

ГЕОХИМИЯ ПЕРМСКИХ «КОЛЫМИЕВЫХ» ИЗВЕСТНЯКОВ ОМОЛОНСКОГО МАССИВА (СЕВЕРО-ВОСТОК АЗИИ)

И.В. Брынько, А.С. Бяков, И.Л. Ведерников, Т.И. Михалицына

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН,

Магадан, Россия; e-mail: ibrynko@mail.ru

Поступила в редакцию 20 июня 2023 г.

На основе изучения распределения редких и редкоземельных элементов и петрографической характеристики выделены пять типов карбонатных пород в среднепермских (роудско-вордских) отложениях Омолонского массива. Получены новые данные о геохимических особенностях «колымиевых» известняков, свидетельствующие об их бактериальной природе. Породы формировались в мелководных кислородных обстановках в условиях гумидного климата. Возможными источниками вулканогенной примеси в известняках являлись вулканиды среднего и основного состава (Охотско-Тайгоноская вулканическая дуга), а также кислые изверженные породы (девонские вулканиды кедонской серии), которые располагались вблизи бассейна седиментации.

Ключевые слова: «колымиевые» известняки, редкие и редкоземельные элементы, средняя пермь, Северо-Восток Азии.

ВВЕДЕНИЕ

Карбонатонакопление, в целом, не свойственно пермским седиментационным бассейнам Северо-Востока Азии [5]. Оно спорадически происходило лишь в пределах некоторых кратонных структур – Омолонском массиве, Омудевском блоке и ряде районов Приколмыя [31]. В настоящей работе рассматриваются роудско-вордские карбонатные породы Омолонского массива, которые принято называть «колымиевыми» известняками. Это продолжение изучения геохимических особенностей пермских отложений юго-восточной части Омолонского массива, начатое в предыдущей статье [2].

«Колымиевые известняки» – это карбонатные породы, сложенные беспорядочно ориентированными тонкими шестигранными кальцитовыми призмами размером менее 0.3 мм в поперечнике, имеющие сероводородный запах. Породы являются очень своеобразными и во многом уникальными; подобные им образования описаны лишь на Аляске [34] и в Новой Зеландии [45], где они получили название «атомодесмовые» известняки. Находки аналогичных известняков также известны на о. Врангеля [9] и Новосибирских островах [17]. Механизм образования этих отложений весьма дискуссионен. Долгие годы практически не подвергалось сомнению, что «колымиевые»

известняки сложены дезинтегрированными обломками раковин иноцерамоподобных двустворчатых моллюсков [3], но в последнее десятилетие главенствующей стала гипотеза о бактериальном происхождении этих пород [8].

В связи с уникальностью «колымиевых» известняков, весьма актуальным является вопрос об условиях их формирования, и геохимические исследования в определенной степени могут способствовать решению. Цель данной работы – реконструкция обстановок образования среднепермских роуд-вордских «колымиевых» известняков юго-восточной части Омолонского массива на основе интерпретации данных о содержании редких и редкоземельных элементов (РЗЭ). Объектами изучения явились два стратотипических пермских разреза – по руч. Водопадный и р. Русская-Омолонская, исследованные нами в 2014–15 гг.

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ «КОЛЫМИЕВЫХ» ИЗВЕСТНЯКОВ

Первые сведения о «колымиевых» известняках Омолонского массива получены С.В. Обручевым в результате проведенных в 1929–1930 гг. маршрутных исследований. В 1934 г. Б.К. Лихарев (изучавший палеонтологическую коллекцию С.В. Обручева) отме-

тил присутствие в известняках обломков призматического слоя иноцерамоподобных двустворок предположительно рода *Aphanaia* [14].

В рукописном отчете 1951 г. «Верхнепермские фораминиферы Охотско-Колымского края» О.В. Кириченко выдвинула предположение о водорослевом происхождении рассматриваемых известняков, которые были названы водорослевыми биогермными известняками. В дальнейшем данная гипотеза в геологической литературе не рассматривалась. В течение 40 лет описываемые породы назывались «колымиевыми» известняками. Предполагалось, что они образованы раздробленными призмами раковин иноцерамоподобных двустворок, что и наблюдалось при их микроскопическом изучении. Это подкреплялось тем, что как раковины иноцерамоподобных двустворок, так и сами известняки обладают сильным запахом сероводорода при ударе их молотком.

В 80-е годы прошлого столетия группой специалистов из гг. Санкт-Петербурга, Москвы, Ростова-на-Дону и Магадана было проведено комплексное изучение стратотипических разрезов пермских отложений Омолонского массива на руч. Водопадный и р. Русская-Омолонская [11]. В результате была издана монография с детальным макро- и микроописанием «колымиевых» известняков.

В 1999 году А.С. Бяков отмечал, что рассматриваемые известняки могли образовываться за счет дезинтеграции раковин колымиид на отдельные призмочки. Для объяснения самого механизма было высказано предположение об особом строении призматического слоя раковин этих двустворок, где значительную часть составлял органический материал, скреплявший отдельные призмы раковинного слоя. В дальнейшем при быстром разложении этого материала раковины могли легко распадаться на отдельные мельчайшие призмочки [3]. Такой же механизм разрушения призматического слоя был предложен ранее Т. Янси и Д. Бойдом для крупных раковин теплолюбивых среднепермских алатоконхид [43].

С развитием электронной микроскопии и получением данных по изотопии «колымиевых» известняков возродилась гипотеза об их бактериальном происхождении, В.Г. Ганелин называет их карбонатолитами [8]. Как доказательство, автор гипотезы приводит большую протяженность и замысловатую морфологию призматических «корок», которые часто далеки от контуров раковин иноцерамоподобных двустворок. Образование карбонатолитов связывается им с жизнедеятельностью неких гипотетических прокариот, фиксирующих морской карбонат, — «строгих анаэробов, но факультативных фото- хемоавтотрофов» [8].

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Омолонский массив является одним из крупных структурных элементов Верхояно-Колымской складчатой системы (рис. 1). На севере он граничит с Олойской складчатой зоной, на юго-востоке и юго-западе — с Гижигинской и Сугойской складчатыми зонами, а на западе — с Приколымским блоком [21]. В геологическом строении массива принимают участие дорифейский метаморфический фундамент, сложенный архейскими гранитизированными мигматит-гранулитами, и рифейско-мезозойский осадочный чехол, имеющий пестрый литологический состав [19].

Пермские породы Омолонского массива, составляющие верхнюю часть чехла, комплексно охарактеризованы в работе [11]. Они представлены джигдалинской, омолонской, гижигинской и хивачской свитами, которые (кроме омолонской) в основном сложены мелко- и тонкообломочным материалом (алевролиты, туфоалевролиты, туффиты, туфы, песчаники, диамиктиты). Для всех вышеупомянутых образований характерно присутствие того или иного количества вулканокластиков.

Омолонская свита в обоих изученных разрезах сложена «колымиевыми» известняками с той или иной долей терригенной примеси [11]. Её содержание неравномерное: нижняя и верхняя подсвиты омолонской свиты в разрезе по руч. Водопадному содержат большее количество примеси, чем среднеомолонская подсвита в этом же разрезе и вся омолонская свита в разрезе по р. Русская-Омолонская. Роудско-вордский возраст омолонской свиты хорошо обоснован находками зональных видов брахиопод и двустворчатых моллюсков, а также аммонойд [6, 31]. Подробное описание разрезов приведено в работе [11].

Разрез по р. Русская-Омолонская (рис. 2, а).

1. «Колымиевые» известняки серые, массивные, с запахом сероводорода, плитчатые, алевритовые, слабобокремнистые, в низах пачки песчанистые с прослоями брахиоподовых ракушечников, сложенных *Rhynchopora lobjaensis* (Tolmatchew), *Mongolosia russiensis* (Zavodowsky) и др. Также встречаются многочисленные остатки иноцерамоподобных двустворок *Aphanaia stepanovi* (Muromzeva). Мощность 20–25 м.

2. Переслаивание глинистых «колымиевых» известняков с брахиоподовыми ракушечниками. Порода желтовато-серого цвета, массивные, реже плитчатые. Многочисленны остатки брахиопод *M. russiensis*, *Terrakea* sp., *Strophalosia* ex gr. *tolli* (Fredericks) и двустворок *Kolymia inoceramiformis* Licharew и др. Мощность 12 м.

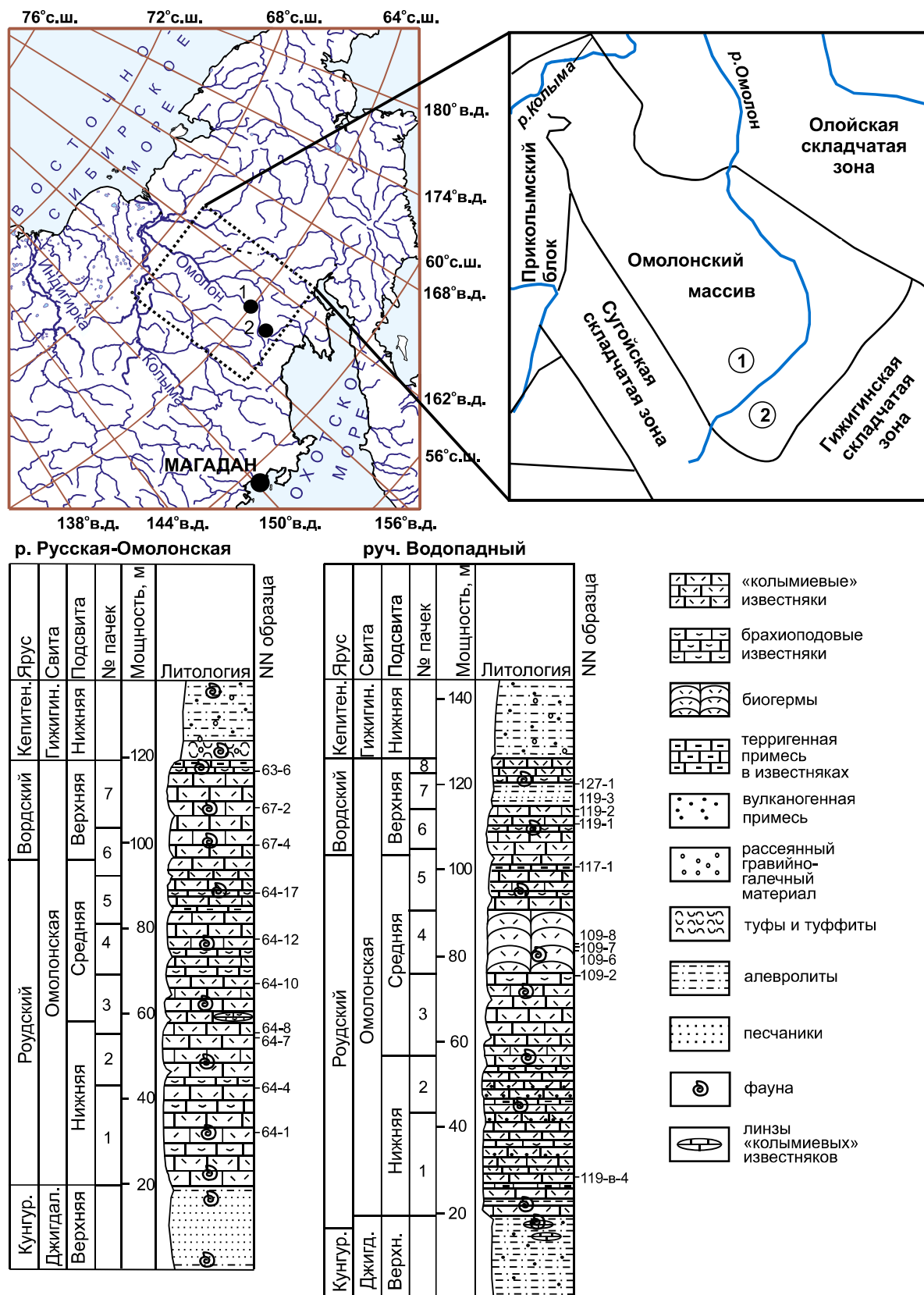


Рис. 1. Расположение изученных разрезов на Северо-Востоке России, составлено с использованием [17].

1 – разрез по р. Русская-Омолонская, 2 – разрез по руч. Водопадному.

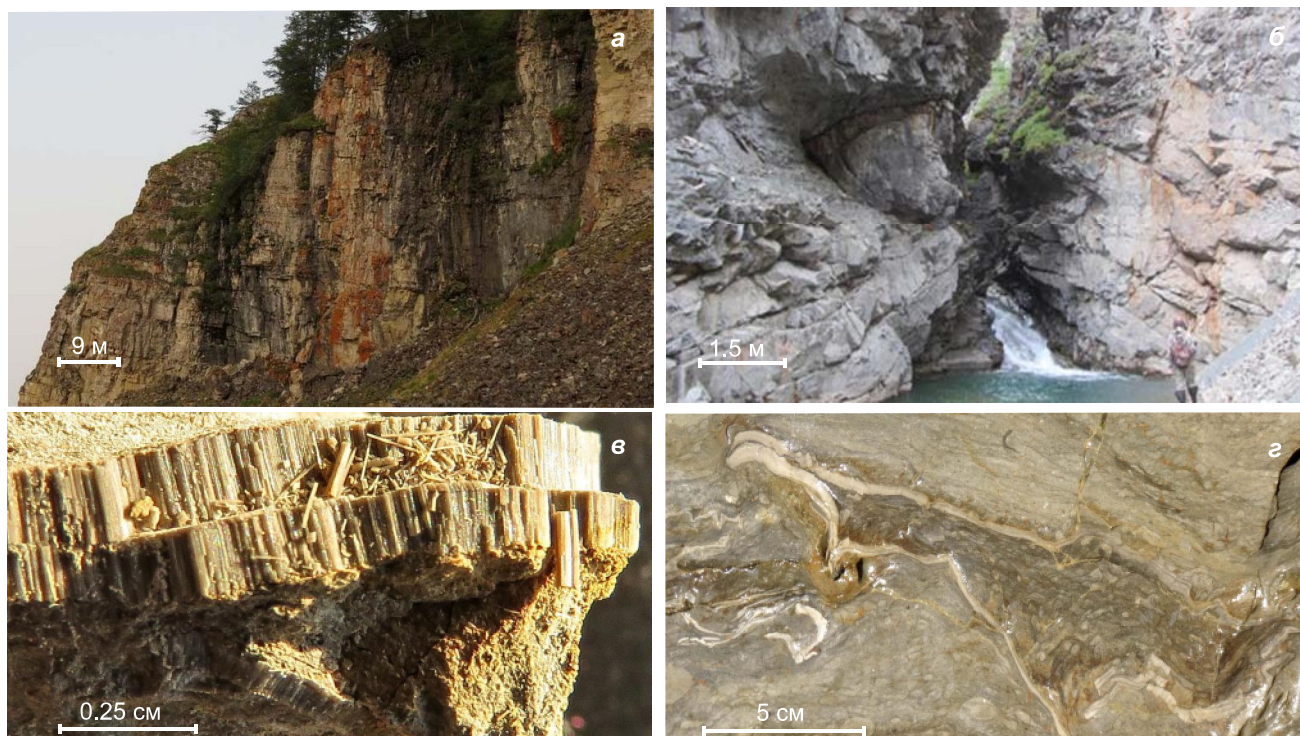


Рис. 2. «Колымиевые» известняки.

а – общий вид фрагмента разреза по р. Русская-Омолонская; *б* – тело крупной (5.5 м по длинной оси) биогермной постройки с концентрической зональностью, рассеченное руч. Левый Водопадный; *в* – фрагмент бактериальной постройки, сложенной двумя слоями тонких карбонатных призм шестигранного сечения, плотно упакованных ортогонально поверхности слоя подобно призматическому слою раковин иноцерамоподобных двустворок; *г* – характерное сочетание остатков своеобразных бактериальных построек «пузырчатого» облика и кальцитовой «корки» призматического строения, сходной с призматическим слоем раковин иноцерамоподобных двустворок [26].

3. «Колымиевые» известняки светло-серые, толсто-, среднеслоистые, с запахом сероводорода, плитчатые, алевролитовые, кремнистые, с прослоями брахиоподовых ракушечников, сложенных *Omolonia snjatkovi* (Zavodowsky), *Lisschonetes omolonensis* (Licharew), *Rh. lobjaensis*. В пачке также встречаются иноцерамоподобные двустворки *Aph. stepanovi*, *Kolymia simkini* Porow, *K. inoceramiformis*. Мощность 14 м.

4. «Колымиевые» известняки серые, массивные, среднеплитчатые, с запахом сероводорода, с прослоями ракушечников, сложенных брахиоподами *Megousia jakutica* (Licharew), *Rh. lobjaensis*, *L. omolonensis*, двустворками *K. ex gr. inoceramiformis*. Мощность 12 м.

5. «Колымиевые» известняки буровато-серые, плитчатые, с запахом сероводорода, массивные, крепкие, с прослоями ракушечников, сложенных *Terrakea* aff. *belochini* Ganelin, *T. korkodonensis* Licharew, *Rh. lobjaensis*, *Megousia jakutica* (Licharew). Присутствуют остатки двустворок *K. plicata* Biakov. Мощность 10 м.

6. «Колымиевые» известняки серые, массивные и толстослоистые, с запахом сероводорода, глини-

сто-алевролитовые. Фаунистически пачка охарактеризована *T. korkodonensis* Licharew, *Rh. lobjaensis*, *L. omolonensis*. Мощность 10 м.

7. «Колымиевые» известняки серые до темно-серых, средне-, грубослоистые, с запахом сероводорода, крепкие, толстоплитчатые, с прослоями тонкослоистых алевролитовых известняков, сложенных *Rh. lobjaensis*. Двустворки представлены *Kolymia multiformis* Biakov, *Maitaia muromzevae* Biakov. Мощность 13 м.

Мощность свиты в разрезе 96 м.

Разрез по руч. Водопадному

1. «Колымиевые» известняки серые, кремнистые, плитчатые, массивные, с запахом сероводорода, слабо битуминизированные, иногда с тонкой рассеянной пиритизацией. Фаунистически пачка охарактеризована: *Rh. lobjaensis*, *Attenuatella stringocephaloides* (Tschernyak et Licharew), *Aph. stepanovi*, *K. ex gr. inoceramiformis* и др. Мощность 24 м.

2. «Колымиевые» известняки серые, крепкие, толстоплитчатые, с запахом сероводорода, с примесью переотложенного вулканогенного материала, кремнистые, битуминозные, с тонкой рассеянной пи-

ритизацией. Встречаются брахиоподы *Rh. lobjaensis*, *A. stringocephaloides*, *Terrakea* sp. Мощность 13 м.

3. «Колымиевые» известняки серые, кремнистые, толстоплитчатые, с запахом сероводорода, крепкие, битуминозные, с тонкой рассеянной пиритизацией, встречаются отдельные раковины *Rh. lobjaensis*, *Terrakea* sp., *A. stringocephaloides*, *K. taskanica* Biakov. Мощность 18 м.

4. «Колымиевые» известняки серые, крепкие, массивные, с запахом сероводорода, битуминозные, с тонкой рассеянной пиритизацией. В этой пачке наблюдаются своеобразные «биогермы» (рис. 2, б), имеющие концентрическое строение; мощность таких построек от 0.5 до 7 м. Морфология тел эллипсоидальная, сигарообразная, линзовидная, в виде изгибающихся линз. Длинная ось биогерма обычно ориентирована субпараллельно плоскости напластования перекрывающих их пластовых известняков. Внешняя оболочка биогерма темно-серого цвета, имеет концентрическое строение, сходное с бактериальными матами [26]. В пачке встречены брахиоподы: *Tumarinia orientalis* Grigorjeva, *Rh. lobjaensis* и двустворки *K. plicata*. Мощность 15 м.

5. «Колымиевые» известняки серые, массивные, с запахом сероводорода, крепкие, кремнистые, битуминозные, толстоплитчатые, с прослоями брахиоподового ракушечника, сложенного *Rh. lobjaensis*, *T. korkodonensis*, *Tumarinia* sp. Мощность 14 м.

6. «Колымиевые» известняки серые, глинисто-кремнистые, крепкие, толстоплитчатые, с запахом сероводорода, с прослоями брахиоподового ракушечника, сложенного *Rh. lobjaensis*, *Neospirifer komarovaе* Zavodowsky и др. Многочисленны двустворчатые моллюски: *K. multiformis*, *M. muromzevae*, *Streblopteria englehardti* (Etheridge et Dun), *Neptunopecten? maslennikowi* Biakov, *Cypricardina permica* Licharew и др. Мощность 10 м.

7. Переслаивание песчаников и алевролитов зеленовато-серых, кремнистых, известковистых. В верхней части пачки алевролиты переходят в ракушечниковые известняки с остатками *Rh. lobjaensis*, *N. komarovaе*, *Magadania bajkurica* (Ustritsky) и др. Двустворчатые моллюски представлены *K. multiformis* и др. Мощность 9 м.

8. «Колымиевые» известняки зеленовато-серые, обломочно-биоморфные, кремнистые, глинистые, крепкие, с прослоями глинистых алевролитов, мощностью до 0.2 м, и ракушечников с остатками брахиопод *S. tolli* (Fredericks), *S. bajkurica* Ustritsky, *Olgeria zavodowskyi* Grigoreva и др., и двустворок *K. multiformis*. Мощность 4 м.

Мощность свиты в разрезе 107 м.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материал для исследований отбирался из естественных обнажений. Интервал опробования (см. рис. 1) был различным: в разрезе по р. Русская-Омолонская – от 7.5 до 10.5 м, а в разрезе по руч. Водопадный – от 1 до 38.5 м. Такое неоднородное опробование связано со сложной доступностью некоторых частей обнажений. При отборе проб исключались участки повышенной трещиноватости, сульфидизации и прожилкования. Петрографическая характеристика проводилась с использованием поляризационного микроскопа Motic BA 300 Pol, всего изучено 24 шлифа карбонатных пород.

Редкие и редкоземельные элементы из разреза по р. Русская-Омолонская определялись на масс-спектрометре ELAN9000 в Институте тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск. Стандарты: SCo-1 (глинистый сланец, международный) и ДВА (андезит, региональный), чувствительность прибора не ниже 0.001 г/т. При определении содержания элементов использовался способ разложения пробы смесью азотной, фтористоводородной и хлорной кислот. Анализируемые растворы проб при помощи перистальтического насоса попадали в распылительную камеру масс-спектрометра, и в токе аргона образовавшаяся аэрозоль оказывалась в горелке, в которой происходила ионизация атомов; был установлен оптимальный режим регистрации масс-спектрометра и измерений. Методика анализа проб – ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 [12], аналитики Штарева А.В., Петрова А.Ю. Всего проанализировано 36 проб. Погрешность определения содержаний главных и примесных элементов составляет 2–10 %.

Пробы из разреза по руч. Водопадному анализировались во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, на приборе Aglient 7700x с использованием методики, разработанной и аттестованной в ЦЛ ВСЕГЕИ: МП ВСЕГЕИ № 10/2010 «Определение макро и микроэлементов (в том числе редкоземельных) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в горных породах, почвах и рыхлых отложениях» III категории точности.

ПЕТРО- И ГЕОХИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

Макро- и микроскопическое изучение карбонатных пород позволило выделить следующие их типы: «колымиевые» известняки (образцы 64-1; 64-4; 64-7; 64-8; 64-10; 64-12; 67-2; 67-4), брахиоподовые известняки-ракушечники (64-17; 63-6; 109-2), «колымиевые» известняки из биогермной постройки (109-6; 109-7; 109-8), глинисто-алевролитовые «колымие-

вые» известняки (117-1), известковистые песчаники (127-1). При нормировании содержаний редких элементов нами использовались их средние значения в карбонатных породах (далее кларк) по [1]. Содержания всех элементов приведены в таблице 1 и 2.

«Колымиевые» известняки (изучены по двум разрезам). В шлифах при увеличении видно, что эти известняки сложены разрозненными призмочками кальцита размером от 0.02×0.2 до 0.05×0.7 мм, с преобладающей фракцией 0.05×0.3 мм (рис. 3). Призмочки слагают от 70 до 99 % породы. Терригенная примесь представлена кварцем, полевым шпатом, плагиоклазом, реже опалом, составляет от 1 до 30 % породы. Опал местами раскристаллизован до халцедона. Форма обломочных зерен различная: призматическая, таблитчатая, остроугольная, размер от 0.05 до 0.4 мм. Цемент первичный кальцитовый, в известняках из верхней части оломонской свиты – глинисто-кальцитовый. Вторичные процессы выражены в замещении терригенных обломков кальцитом, также этот минерал встречается и в трещинах; битумоидное вещество наблюдается как в отдельных поровых пространствах, так и по ослабленным зонам (стилолитовым швам). Окремнение наблюдается как по трещинам, так и по отдельным линзовидным участкам протяженностью около 5 мм. Встречаются зерна диагенетического пирита и гетита, иногда эти минералы замещают раковины фораминифер. В нижнеомолонской подсвите в разрезе по руч. Водопадному наблюдаются следы пирокластического материала в виде вытянутых витрокластических обломков. Для разновозрастных отложений в разрезе по р. Русская-Оломонская отличительной особенностью является присутствие плохоокатанных обломков риолитов, количество которых уменьшается вверх по разрезу. Для среднеомолонской подсвиты характерно наибольшее содержание кальцита, до 95–99 %. Породы верхнеомолонской подсвиты характеризуются увеличением количества терригенного материала до 23 % в разрезе по р. Русская-Оломонская и до 32 % в разрезе по руч. Водопадному.

Для рассматриваемого типа известняков типично нижекларковое содержание Sn, вышекларковые – Ba, Co, Cu, Ni и Be. Содержание таких элементов, как Sr, As и Zn, колеблется в широких пределах (табл. 1 и 2). Отмечаются более высокие содержания всех вышеперечисленных элементов в разрезе по руч. Водопадному по сравнению с разрезом по р. Русская-Оломонская.

Брахиподовые известняки-ракушечники (изучены в двух разрезам) встречаются по всему разрезу оломонской свиты. Петрографически отличаются от первого типа только присутствием в «колымиевых» известняках до 30 % обломков раковин брахиопод

(рис 3, в). Проба 63-6 имеет ураганные значения Sr, Ba, Zr и Zn. В остальных пробах отмечаются нижекларковые содержания Sr, Cu, Zn, Be, Sn и Co; вышекларковые – Ba, Ni и As (табл. 1 и 2).

«Колымиевые» известняки из биогермной постройки изучены по разрезу руч. Водопадному. Этот тип характеризуется присутствием микробиальных построек (рис. 2, в, г). Под микроскопом данный тип известняков, по сравнению с предыдущими, отличается большим количеством битумоидного вещества (рис. 3, г) и меньшим размером кальцитовых призм (0.02×0.2 мм), слагающих около 85 % породы. Терригенная примесь представлена полевыми шпатами, составляет около 1 % породы. Вторичный минерал представлен пиритом (до 1–3 %). Цемент глинистый, занимает около 15 % породы.

Для биогермных построек характерны нижекларковые содержания Sr, Be, Co, Cu, Ni и Zn; вышекларковые содержания отмечаются для Ba, Sn и As (табл. 2).

Глинисто-алевролитовые «колымиевые» известняки (рис. 3, е) изучены в разрезе по руч. Водопадному. Отличительной особенностью этого типа является большее количество тонкообломочной примеси (до 15 % породы). Примесь представлена теми же обломками, что и в ранее описанных типах, а также содержится и в самих призмах в виде мелких пылеватых частиц, из-за чего цвет призм бурый, что, вероятно, обусловлено процессами ожелезнения. Кальцитовые призмы имеют такой же размер, что и в ранее описанных типах известняков. Цемент хлорит-серицит-кальцитового состава, слагает до 10 % породы. Вторичный минерал – серицит.

Для данного типа характерны нижекларковые содержания Sr и вышекларковые – Ba, Be, Sn, Co, Ni; Cu, As, Zn (табл. 2).

Известковистые песчаники (рис. 3, д) изучены по разрезу руч. Водопадному, в самой верхней части оломонской свиты. Отличительной чертой типа является то, что основная масса породы представлена терригенными обломками кварца и полевого шпата, которые составляют около 70 %. Размер частиц от 0.05 до 0.3 мм, они имеют призматическую, реже таблитчатую форму и плохую окатанность. В породе встречаются кальцитовые призмы размером от 0.05 до 2.5 мм, которые слагают около 15–25 % породы. Цемент породы хлорит-глинисто-кальцитового состава, составляет около 5–10 %. Вторичный минерал – хлорит, который наблюдается в порах.

Геохимическая характеристика типа идентична таковой глинисто-алевролитовых «колымиевых» известняков: нижекларковые содержания только у

Таблица 1. Содержание (г/т) редких и редкоземельных элементов в разрезе по р. Русская-Омолонская.

№ обр.	63-6	64-1	64-4	64-7	64-8	64-10	64-12	64-17	67-2	67-4
тип	ракуш.	колым.	колым.	колым.	колым.	колым.	колым.	ракуш.	колым.	колым.
Be	0.11	0.09	0.09	0.09	0.05	0.13	0.11	0.04	0.08	0.04
V	13.88	9.2	11.63	9.01	3.29	15.69	5.05	2.02	7.01	6.35
Cr	5.97	8.29	8.27	8.2	3.85	10.06	7.06	1.9	4.04	1.92
Co	2.22	1	1.35	1.26	0.64	1.05	0.8	0.9	1.04	0.91
Ni	2.7	7.09	7.05	5.84	3.7	5.12	3.5	4.49	3.04	2.48
Cu	11.26	5.08	4.94	2.34	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.34
Zn	2646.43	4.17	0.35	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
As	4.74	<0.001	0.64	1.41	0.35	1.08	1.59	1.1	0.12	<0.001
Sr	3584.2	720.62	452.25	435.04	361.92	349.04	376.24	418.4	502.78	965.56
Y	6.29	5.21	4.52	8.1	3.79	4.47	3.25	2.58	4.14	4.34
Sn	0.11	0.49	0.12	0.32	<0.001	0.03	0.12	<0.001	<0.001	1.06
Ba	84561.3	262.36	108.82	48.78	26.71	51.07	13.99	4.93	211.12	244.63
La	4.98	5.09	4.76	7.75	4.25	6.85	5.2	3.33	2.64	3.23
Ce	8.14	5.75	5.42	6.91	2.81	5.66	4.25	2.84	3.38	3.56
Pr	1.02	1	1.01	1.49	0.73	1.36	1.04	0.61	0.5	0.59
Nd	3.85	3.84	3.89	5.87	2.91	5.19	3.81	2.37	2.03	2.4
Sm	1.22	0.78	0.77	1.14	0.56	0.99	0.72	0.45	0.42	0.5
Eu	0.53	0.19	0.19	0.28	0.14	0.23	0.16	0.1	0.11	0.14
Gd	0.99	0.95	0.89	1.43	0.69	1.11	0.8	0.51	0.54	0.65
Tb	0.17	0.14	0.13	0.21	0.1	0.16	0.11	0.07	0.09	0.1
Dy	1.04	0.74	0.73	1.13	0.54	0.81	0.58	0.38	0.54	0.61
Ho	0.24	0.16	0.15	0.24	0.11	0.16	0.11	0.08	0.13	0.14
Er	0.76	0.43	0.41	0.64	0.29	0.41	0.29	0.22	0.41	0.43
Tm	0.14	0.06	0.06	0.09	0.039	0.056	0.039	0.032	0.068	0.069
Yb	0.98	0.38	0.39	0.51	0.24	0.34	0.24	0.21	0.46	0.48
Lu	0.16	0.06	0.06	0.07	0.036	0.051	0.036	0.035	0.075	0.08
Th	0.4	0.25	0.52	0.13	0.13	0.27	0.29	0.08	0.19	0.14
U	0.21	0.36	0.36	1.22	0.17	0.26	0.16	0.07	0.85	0.17
PЗЭ+Y	29.75	24.35	22.97	35.22	16.945	27.437	20.345	13.597	15.123	16.889
ЛРЗЭ/ТРЗЭ	4.41	5.70	5.69	5.43	5.57	6.55	6.88	6.31	3.93	4.07
Ce/Ce* ch	0.83	0.61	0.57	0.50	0.42	0.44	0.41	0.50	0.76	0.68
Ce/Ce* PAAS	0.87	0.64	0.60	0.53	0.44	0.46	0.43	0.52	0.79	0.71
Eu/Eu* PAAS	2.23	1.15	1.19	1.15	1.18	1.14	1.11	1.10	1.17	1.28
Y/Ho	26.21	32.56	30.13	33.75	34.45	27.94	29.55	32.25	31.85	31.00
Th/U	1.90	0.69	1.44	0.11	0.76	1.04	1.81	1.14	0.22	0.82
Er/Nd	0.20	0.11	0.11	0.11	0.10	0.08	0.08	0.09	0.20	0.18
Уайт.	0.08	0.28	0.19	1.18	0.13	0.17	0.06	0.04	0.79	0.12

Примечание. Типы: колым. – «колымиевый» известняк; ракуш. – брахиоподовые известняки-ракушечники; биогер. – «колымиевые» известняки из биогермной постройки; гл. колым. – глинисто-алевролитовый «колымиевый» известняк; песч. – известковистый песчаник.

Sr, а вышекларковые – Ba, Be, Sn, Co, Ni, Cu, As, Zn (табл. 2).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УСЛОВИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

Редкоземельные элементы являются эффективными маркерами различных геологических процессов [38, 40]. Контролирующими факторами распределения в породах РЗЭ являются: 1) привнос терригенных компонентов с континента [37, 40]; 2) про-

цессы, связанные с глубиной, соленостью и содержанием кислорода в бассейне [30, 32, 39]; 3) диагенетические изменения, которые вызывают обогащение пород РЗЭ [41]. Поэтому выяснение процессов, ответственных за фракционирование РЗЭ, имеет важное значение.

Сумма редкоземельных элементов и иттрия ($\Sigma\text{РЗЭ}+\text{Y}$) в «колымиевых» известняках разреза руч. Водопадного колеблется от 50.87 до 142.36 г/т, а в разрезе р. Русская-Омолонская от 15.12 до 35.22 г/т. На-

Таблица 2. Содержание (г/т) редких и редкоземельных элементов в разрезе по руч. Водопадному.

№ обр.	117-1	109-2	109-6	109-7	109-8	119-1	119-2	119-3	119В-4	127-1
тип	гл. колым.	ракуш.	биогер.	биогер.	биогер.	колым.	колым.	колым.	колым.	песч.
Be	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.32	1.21	1.3	<1.0	1.91
Co	4.51	1.46	0.75	0.52	0.65	2.93	5.59	4.69	2.72	4.39
Ni	7.1	1.93	1.39	1.23	0,05	4.41	7.79	6.38	4.06	7.99
Cu	9.4	4.83	2.93	1.94	3.36	8.48	6.98	5.14	11.1	6.92
Zn	33.7	23.7	14.7	6.21	9.57	22.5	50.8	88.9	32.7	51
As	10.7	6	5.48	5.18	14.6	5.13	4.15	2.62	4.43	24.9
Sr	533	343	263	289	305	352	382	670	659	215
Y	17.9	12.5	6.16	30.2	6.83	11.4	10.4	55	13.6	12.1
Sn	0.81	0.88	0.86	0.72	0.9	1.05	1.01	0.93	0.74	1.14
Ba	73.8	15.6	21.9	12.2	34	91.8	110	107	92.1	451
La	10.1	12.1	7.86	16.3	9.89	7.1	7.18	22.8	12.5	6.87
Ce	17.6	16	8.5	16.1	10.2	14.4	15.7	27.6	14.7	13.9
Pr	2.7	2.43	1.55	3.39	1.95	1.77	2.3	3.36	2.6	2.16
Nd	12.2	8	5.67	13.5	5.62	6.55	7.98	12.9	8.36	8.24
Sm	3.18	2.52	1.33	5.29	1.79	1.81	2.59	3.44	2.31	2.88
Eu	0.77	0.56	0.36	1.64	0.39	0.57	0.8	1.09	0.67	0.79
Gd	2.63	2.16	1.33	6.56	1.39	1.85	2.08	3.94	2.6	2.33
Tb	0.54	0.34	0.21	1.07	0.25	0.3	0.32	0.68	0.41	0.34
Dy	2.85	2.26	1.15	5.53	1.31	2.44	2.38	5.78	2.52	2.35
Ho	0.69	0.54	0.22	1.02	0.22	0.59	0.52	1.5	0.47	0.45
Er	1.8	1.57	0.63	2.29	0.62	1.37	1.28	4.11	1.11	1.25
Tm	0.32	0.26	0.099	0.25	0.093	0.18	0.16	0.45	0.14	0.14
Yb	1.94	1.92	0.63	1.55	0.68	1.69	1.6	3.39	1.14	1.34
Lu	0.31	0.25	0.086	0.19	0.079	0.22	0.25	0.43	0.14	0.16
Th	0.82	1.26	0.48	0.44	0.66	1.1	1.08	0.57	0.37	1.46
U	0.25	0.72	0.22	1.23	0.3	0.34	0.27	18.1	0.56	1.29
PЗЭ+Y	73.73	61.84	35.155	102.59	40.692	50.87	54.26	142.36	62.16	54.05
ЛРЗЭ/ ТРЗЭ	4.20	4.47	5.80	3.05	6.43	3.73	4.25	3.51	4.83	4.17
Ce/Ce* ch	0.81	0.60	0.55	0.52	0.42	0.83	0.65	0.87	0.50	0.68
Ce/Ce* PAAS	0.85	0.63	0.58	0.55	0.44	0.87	0.68	0.91	0.53	0.71
Eu/Eu* PAAS	1.17	1.15	1.33	1.41	1.12	1.53	1.65	1.45	1.38	1.49
Y/Ho	25.94	23.15	28.00	29.61	31.05	19.32	20.00	36.67	28.94	26.89
Th/U	3.28	1.75	2.18	0.36	2.2	3.24	4	0.03	0.66	1.13
Er/Nd	0.15	0.20	0.11	0.17	0.11	0.21	0.16	0.32	0.13	0.15
Уаут.	-0.02	0.3	0.06	1.08	0.08	-0.03	-0.09	17.91	0.44	0.80

ибольшее количество $\Sigma PЗЭ+Y$ отмечается в типе глинисто-алевролитовый «колымиевый» известняк, а наименьшее – в брахиоподовом известняке-ракушечнике, что, очевидно, обусловлено большим содержанием в первом типе терригенной примеси (табл. 1 и 2). По распределению PЗЭ в пробах отмечается небольшое обогащение ЛРЗЭ; отношение ЛРЗЭ/ТРЗЭ (легкие редкоземельные элементы/тяжелые редкоземельные элементы) варьирует в разрезе по руч. Водопадному от 3.05 до 6.43, а в разрезе по р. Русская-Омолонская – от 3.93 до 6.88. Наибольшее значение этого соотношения отмечается в типе брахиоподовый известняк-ракушечник, а наименьшее – известковистый песчаник (табл. 1 и 2).

Расчет Ce аномалии в спектрах, нормированных по PAAS, производился по формуле: $Ce/Ce^* = C_{e_n} / (Pr_n^2/Nd_n)$ [35], т.е. без учета содержания La, поскольку для этого элемента, как правило, типична положительная аномалия [16, 36, 42, 46]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что отчетливая отрицательная Ce аномалия характерна для обоих разрезов при значительном разбросе значений данного параметра. В породах разреза руч. Водопадного значения Ce аномалии варьируют от 0.44 до 0.91 (среднее 0.67), в разрезе р. Русская-Омолонская – от 0.43 до 0.87 (среднее 0.60). При нормировании PЗЭ+Y на хондрит аномалии Ce имеют аналогичные значения. Большинство изученных карбонатов характеризуются отрицатель-

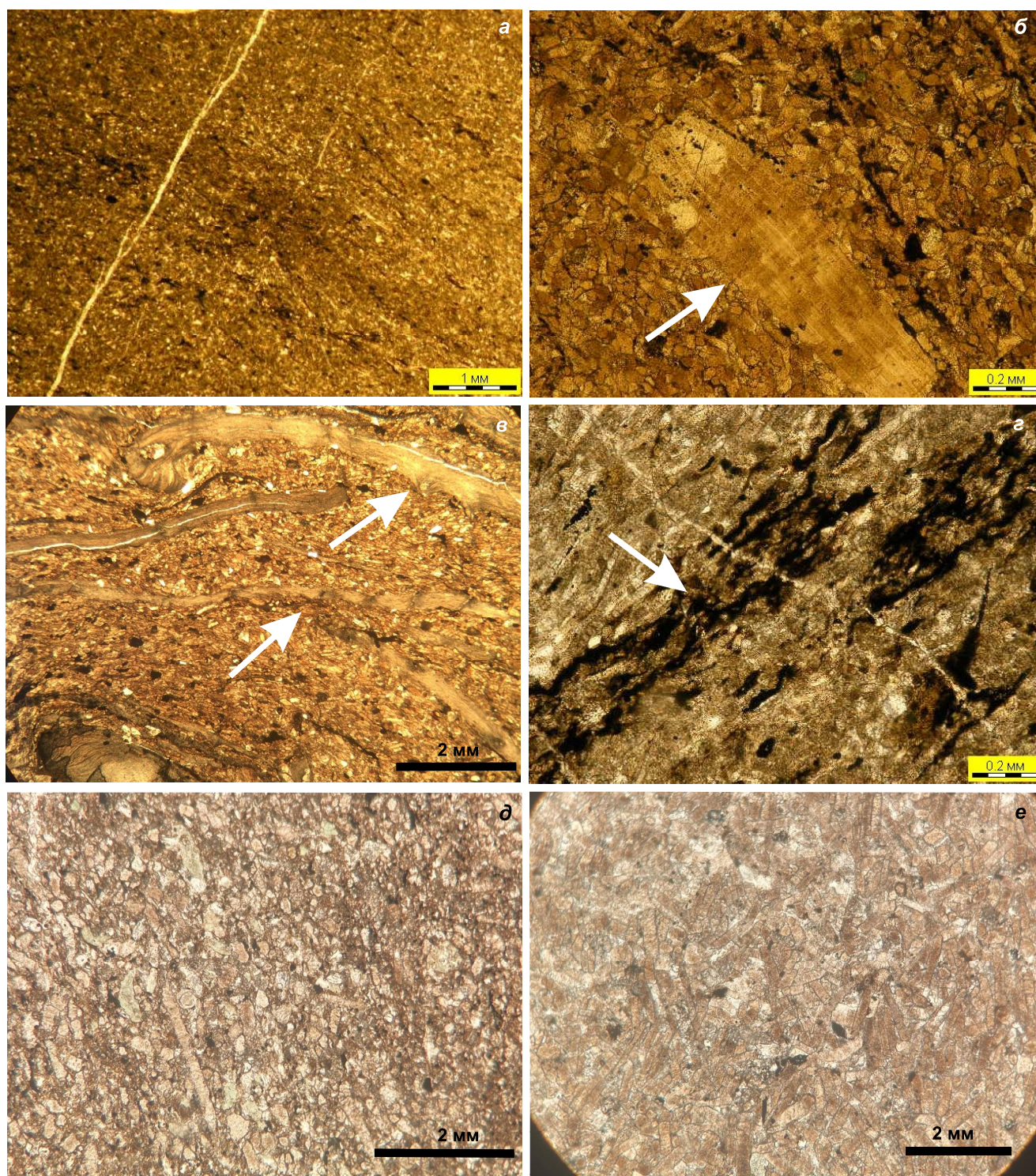


Рис. 3. «Колымевые» известняки под микроскопом.

a – основная масса породы, представленная разноориентированными призмами кальцита, тип «колымевый» известняк; *б* – то же, в центре, вероятно, обломок раковины двусторчатого моллюска; *в* – брахиоподовый известняк-ракушечник, стрелкой указаны створки брахиопод и их фрагменты; *г* – «колымевый» известняк из биогермной постройки, черное – битумоидное вещество; *д* – известковистый песчаник; *е* – глинисто-алевролитовый «колымевый» известняк.

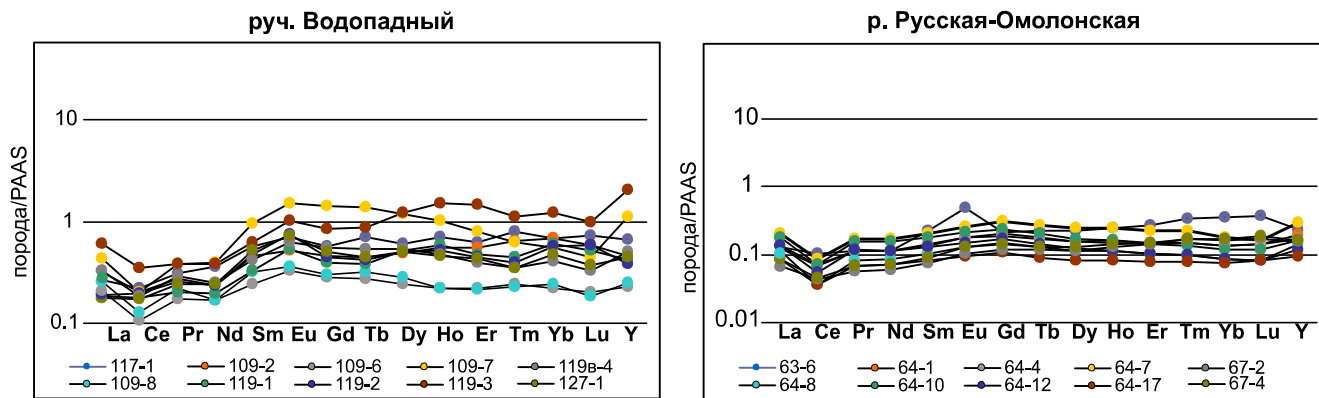


Рис. 4. Спектры распределений РЗЭ, нормированных по PAAS [18].

ными Се аномалиями: в разрезе по руч. Водопадному нормированные значения Се колеблются от 0.42 до 0.87 (среднее 0.64) (рис. 4), а в разрезе по р. Русская-Омолонская – от 0.41 до 0.83 (среднее 0.57). Наибольшее значение этого соотношения отмечается в типе глинисто-алевролитовый известняк, а наименьшее – «колымиевый» известняк из биогермной постройки. В связи с тем, что осадконакопление в Омолонском бассейне происходило в относительно мелководных условиях, отсутствие Се аномалии предполагает прибрежно-морские обстановки, при близко расположенном источнике сноса [20].

Спектры распределения лантаноидов, унаследованных от морской воды и нормированных на PAAS, в известняках обычно характеризуются положительной аномалией Gd, следовательно, этот элемент не должен учитываться при вычислении величины европиевой аномалии [16, 36, 42, 46]. Нами использован вариант расчета: $Eu/Eu^* = Eu_n / (Sm_n^2 \times Tb_n)^{1/3}$ [35]. Установлено, что все пробы относительно PAAS обладают положительной или слабо положительной европиевой аномалией: в известняках по разрезу руч. Водопадного нормированные содержания Eu изменяются от 1.12 до 1.65 (среднее 1.37) (рис. 4), а по разрезу р. Русская-Омолонская – от 1.10 до 2.23 (среднее 1.27). Аномальное значение (2.23) имеет все та же проба 63-6 (рис. 4). Наибольшее значение Eu соотношения отмечается в типе брахиоподовый известняк-ракушечник, а наименьшее – глинисто-алевролитовый «колымиевый» известняк (табл. 1 и 2).

Обычная морская вода характеризуется следующим соотношением редкоземельных и высокозарядных элементов: Y/No от 36 до 74 [24, 27, 44, 46], Th/U < 1 [20], Er/Nd – около 0.27 [28]. Отклонение от этих величин обычно указывает на содержание терригенной примеси в породах. Таким образом, наши результаты (табл. 1 и 2) указывают на то, что известняки

формировались при дополнительном привносе терригенного материала. Здесь можно отметить следующие закономерности: в разрезе по руч. Водопадному значения индексов Y/No, Th/U и Er/Nd выше, чем в разрезе по р. Русская-Омолонская. В обоих разрезах для среднеомолонской подсветы характерны значения, приближенные к значениям нормальной морской воды, тогда как для нижней и верхней подсвет эти соотношения увеличиваются, что подтверждается также петрографическими данными.

В качестве индикаторов **окислительно-восстановительных обстановок** для карбонатных пород использовались: $U_{аут.}$ [47] и Се аномалия [35]. Индекс $U_{аут.}$ рассчитывается по формуле $U-Th/3$. Для кислородных обстановок его значения не превышают 5, для дизоксидных обстановок они находятся в пределах от 5 до 12, для бескислородных – от 12 и выше [33]. Значения $U_{аут.}$ [47] в изучаемых породах располагаются в пределах от -0.09 до +17.91 для отложений разреза руч. Водопадного, и от +0.08 до +1.71 г/т для пород р. Русская-Омолонская, что свидетельствует о преимущественно кислородных обстановках осадконакопления. Исключение составляет проба 119-3, которая имеет ураганное содержание урана (18.3 г/т). Также кислородные условия в омолонское время подтверждаются глубокой отрицательной аномалией Се (до 0.41 г/т) (рис. 4), поскольку в богатой кислородом среде происходит интенсивное удаление церия из морской воды [10], а образующиеся в равновесии с ней карбонатные осадки наследуют спектр распределения растворенных редкоземельных элементов [46]. Ранее [11] оксидные обстановки осадконакопления реконструировались лишь для верхней части нижнеомолонской и нижней части среднеомолонской подсвет.

Для уточнения **палеоклиматических условий** формирования карбонатных пород использовано от-

ношение суммы легких к сумме тяжелых лантаноидов [22, 23]. Для аридного климата это отношение менее 2.5, для семигумидного-семиаридного – 2.5–4.0, для гумидного – больше 4. По данным [22], отношение ЛРЗЭ/ТРЗЭ отражает интенсивность процессов выветривания на суше. В изученных образцах большая часть полученных значений свидетельствует о гумидном климате с величинами значений от 3.05 до 6.43 (среднее 4.44) в разрезе по руч. Водопадному и от 3.93 до 6.88 (среднее 5.45) в разрезе р. Русская-Омолонская. Лишь в пробах 67-2, 119-2 и 119-3 из верхней части омолонской свиты отношение ЛРЗЭ/ТРЗЭ составляет от 3.51 до 3.93, что свидетельствуют об обстановках семиаридного-семигумидного климата.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ петрографических и геохимических данных позволил выделить несколько типов карбонатных пород в отложениях омолонской свиты. Первый тип – «колымиевые» известняки – является самым распространенным, в нем основная масса породы сложена разрозненными призмами кальцита, терригенная примесь представлена зернами кварца, полевыми шпатами, плагиоклазом, опалом и обломками пород. По геохимическим характеристикам этот тип наименее сбалансирован, в частности, содержания таких элементов, как Co, Cu, As и Zn, имеют большой разброс. Второй тип – брахиоподовые известняки-ракушечники – в целом схож с первым типом известняков, отличаясь только большим присутствием обломков раковин брахиопод. По геохимическим особенностям наблюдаются те же закономерности, что и в первом типе. Третий тип – «колымиевые» известняки из биогермной постройки – не похож ни на один другой тип. Для него характерно большее количество битумоидного вещества, меньший размер кальцитовых призм, нижекларковые содержания Sr. Вероятно, эти отличия обуславливаются иным механизмом формирования, чем остальные типы, и действительно связаны с бактериальной деятельностью. Глинисто-алевролитовые «колымиевые» известняки и известковистые песчаники в целом схожи, имеют большее содержание терригенной примеси (15 и 70 %, соответственно), чем вышеупомянутые два первых типа. Они также характеризуются нижекларковыми содержаниями Sr и вышекларковыми – элементов-примесей, типичных для терригенных пород. Между собой они различаются типом цемента и вторичными минералами.

Проба 63-6 (из разреза по р. Русская-Омолонская) имеет ураганные (в несколько раз превышающие кларк) значения Sr, Ba, Zr и Zn. Вероятные причины таких высоких содержаний могут быть связаны с формированием отложений в воде, пересыщенной

этими элементами, например, в присутствии недалекого магматического источника.

Концентрации и распределение «карбонатфильного» Sr изменчивы и колеблются в широких пределах. Самые высокие характерны для известняков из средней части омолонской свиты, они также характеризуются наименьшим количеством терригенной примеси. В разрезе по р. Русская-Омолонская среднее содержание Sr выше, чем в разрезе по руч. Водопадному, что объясняется удаленностью от одного из основных вероятных источников сноса – Охотско-Тайгоносской вулканической дуги [2, 4, 25]. Эта дуга существовала в пермское время и периодически прекращала свою активность, в частности, в среднеомолонское время.

По данным значений Y/No, Th/U и Er/Nd все пять типов карбонатных пород имели в своем составе различное количество терригенной примеси, о чем также свидетельствуют результаты петрографических исследований. Наиболее «чистые» «колымиевые» известняки приурочены к среднеомолонской подсвите.

Такие элементы, как Ba, Sb, Zn, Co, Ni, свидетельствуют о присутствии вулканогенной составляющей [13]; в нашем случае это, очевидно, привнос вулканогенного материала с вулканической дуги. Наибольшие содержания этих элементов отмечаются в слоях с глинисто-алевролитовыми «колымиевыми» известняками и известковистыми песчаниками. Самые низкие характерны для «колымиевых» известняков из биогермной постройки, что, вероятно, связано с затруднением привноса терригенного материала, вследствие его отторжения слоями бактериальных матов. В разрезе по р. Русская-Омолонская отмечаются меньшие содержания данных химических элементов, чем в разрезе по руч. Водопадному. Такие результаты обусловлены большей удаленностью разреза по р. Русская-Омолонская от вулканической дуги.

Повышенные концентрации Be, Sn и As, характерных элементов-примесей пород кислой и средней специализации [13], в разрезе по руч. Водопадному, вероятно, объясняются присутствием в терригенной составляющей примеси обломков кислого состава, образовывавшихся при размытии кедонских вулканитов, что подтверждается и петрографическими данными.

Большая приближенность разреза по руч. Водопадному к источнику сноса, чем разреза по р. Русская-Омолонская, фиксируется и по содержанию РЗЭ+У (в разрезе по руч. Водопадному сумма РЗЭ+У выше, чем в разрезе по р. Русская-Омолонская). Все изученные пробы имеют положительную европиевую аномалию и отрицательную цериевую. Преобладание легких и

тяжелых редкоземельных элементов может указывать на наличие магматических пород основного состава в терригенной примеси [15].

Небольшая (до 50 м) глубина морского бассейна [11] подтверждается присутствием биогермных образований, которые обычно формируются на небольших глубинах, а сами «колымиевые» известняки могли образовываться за счет бактериальной деятельности, на что указывают разнообразные микробиальные постройки (рис. 2, з), а также результаты электронной микроскопии [8] и данные по РЗЭ. Наибольшие значения ЛРЗЭ/ТРЗЭ приурочены к средней части оломонской свиты, где установлено наименьшее количество терригенной примеси. Поэтому обогащение известняков ЛРЗЭ может отражать проявление бактериальной деятельности [29], которая выразилась в поглощении бактериями ЛРЗЭ из водной толщи, а не только могла быть обусловлена присутствием терригенной примеси. Кислородные условия образования карбонатных пород подтверждаются, кроме Се аномалии и $U_{\text{аут.}}$, присутствием достаточно разнообразной бентосной фауны, представленной мелкими фораминиферами, брахиоподами и двустворчатыми моллюсками. Довольно многочисленные брахиоподы-продуктиды, являющиеся стеногалинными организмами, указывают на стабильный морской бассейн с нормальной соленостью. Климат в регионе был гумидный (что подтверждается отношением ЛРЗЭ/ТРЗЭ), температурный режим бассейна колебался в пределах от +6 до +18 °C [11]. В конце оломонского времени наступил кратковременный период потепления, фиксируемый как геохимическими показателями аридизации климата (уменьшением значений ЛРЗЭ/ТРЗЭ), так и проникновением теплолюбивых двустворок и достаточно высокими значениями палеотемператур бассейна (до +20.4 °C) [7].

ВЫВОДЫ

1. В оломонской свите установлены пять типов карбонатных пород: «колымиевые» известняки, брахиоподовые известняки-ракушечники, «колымиевые» известняки из биогермной постройки, глинисто-алевролитовые известняки, известковистые песчаники. Эти карбонатные породы различаются по количеству терригенной примеси и условиям образования. По геохимическим характеристикам все типы преимущественно имеют нижекларковые содержания Sr и вышекларковые – Ba, As и Ni.

2. Впервые получены геохимические доказательства того, что «колымиевые» известняки формировались за счет бактериальной деятельности. Это подтверждается преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми РЗЭ во всех типах карбонатных пород.

3. Установлены новые геохимические свидетельства условий осадконакопления оломонских известняков. В частности, кислородные обстановки осадконакопления подтверждаются отрицательной Се аномалией и значениями геохимического индекса аутигенного U (более пяти). Получило геохимическое обоснования и потепление климата в конце вордского времени, когда уменьшаются значения ЛРЗЭ/ТРЗЭ.

4. Подтверждено, что основными источниками вулканокластического материала были Охотско-Тайгоноская вулканическая дуга (вышекларковые содержания Ba, Sb, Zn, Co, Ni) и кедонская серия вулканитов (кроме петрографических данных об этом свидетельствуют и вышекларковые содержания Be, Sn и As). Разрез по руч. Водопадному располагался ближе к дуге, чем разрез по р. Русская-Оломонская.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят д.г.-м.н. М.И. Тучкову, д.г.-м.н. Р.Х. Сунгатуллина и анонимного рецензента за высказанные замечания и пожелания, что позволило значительно улучшить качество работы.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ проект № 24-2700180, <https://rsfc.ru/project/24-27-00180/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беус А.А., Григорян С.В. Геохимические методы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. М.: Недра, 1975. 280 с.
2. Брынько И.В. Михалицына Т.И., Бяков А.С., Ведерников И.Л. Пермские терригенные отложения Оломонского массива: обстановки формирования и источники сноса (по геохимическим данным) // Тихоокеан. геология. 2023. Т. 42, № 2. С. 105–119.
3. Бяков А.С. Основные типы ископаемых комплексов двустворчатых моллюсков и обстановки осадконакопления в перми Северо-Востока Азии // Бюллетень МОИП. Отделение геологии. 1999. Т. 74. Вып. 5. С. 30–34.
4. Бяков А.С., Прокопьев А.В., Кутыгин Р.В., Ведерников И.Л., Будников И.В. Геодинамические обстановки формирования пермских седиментационных бассейнов Верхояно-Колымской складчатой области // Отеч. геология. 2005. № 5. С. 81–85.
5. Бяков А.С. Зональная стратиграфия, событийная корреляция, палеобиогеография перми Северо-Востока Азии (по двустворчатым моллюскам), Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2010. 262 с.
6. Бяков А.С. Новая зональная схема пермских отложений Северо-Востока Азии по двустворчатым моллюскам. Ст. 2. Зональное расчленение // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 1. С. 3–17.
7. Бяков А.С. Морские двустворчатые моллюски как индикаторы климатических изменений в перми Северо-Востока Азии // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естественные науки. 2020. Т. 162, № 2. С. 205–217.

8. Ганелин В.Г., Ведерников И.Л., Горькова Н.В. Бактериальный литогенез в позднелазейских бассейнах Северо-Востока Азии // Геология рифов: Материалы Всерос. литологического совещ. Инст. геологии Коми НЦ УрО РАН, 2015. С. 29–31.
9. Ганелин В.Г. Верхояно-Чукотский рифтогенез и позднелазейские экосистемы Северо-Востока Азии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2022. Т. 30, № 5. С. 3–45.
10. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане // Литология и полезные ископаемые. 2004. № 4. С. 339–358.
11. Кашик Д.С., Ганелин В.Г., Караваева Н.И., Бяков А.С., Миклухо-Маклай О.А., Стукалина Г.А., Ложкина Н.В., Дорофеева Л.А., Бурков Ю.К., Гутенева Е.И., Смирнова Л.Н.. Опорный разрез перми Омолонского массива. Л.: Наука, 1990, 200 с.
12. Количественный химический анализ. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. М.: ГУАК, 2005. 31 с.
13. Летникова Е.Ф. Геохимические типы карбонатных отложений южного обрамления Сибирской платформы: Дис. ... док-ра геол.-минер. наук. Новосибирск: Инст. геологии и минералогии СО РАН. 2008. 309 с.
14. Лихарев Б.К. Фауна пермских отложений Колымского края // Колымская геологическая экспедиция 1929–1930 гг. Л.: Наука, 1934. Т. 1. Ч. 2. 148 с.
15. Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Титов Ю.В., Червяковская М.В. Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы // Литосфера. 2020. Т. 20, № 1. С. 40–62.
16. Мизенс Г.А., Дуб С.А., Геохимия известняков пограничного интервала нижнего-среднего карбона на Южном и Среднем Урале // Литосфера. 2022. Т. 22, № 3. С. 300–326.
17. Решения 3-го Межведомственного регионального стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и мезозою Северо-Востока России (Санкт-Петербург, 2002) / ред. Т.Н. Корень, Г.В. Котляр. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 268 с.
18. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция: перевод с англ. М.: Мир, 1988. 384 с.
19. Терехов М.И. Стратиграфия и тектоника южной части Омолонского массива. М.: Наука, 1979. 113 с.
20. Тучкова М.И., Филимонова Т.В., Исакова Т.Н., Загоскина-Белошей В.Э., Соколов С.Д., Дубенский А.С. Новые данные о позднелазейских конгломератах острова Врангеля и их геологической интерпретации // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2025. Т. 31, № 2. (в печати).
21. Чехов А.Д. Тектоническая эволюция Северо-Востока России (океанноморская модель). М.: Науч. мир, 2000. 199 с.
22. Шатров В.А., Войцеховский Г.В. Применение лантаноидов для реконструкций обстановок осадкообразования в фанерозое и протерозое (на примере разрезов чехла и фундамента Восточно-Европейской платформы) // Геохимия. 2009. № 8. С. 805–824.
23. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.
24. Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. V. 123. P. 323–333.
25. Biakov A.S. Permian bivalve mollusks of Northeast Asia // J. Asian Earth Sc. 2006. V. 26, N 3–4. P. 235–242.
26. Brynko I.V., Biakov A.S., Vedernikov I.L. New data on the «kolymic» limestones of the Omolon Massif // Sedimentary Earth systems: Stratigraphy, geochronology, petroleum resources. Proceedings of Kazan Golovkinsky stratigraphic meeting. Filodiritto Publisher, Bologna, 2019. P. 51–57. DOI: 10.26352/D924F5008
27. Bolhar R., Van Kranendonk M.J. A non-marine depositional setting for the northern Fortescue Group, Pilbara Craton, inferred from trace element geochemistry of stromatolitic carbonates // Prec. Res. 2007. V. 155. P. 229–250.
28. De Baar H.J., German C.R., Elderfield H., Van Gaans P. Rare earth element distributions in anoxic waters of the Cariaco Trench // Geochim. et Cosmochim. Acta, 1988. N 52. P. 1203–1219.
29. Della Porta G., Webb G.E., McDonald I. REE patterns of microbial carbonate and cements from Sinemurian (Lower Jurassic) siliceous sponge mounds (Djebel Bou Dahar, High Atlas, Morocco) // Chem. Biol. 2015. V. 400. P. 65–86.
30. Elderfield H. The oceanic chemistry of the rare earth elements // Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1988. V. 325. P. 105–126.
31. Ganelin V.G., Biakov A.S. The Permian biostratigraphy of the Kolyma-Omolon region, Northeast Asia // J. Asian Earth Sci. 2006. V. 26, N 3–4. P. 225–234.
32. Greaves M.J., Elderfield H., Sholkovitz E.R. Aeolian sources of rare earth elements to the Western Pacific Ocean // Mar. Chem. 1999. N 68. P. 31–38.
33. Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // Chem. Geol. 1994. V. 111. P. 111–129.
34. Kauffman E.G., Runnegar B. Atomodesma (Bivalvia), and Permian species of the United States // J. of Paleontology. 1975. V. 49, N. 1. P. 23–51.
35. Lawrence M.G., Creig A., Collerson K.D., Kamber B.S. Elements and yttrium variability in south east Queensland waterways // Aquatic Geochemistry. 2006. V. 12. P. 39–72.
36. Ling H.-F., Chen X., Li D., Wang D., Shields-Zhou G.A., Zhu M. Cerium anomaly variations in Ediacaran – earliest Cambrian carbonates from the Yangtze Gorges area, South China: implications for oxygenation of coeval shallow seawater // Prec. Res. 2013. V. 225. P. 110–127.
37. McLennan S.M. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes / Lipin BR, McKay GA (eds.) // Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Reviews in Mineralogy, 1989. N 21. P. 169–200.
38. Murray R.W., Leinen, M., Chemical transport to the seafloor of the equatorial Pacific Ocean across a Latitudinal transect at 135°W. Tracking sedimentary major, trace and rare earth element fluxes at the Equator and the Intertropical Convergence Zone // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1993. N 57. P. 4141–4163.
39. Piepgras D.J., Jacobsen S.B. The behaviours of rare earth elements in seawater: Precise determination of ferromanganese crusts // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1992. N 56. P. 1851–1862.

40. Piper D.Z. Rare earth elements in the sedimentary cycle, a summary // *Chem. Geol.* 1974. V. 14. P. 285–304.
41. Sholkovitz E.R. Rare earth elements in the sediments of the North Atlantic Ocean, Amazon delta, and East China Sea: reinterpretation of terrigenous input patterns to the oceans // *American J. Sci.* 1988. N 288. P. 236–281.
42. Tostevin R., Shields G.A., Tarbuck G.M., He T., Clarkson M.O., Wood R.A. Effective use of cerium anomalies as a redox proxy in carbonate-dominated marine settings // *Chem. Geol.* 2016. V. 438. P. 146–162.
43. Yancey T.E., Boud D.W. Revision of Alatoconchidae: a remarkable family of Permian bivalves // *Paleontology.* 1983. V. 26, Part. 3. P. 497–520.
44. Wallace M.W., Hood A.V.S., Shuster A., Greig A., Planavsky N.J., Reed C.P. Oxygenation history of the Neoproterozoic to early Phanerozoic and the rise of land plants // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2017. V. 466. P. 12–19.
45. Waterhouse J.B. Permian Stratigraphy and Faunas of New Zealand // *N.Z. Geol. Surv. Bull.* 1964. A.s. 72. P. 1–101.
46. Webb G.E., Kamber B.S. Rare earth elements in Holocene reef al microbialites: a new shallow seawater proxy // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2000. V. 64. P. 1557–1565.
47. Wignall P.B., Mayers K.J. Interpreting benthic oxygen levels in mudrocks: a new approach // *Geol. Soc. . Amer.* 1988. V. 16. P. 452–45.

Рекомендована к печати А.И. Ханчуком

после доработки 25.03.2025 г.

принята к печати 28.04.2025 г.

GEOCHEMISTRY OF THE PERMIAN «KOLYMIC» LIMESTONES OF THE OMOLON MASSIF (NORTHEAST ASIA)

I.V. Brynko, A.S. Biakov, I.L. Vedernikov, T.I. Mikhailsyna

*Shilo North-East Interdisciplinary Research Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia;
e-mail: ibrynko@mail.ru*

Five types of carbonates were differentiated among the Middle Permian (Roadian-Wordian) deposits of the Omolon massif when studying rare-earth and rare element distribution and petrographic characteristics. New data were obtained on the geochemical features of the «Kolymic» limestones indicating their bacterial nature. The rocks were formed in shallow oxygen-rich environments under humid climate conditions. Possible sources of volcano-terrigenous admixture in the limestones were intermediate and basic volcanics (Okhotsk-Taigonos volcanic arc), as well as acidic igneous rocks (Devonian volcanics of the Kedon Series), which were located near the sedimentation basin.

Key words: «Kolymic» limestones, rare and rare-earth elements, Middle Permian, North-East of Russia.