин рек Лена и Ботома с таковым в породах участка в верховьях р. Мундуруччу. На графике также приведены данные о концентрациях рассеянных элементов в фациальном аналоге кетеменской свиты – барылайской свиты Амгинской СФЗ, сформировавшейся в условиях мелководной рифовой банки. Спектры для пород барылайской свиты и проб с верховья р. Мундуруччу идентичны, что указывает на принадлежность данных частей выходов свиты к Амгинской СФЗ.

**Обсуждение результатов.** Выявленные особенности распределения типоморфных и рассеянных элементов согласуются с представлениями о формировании пород в условиях пассивной континентальной окраины шельфа древней платформы. Высокие концентрации марганца в породах свидетельствуют о гумидности климата и формировании отложений в пределах неглубокого шельфа, где данный элемент осаждался на окислительном геохимическом барьере. Пониженные концентрации стронция объясняются существенно доломитовым составом пород, особенно в верхней части разреза, а также воздействием инфильтрационных атмосферных вод на агрегаты карбонатных минералов. Обогащение известняков барием относительно диагенетических доломитов может быть связано с тем, что этот элемент не формирует собственных карбонатных минералов и приурочен к нерастворимому остатку и глинистой фракции, содержание которой выше в известняках. Также, исходя из геологических предпосылок, это указывает на то, что доломиты в южной части развития отложений формировались на меньших глубинах относительно центральной части выходов на

р. Лена. Пониженная концентрация Ва в эпигенетических доломитах может быть связана с его перераспределением и концентрацией в оруденелых породах [9; 19; 20].

Характер фракционирования изотопов  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в породах представлен в табл. 2. Данные свидетельствуют о том, что эпигенетические доломиты в значительной степени наследовали геохимические особенности исходных пелитоморфных известняков. В среднем карбонаты имеют несколько облегченный, но практически не утяжеленный углерод и формировались в пределах вод нормальной солености при гумидном климате и повышенной температуре морской воды. Пониженные значения  $\delta^{18}\text{O}$  указывают, скорее всего, не на пониженную соленость вод бассейна, а длительный контакт пород с инфильтрационными опресненными водами, что согласуется с пониженной концентрацией стронция. Слабоповышенные значения  $\delta^{18}\text{O}$  в доломитах объясняются влиянием рассольного катагенеза в позднедевонско-раннекаменноугольное время [19].

Особенности распределения рассеянных элементов для ранне-среднекембрийского разреза Синско-Ботомской СФЗ позволяют моделировать положение территории в дистальной части бассейна осадконакопления на значительном удалении от континентального источника сноса. Это хорошо согласуется с представлениями о палеогеографии ранне-среднекембрийского карбонатного бассейна Сибирской платформы. Данный период считается этапом глобальной трансгрессии и таллосократического максимума [2; 3; 6; 8; 12–15; 17]. В таких обстановках влияние континентального сноса в качестве источника поступления вещества в осадок отсутствовало. Возможными источниками вещества остаются органогенное осадконакопление и подводный вулканизм, а также эндогенный привнос вещества в постседиментационный период.

Таблица 2

## Характер фракционирования изотопов О и С в карбонатных породах Синско-Ботомской СФЗ

Шифр пробы	Свита	Порода	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰, PDB *	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰, SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰, PDB
6950-1	Титаринская свита	Джаспероидизированный доломит	0,3	24,2	-3,3
6939	Кетеменская свита	Доломит диагенетический	-0,1	24,2	-3,3
6944	Кетеменская свита	Доломит эпигенетический	0,6	23,6	-3,7
6928	Титаринская свита	Доломит эпигенетический	1,1	24,5	-3,2
6935	Титаринская свита	Доломит эпигенетический	-0,9	23,6	-3,6
6931A	Кетеменская свита	Доломит эпигенетический кальцитизированный	-0,5	23,0	-4,0
6932	Кетеменская свита	Доломит эпигенетический кальцитизированный	0,2	23,6	-3,6
69181/1	Кетеменская свита	Известняк доломитизированный	-0,6	23,0	-4,0
69181/4	Кетеменская свита	Известняк доломитизированный	-0,1	23,3	-3,8
6941	Кетеменская свита	Известняк доломитизированный	-0,2	23,9	-3,5
6963	Еланская свита	Известняк доломитизированный	0,3	23,4	-3,7
6945	Кетеменская свита	Известняк микритовый	-0,5	23,0	-3,9
69194/2	Кетеменская свита	Известняк микритовый	-0,7	23,6	-3,7
6957	Титаринская свита	Известняк микритовый	-0,2	23,0	-4,0
6960	Титаринская свита	Известняк микритовый	-0,1	22,8	-4,1

\* Красным цветом отмечены пониженные значения  $\delta^{13}\text{C}$ , ‰, PDB, зеленым – повышенные значения.

Косвенные и прямые признаки именно вулканического привноса избыточных элементов на стадии седиментогенеза ярко проявлены в отложениях тойонского яруса. Литологические признаки процесса – обогащение пород кремнистым материалом и наличие в разрезе реликтов вулканических образований. Впрочем, структура и минеральный состав пород настолько затуханы постседиментационными процессами, что природа их дискуссионная. Геохимические признаки гидротермальной и вулканической деятельности в пределах площади более разнообразны.

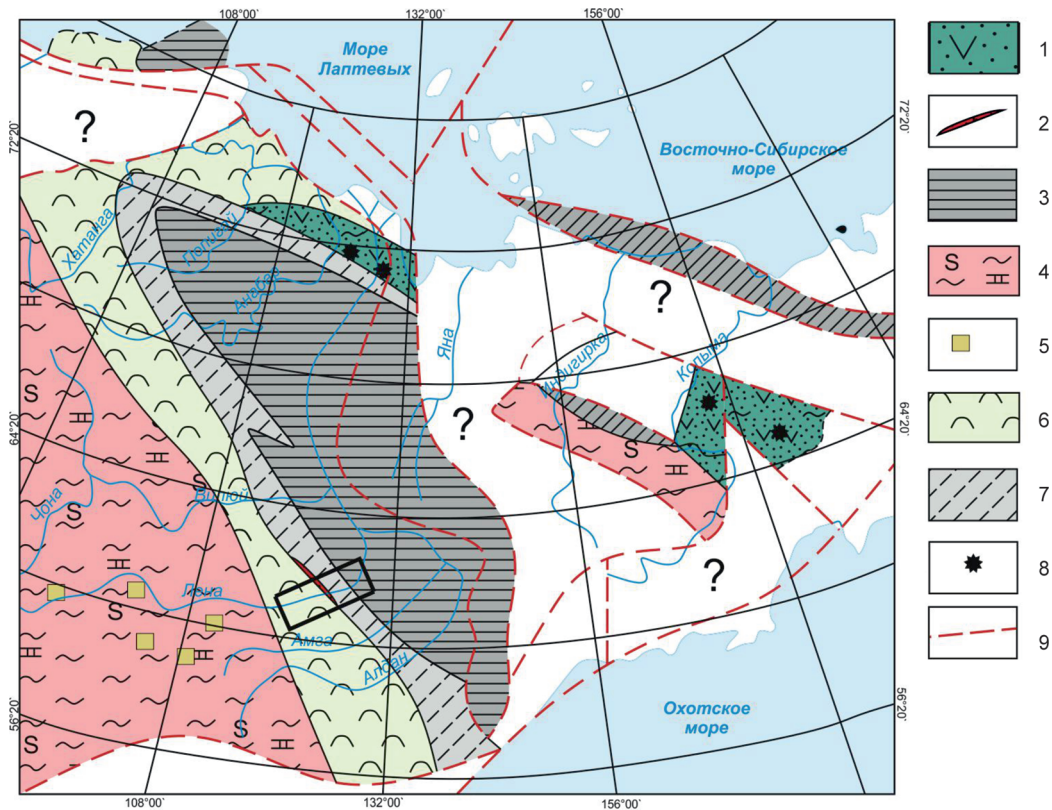
Во-первых, это устойчивая ассоциация Mn, Pb, Zn и Ag при повышенной концентрации Co и Ba в карбонатных породах, типичная для осадочных бассейнов с основным источником петрофонда питающей провинции или с синхронными осадконакоплением проявлениями вулканических и эксгалационных процессов. Важно и то, что свинец, например, формирует соли, плохо растворимые в морской воде, и содержится в ней в весьма незначительных количествах. В бассейн осадконакопления он попадает преимущественно за счет вулканической активности или размыва кислых пород, но последнее в пределах бассейна не являлось возможным [9; 19; 20].

Во-вторых, признаком вулканической активности является обогащение карбонатных пород HREE. При этом наблюдается значительное различие величины отношений HREE/LREE в карбонатных породах в районе рек Лена, Ботома и Мундуруччу и резкое увеличение концентрации  $\Sigma\text{REE}$  в породах в северо-восточном направлении к участку распространения вулканических образований. Большой части опробованных пород свойственно отношение HREE/LREE выше 1:4, что соответствует характеристикам пород южного

обрамления Сибирской платформы, сформированных в обстановках задугового бассейна и отложений океанических островов [10; 20].

В-третьих, на наличие синхронных осадконакоплению вулканических процессов указывают не типичные для карбонатного эпиконтинентального бассейна значения европиевой и цериевой аномалий. Положительные значения Eu/Eu\* характерны для карбонатного разреза свит в пределах долины р. Лена в ассоциации с полями выходов интенсивно выветрелых вулканических пород. По данным Е. Ф. Летниковой [10; 20], для венд-кембрийских карбонатных отложений южного обрамления Сибирской платформы значения европиевой аномалии менее 0,7 присущи карбонатным породам шельфа платформы и задуговым бассейнам, а более 0,7 – разновозрастным островодужным и докембрийским субплатформенным отложениям. Величины цериевой аномалии, варьирующие от слабоотрицательных значений до положительных, также указывают на роль вулканического вещества в качестве источника элементов в осадке, что в отсутствии континентальных источников сноса не может быть объяснено размывом пород основного состава [10; 20].

**Выводы.** Вышеперечисленные признаки позволяют сделать предположение о наличии кратковременного этапа подводного вулканизма основного состава и гидротермально-метасоматической деятельности в пределах Синско-Ботомской СФЗ, имевших место в тойонское время. Судя по петрографическим и геохимическим особенностям, измененные породы вулканического облика являлись гиалобазальтами, однако наложенная карбонатизация и гипергенные изменения привели не только к затухиванию



**Рис. 8. Литолого-фациальная схема для ранне-среднекембрийских отложений по данным [2; 12; 15] с изменениями**  
 1 – фрагменты вулканических зон; 2 – предполагаемые фрагменты вулканических зон; 3 – черносланцевый баттальный бассейн; 4 – литораль-супралитораль; 5 – соленосность; 6 – рифовый барьер; 7 – склоновые фации; 8 – субаэральные вулканы; 9 – границы главных тектонических структур. Рамка в нижней левой части схемы – положение изученной площади

петрографического и геохимического составов пород, но и нарушению исходных характеров фракционирования REE, что не позволяет применять распространенные петрологические методы их изучения с использованием вариационных и дискриминационных диаграмм.

Характер распределения элементов в карбонатных породах различных участков позволяет предположить, что очаг магматической деятельности располагался северо-западнее рассматриваемой территории в пределах погруженной части Алданской антеклизы, где кембрийские породы перекрыты мощными толщами мезокайнозойского возраста. Глубинное строение левобережья р. Лена остается в этом отношении практически не изученным. Однако в структуре геофизических полей рассматриваемой территории на уровне фундамента выявляется крупный дифференцированный интрузивный массив основного и щелочного составов, известный как Верхне-Ситтенский массив (Г. С. Помылов и др., 1996), выраженный гравитационным максимумом и субаномальными отрицательными магнитными аномалиями, которые не прослеживаются в южном направлении.

Представляется возможным связь данных пород с процессами континентального рифтогенеза в восточной части Сибирской платформы, проявленных в районе Сетте-Дабана [18; 22; 23],

Хараулахского и Оленёкского поднятий [9; 14; 16; 22], а также на северо-западе Омолонского массива [9; 14; 15]. Следует отметить и схожее литолого-фациальное положение данных вулканических зон, располагающихся в структуре перехода от литоральных и супралиторальных к глубинно-морским фациальным зонам (рис. 8). Установлено, что на рубеже венда – раннего кембрия в их пределах происходили процессы континентального рифтогенеза, сопровождавшиеся бимодальным магматизмом с антидромной последовательностью [16; 18; 22; 23]. По данным А. В. Прокопьева и А. К. Худолея [16], этап бимодального рифогенного вулканизма на севере Сибирского кратона начался на рубеже венда-кембрия, а завершился не ранее конца томмотского времени – 525 млн лет назад. Возраст изученных на левобережье р. Лена вулканитов предполагается исходя из возраста вмещающих пород, палеонтологически установленного в диапазоне 513–518,5 млн лет [3; 4; 11; 17; 21], что соответствует терминальному этапу синрифтовой фазы развития венд-кембрийского карбонатного бассейна северо-востока Сибирского кратона [22].

Установленная литолого-геохимическая зональность для отложений Синско-Ботомской СФЗ коррелируется с частотой встречаемости стратиформного свинцово-цинкового оруденения в карбонатных толщах, для которого

эпигенетические доломиты кетеменской и титаринской свит являются рудовмещающими. Частота встречаемости рудопоявлений и пунктов стратиформной Pb-Zn минерализации закономерно увеличивается к северо-востоку, и если в пределах р. Ботома известны лишь незначительные пункты минерализации и одно малоперспективное рудопоявление в кровельной части разреза титаринской свиты, то на р. Лена — три перспективных рудопоявления с множеством сопутствующих пунктов минерализации. Привнос свинца и цинка на стадии седиментогенеза в породы кетеменской и титаринской свит тойонского яруса раннего кембрия и зависимость частоты и масштаба рудопоявлений от концентрации Pb, Zn, Co, Mn во вмещающих породах, закономерное обогащение пород HREE относительно LREE, повышенные значения цериевой и европиевой аномалий комплексно могут рассматриваться в качестве одного из геохимических поисковых критериев прогнозирования стратиформного свинцово-цинкового оруденения в пределах изученной территории.

1. Беус А. А. Геохимия литосферы (породообразующие элементы). — М.: Недра, 1972. — 296 с.

2. 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.

3. Геология рифовых систем кембрия Западной Якутии / ред. В. Е. Савицкий. — Новосибирск: СНИИГГиМС, 1979. — 158 с. — (Труды СНИИГГиМС; вып. 270).

4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Серия Амгинская, Листы P-52-XXV (Синск), P-52-XXVI (Тит-Ары), P-52-XXVII (Булгунняхтах). Объяснительная записка / О. И. Щербakov, Л. А. Юганова, М. Л. Кокоулин и др. — М., 1999. — 74 с.

5. 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. 1–35.

6. Журавлева И. Т. Сахайская органогенная полоса // Среда и жизнь в геологическом прошлом. Вопросы экостратиграфии. — Новосибирск: Наука, 1979. — С. 128–154.

7. Кембрий Сибири / ред. Л. Н. Репина, А. Ю. Розанов. — Новосибирск: Наука, СО, 1992. — 135 с. — (Труды института геологии и геофизики; вып. 788).

8. 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.

9. Летникова Е. Ф. Геохимическая специфика карбонатных отложений различных геодинамических обстановок северо-восточного сегмента Палеоазиатского океана // Литосфера. — 2005. — № 1. — С. 70–81.

10. Летникова Е. Ф. Распределение P3Э в карбонатных отложениях различных геодинамических типов (на примере южного складчатого обрамления Сибирской платформы) // Докл. РАН. — 2003. — Т. 393, № 2. — С. 235–241.

11. Лучинина В. А. К вопросу о нижней и верхней границах нижнего кембрия на Сибирской платформе // Геология и геофизика. — 2000. — Т. 41, № 9. — С. 1233–1243.

12. Мельников Н. В. Палеогеография Сибирской платформы в раннем кембрии / Н. В. Мельников,

В. А. Асташкин, Л. И. Килина и др. // Палеогеография фанерозой Сибири. — Новосибирск, 1989. — С. 10–17.

13. Нижний кембрий юго-востока Сибирской платформы (литология, фашии, палеоэкология) / ред. Ю. П. Казанский. — Новосибирск: Наука, 1986. — 232 с.

14. Палеогеография Сибирской платформы в кембрии / Я. К. Писарчик, М. А. Минаева, Г. А. Русецкая и др. — Л.: Недра, 1975. — 195 с. — (Труды ВСЕГЕИ, нов. сер.; Т. 215).

15. Погребницкий Ю. Е. Палеотектонический анализ Таймырской складчатой области. — Л.: Недра, 1971. — 284 с.

16. Прокопьев А. В. Раннекембрийский бимодальный магматизм на северо-востоке Сибирского кратона / А. В. Прокопьев, А. К. Худолей, О. В. Королева, Г. Г. Казакова, Д. К. Лохов, С. В. Малышев, А. И. Зайцев, С. П. Роев, С. А. Сергеев, Н. Г. Бережная, Д. А. Васильев // Геология и геофизика. — 2016. — Т. 57, № 1. — С. 199–224.

17. 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.

18. Худолей А. К., Серкина Г. Г. Раннепалеозойский рифтогенез восточной окраины Сибирской платформы: сравнение геологических данных и кривых тектонического погружения дна бассейна // Тектоника и геофизика литосферы: Материалы XXXV Тектонического совещания. — М.: ГЕОС, 2002. — Т. 2. — С. 288–291.

19. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). — Сыктывкар: Геопринт, 2011. — 742 с.

20. Юдович Я. Э. Региональная геохимия осадочных толщ. — Л.: Наука, 1981. — 276 с.

21. Ярусное расчленение нижнего кембрия. Стратиграфия / отв. ред. Ю. А. Розанов, Б. С. Соколов. — М.: Наука, 1984. — 184 с.

22. Bowring S. A. Calibrating rates of Early Cambrian evolution / S. A. Bowring, J. P. Grotzinger, C. E. Isachsen, A. H. Knoll, S. M. Pelechaty, P. N. Kolosov // Science. — 1993. — Vol. 261. — Pp. 1293–1298. — DOI: 10.1126/science.11539488

23. Khudoley A. K., Guriev G. A. Influence of syn-sedimentary faults on orogenic structure: examples from the Neoproterozoic – Mesozoic east Siberian passive margin // Tectonophysics. — 2003. — Vol. 365. — Pp. 23–43.

1. Beus A. A. Geokhimiya litosfery (porodoobrazuyushchie elementy) [Geochemistry of the lithosphere (rock-forming elements)]. Moscow, Nedra, 1972, 296 p.

2. Bulgakova M. D. Osadochno-gidrotermal'nye silitsity rannego kembriya sredney Leny [Sedimentary-hydrothermal silicites of the Early Cambrian of the Middle Lena]. Metalonost' osadochnykh i magmaticheskikh kompleksov sredney Leny. Yakutsk, 1995, pp. 109–119. (In Russian).

3. Savitskiy V. E. (ed.). Geologiya rifovykh sistem kembriya Zapadnoy Yakutii [Geology of reef systems in the Cambrian of Western Yakutia]. Novosibirsk, 1979, 158 p.

4. Shcherbakov O. I., Yuganova L. A., Kokoulin M. L. et al. 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]. Moscow, 1999, 74 p.

5. Donets A. I., Ruchkin G. V., Konkin V. D. Geologopromyshlennyye tipy i regional'nye geologicheskie osobennosti stratiformnykh svintsovo-tsinkovykh mestorozhdeniy

- v karbonatnykh tolshchakh [Geological-industrial types and regional geological features of stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata]. *National Geology*, 2017, no. 6, pp. 1–35. (In Russian).
6. Zhuravleva I. T. Sakhayskaya organogennaya polosa [Sakhaiskaya organogenic strip]. *Sreda i zhizn' v geologicheskoy proshlom. Voprosy ekostratigrafii*. Novosibirsk, Nauka, 1979, pp. 128–154. (In Russian).
7. Repina L. N., Rozanov A. Yu. (eds.). *Kembriy Sibiri [Cambrian of Siberia]*. Novosibirsk, Nauka, 1992, 135 p.
8. Varlamov A. I., Rozanov A. Yu., Khomentovskiy V. V. et al. *Kembriy Sibirskoy platformy. Kn. 1: Aldano-Lenskiy region [Cambrian of the Siberian Platform. Book 1: Aldan-Lensk region]*. Moscow, 2008, 298 p.
9. Letnikova E. F. Geokhimicheskaya spetsifika karbonatnykh otlozheniy razlichnykh geodinamicheskikh obstanovok severo-vostochnogo segmenta Paleoziatiskogo okeana. *Litosfera*, 2005, no. 1, pp. 70–81. (In Russian).
10. Letnikova E. F. Raspreделение RZE v karbonatnykh otlozheniyakh razlichnykh geodinamicheskikh tipov (na primere yuzhnogo skladchatogo obramleniya Sibirskoy platformy) [Geochemical specificity of carbonate sediments in various geodynamic settings of the northeastern segment of the Paleo-Asian Ocean]. *Doklady Earth Sciences*, 2003, vol. 393, no. 2 pp. 235–241. (In Russian).
11. Luchinina V. A. K voprosu o nizhney i verkhney grani-tsakh nizhnego kembriya na Sibirskoy platforme [On the question of the lower and upper boundaries of the Lower Cambrian on the Siberian platform]. *Russian Geology and Geophysics*, 2000, vol. 41, no. 9, pp. 1233–1243. (In Russian).
12. Mel'nikov N. V., Astashkin V. A., Kilina L. I. et al. *Paleogeografiya Sibirskoy platformy v rannem kembrii [Paleogeography of the Siberian Platform in the Early Cambrian]. Paleogeografiya fanerozoeya Sibiri*. Novosibirsk, 1989, pp. 10–17. (In Russian).
13. Kazanskiy Yu. P. (ed.). *Nizhniy kembriy yugo-vostoka Sibirskoy platformy (litologiya, fatsii, paleoekologiya) [Lower Cambrian of the southeastern Siberian platform (lithology, facies, paleoecology)]*. Novosibirsk, Nauka, 1986, 232 p.
14. Pisarchik Ya. K., Minaeva M. A., Rusetskaya G. A. et al. *Paleogeografiya Sibirskoy platformy v kembrii [Paleogeography of the Siberian platform in the Cambrian]*. Leningrad, Nedra, 1975, 195 p.
15. Pogrebitskiy Yu. E. *Paleotektonicheskiy analiz Taymyrskoy skladchatoy oblasti [Paleotectonic analysis of the Taimyr fold region]*. Leningrad, Nedra, 1971, 284 p.
16. Prokop'ev A. V., Khudoley A. K., Koroleva O. V., Kazakova G. G., Lokhov D. K., Malyshev S. V., Zaytsev A. I., Roev S. P., Sergeev S. A., Berezhnaya N. G., Vasil'ev D. A. *Rannekembriyskiy bimodal'nyy magmatizm na severo-vostoke Sibirskogo kratona [Early Cambrian bimodal magmatism in the northeast of the Siberian craton]*. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 1, pp. 199–224. (In Russian).
17. Shabanov Yu. Ya. (ed.). *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Kembriy Sibirskoy platformy. V 2 t. T. 1: Stratigrafiya [Stratigraphy of Siberian oil and gas basins. Cambrian of the Siberian Platform. In 2 volumes. Vol. 1: Stratigraphy]*. Novosibirsk, 2016, 497 p.
18. Khudoley A. K., Serkina G. G. *Rannepaleozoyskiy riftogenez vostochnoy okrainy Sibirskoy platformy: sravnenie geologicheskikh dannykh i kriyvk tektonicheskogo pogru-zheniya dna basseyna [Early Paleozoic rifting of the eastern margin of the Siberian platform: comparison of geological data and curves of tectonic subsidence of the basin bottom]*. *Tektonika i geofizika litosfery: Materialy XXXV Tektonicheskogo soveshchaniya*. Moscow, GEOS, 2002, vol. 2, pp. 288–291. (In Russian).
19. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Geokhimicheskie indika-tory litogeneza (litologicheskaya geokhimiya) [Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry)]*. Syktyvkar, Geoprint, 2011, 742 p.
20. Yudovich Ya. E. *Regional'naya geokhimiya osadochnykh tolshch [Regional geochemistry of sedimentary strata]*. Leningrad, Nauka, 1981, 276 p.
21. Rozanov Yu. A., Sokolov B. S. (ex. eds.). *Yarusnoe raschlenenie nizhnego kembriya. Stratigrafiya [Layered subdivision of the Lower Cambrian. Stratigraphy]*. Moscow, Nauka, 1984, 184 p.
22. Bowring S. A., Grotzinger J. P., Isachsen C. E., Knoll A. H., Pelechaty S. M., Kolosov P. N. *Calibrating rates of Early Cambrian evolution. Science*, 1993, vol. 261, pp. 1293–1298. DOI: 10.1126/science.11539488
23. Khudoley A. K., Guriev G. A. *Influence of syn-sedi-mentary faults on orogenic structure: examples from the Neo-proterozoic – Mesozoic east Siberian passive margin. Tectono-physics*, 2003, vol. 365, pp. 23–43.

Козлов Глеб Александрович – аспирант, геолог, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <Gleb\_Kozlov@vsegei.ru>

Гузов Владислав Евгеньевич – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет (СПГУ). 21-я линия, Васильевский остров, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106; инженер, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <s195007@stud.spmi.ru>; <Vladislav\_Guzev@vsegei.ru>

Молчанов Анатолий Васильевич – доктор геол.-минерал. наук, и. о. директора центра прогнозно-металлогенических исследований, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <Anatoly\_Molchanov@vsegei.ru>

Терехов Артём Валерьевич – канд. геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <artem\_terekhov@vsegei.ru>

Kozlov Gleb Aleksandrovich – Ph. D. Student, Geologist, VSEGEI<sup>1</sup>. <Gleb\_Kozlov@vsegei.ru>

Guzev Vladislav Evgen'evich – Ph. D. Student, Saint-Petersburg Mining University (SPMU). 2 21st Line, St. Petersburg, Russia, 199106; Engineer, VSEGEI<sup>1</sup>. <s195007@stud.spmi.ru>; <Vladislav\_Guzev@vsegei.ru>

Molchanov Anatoly Vasilyevich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Acting Director of the Centre of Predictive Metallogenic Studies, VSEGEI<sup>1</sup>. <Anatoly\_Molchanov@vsegei.ru>

Terekhov Artem Valer'evich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI<sup>1</sup>. <artem\_terekhov@vsegei.ru>

<sup>1</sup> 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.