

УДК 552.578.3:550.4

DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4254

Шифр специальности ВАК: 1.6.5

Литолого-геохимическая характеристика и обстановки седиментации высокоуглеродистых отложений кембрия восточной окраины Сибирской платформы (бассейн р. Кюленке)

И.В. Вараксина✉

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук, Россия, г. Новосибирск*

✉VaraksinaIV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью изучения высокоуглеродистых отложений как потенциальных источников углеводородов и рудных полезных ископаемых, способных существенно увеличить минерально-сырьевой ресурс России. Кроме того, анализ литолого-геохимических особенностей и реконструкция условий седиментации куонамской свиты позволяют более точно судить о характере ниже-среднекембрийского палеобассейна на востоке Сибирской платформы. *Цель:* выявить литолого-геохимические особенности состава и определить обстановки седиментации куонамской свиты. *Объект:* высокоуглеродистые отложения куонамской свиты, вскрытые поисковыми скважинами на восточной окраине Мунского сводового поднятия Сибирской платформы в бассейне р. Кюленке. *Методы:* литологическое послойное описание кернового материала; минералого-петрографический анализ; рентгеноструктурный, рентгенофлуоресцентный и микроэлементный анализы; определение содержания форм серы и железа методом мокрой химии; сканирующая электронная микроскопия с применением рентгеноспектрального микрозонда; анализ петрохимических модулей. *Результаты.* Установлено, что куонамская свита в изученных разрезах обладает выдержанным строением, в котором четко прослеживаются четыре литолого-стратиграфических горизонта. Состав отложений преимущественно смешанный и определяется вариациями трёх основных минеральных групп: глинистой, карбонатной и кремнистой, а также органического вещества. Показаны разные формы нахождения органического вещества, подтверждающие смешанный водорослево-бактериальный генезис биоценоза куонамского бассейна. Выявленные литологические особенности и литохимические данные свидетельствуют о накоплении высокоуглеродистых отложений на значительном удалении от источников сноса в депрессионной зоне открыто-морского бассейна со слабой циркуляцией придонных вод в бескислородных условиях. Геохимическая среда в карбонатно-кремнистых илах была преимущественно эвксинной. Седиментация происходила на протяжении одного крупного трансгрессивно-регрессивного седиментационного цикла, представляющего типичную последовательность заполнения глубоководной депрессии с некомпенсированным осадконакоплением.

Ключевые слова: куонамская свита, кембрий, литогеохимия, условия седиментации, Сибирская платформа

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы FWZZ–2022–0008 Государственной программы ФНИ.

Для цитирования: Вараксина И.В. Литолого-геохимическая характеристика и обстановки седиментации высокоуглеродистых отложений кембрия восточной окраины Сибирской платформы (бассейн р. Кюленке) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 3. – С. 163–175. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4254

UDC 552.578.3:550.4

DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4254

Lithological and geochemical characteristics and sedimentary environments of the Cambrian high-carbon deposits in the east of the Siberian platform (Kyulenke river basin)

I.V. Varaksina✉

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

✉VaraksinaIV@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. The need to study high-carbon deposits as potential sources of hydrocarbons and ore minerals that can significantly increase the mineral resource of Russia. In addition, the analysis of lithological and geochemical features and the reconstruction of the sedimentation conditions of the Kuonamka Formation make it possible to more accurately judge the nature of the Lower and Middle Cambrian paleobasin in the east of the Siberian Platform. **Aim.** To identify lithological and geochemical features of the composition and determine the sedimentation environment of the Kuonamka Formation. **Object.** High-carbon deposits of the Kuonamka Formation uncovered by exploration wells on the eastern margin of the Mun arch of the Siberian platform in the Kulenke river basin. **Methods.** Lithological description of core material; mineralogical and petrographic analysis; X-ray diffraction, X-ray fluorescence and microelement analysis; determination of the content of sulfur and iron forms by wet chemistry; scanning electron microscopy using X-ray spectral microprobe; analysis of petrochemical modules. **Results.** It was established that the Kuonamka Formation in the studied sections has a consistent structure of four well-defined lithological-stratigraphic horizons. The composition of the deposits is predominantly mixed and is determined by variations in three main mineral groups: clay, carbonate and siliceous, in addition organic matter. The paper demonstrates different forms of organic matter confirming the mixed algal-bacterial genesis of the biocenosis of the Kuonamka basin. The revealed lithological features and lithochemical data indicate the accumulation of high-carbon deposits at a considerable distance from the drift sources in the depression zone of the open sea basin with weak circulation of bottom waters in anoxic conditions. The geochemical euxinic environment was dominant in carbonate-siliceous muds. Sedimentation occurred during one major transgressive-regressive sedimentation cycle being a typical sequence of filling a uncompensated deep depression.

Keywords: Kuonamka Formation, Cambrian, litho geochemistry, sedimentary environments, Siberian platform

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the topic FWZZ-2022-0008 of the State Program of the FSR.

For citation: Varaksina I.V. Lithological and geochemical characteristics and sedimentary environments of the Cambrian high-carbon deposits in the east of the Siberian platform (Kyulenke river basin). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 3, pp. 163–175. DOI: 10.18799/24131830/2024/3/4254

Введение

Высокоуглеродистые отложения на сегодняшний день являются объектом повышенного внимания в первую очередь как потенциальные источники углеводородов, хотя нередко с ними связаны и другие полезные ископаемые, такие как редкие и благородные металлы, уран, фосфориты и др. [1–5 и др.]. В литературе используются разные понятия для их обозначения: «доманиковые свиты», «доманикиты», «доманикоиды», «черные сланцы» и т. д. Все эти термины относятся к осадочным образованиям глинистого, карбонатно-глинистого, кремнисто-глинистого или карбонатно-кремнисто-глинистого состава, обогащенным органическим веществом (ОВ) [6, 7 и др.]. Отложения подобного типа широко развиты в кембрийском осадочном

комплексе на востоке Сибирской платформы. Они выделены в куонамскую битуминозную карбонатно-сланцевую формацию, объединяющую одноименную свиту и её возрастные аналоги [7–9].

Куонамская свита распространена на большей части Анабарской антеклизы, где довольно детально исследована в районах выхода на дневную поверхность. Однако литолого-геохимические особенности её погруженных горизонтов, вскрытые немногочисленными скважинами, освещены пока ещё недостаточно. Кроме того, среди исследователей до сих пор нет единого мнения относительно морфоструктуры и глубины куонамского бассейна. Согласно модели, предложенной в 1970 г. А.Э. Конторовичем и В.Е. Савицким, накопление куонамского комплекса проходило в мелководном хорошо аэрируемом бас-

сейне в условиях гумидного климата [10]. В дальнейшем эта идея получила широкую поддержку [7, 8 и др.]. При этом одновременно с ней было высказано предположение о глубоководном генезисе куонамских отложений [11]. Последующее поступление новых данных, комплексный анализ результатов различных геолого-геофизических исследований и применение фациально-седиментационного моделирования позволили сторонникам данной гипотезы достаточно убедительно обосновать наличие на востоке Сибирского кратона глубоководного некомпенсированного окраинно-депрессийного бассейна с аноксичной средой [9, 12]. Тем не менее окончательного признания этот вариант не получил, и ряд авторов по-прежнему продолжают придерживаться модели мелководной седиментации куонамской свиты [13, 14]. Очевидно, что для преодоления этих разногласий необходимы дополнительные исследования.

Материалы и методы

Объектом данного исследования стали высокоуглеродистые отложения куонамской свиты, вскрытые поисковыми скважинами на восточной окраине Мунского сводового поднятия [15] в бассейне р. Кюленке (рис. 1).



Рис. 1. Обзорная карта района исследований [15]. Границы структур: 1 – надпорядковых, 2 – I порядка; 3 – район исследований; 4 – изученные разрезы. Структуры: 1 – Анабарский мегасвод, 2 – Оленёкский свод, 3 – Мунский свод, 4 – Суханская впадина

Fig. 1. Overview map of the study area [15]. Borders of structures: 1 – supra-order, 2 – I order; 3 – study area; 4 – studied sections. Structures: 1 – Anabar mega arch, 2 – Olenyok arch, 3 – Mun arch, 4 – Sukhan depression

Литологическое изучение куонамских отложений базировалось на детальном описании керна четырёх скважин, петрографического анализа шлифов (80 образцов) и данных сканирующей электронной микроскопии с применением рентгено-спектрального микрозонда. Дополнительно для уточнения вещественного состава и обстановок седиментации учитывались результаты геохимических исследований (75 образцов): рентгенофлуоресцентного анализа с определением основных породообразующих окислов, рентгеноструктурного анализа глинистой фракции, микроэлементного анализа методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP–MS), анализа методом мокрой химии содержания серы сульфатной и сульфидной, а также форм железа, выполненных в аналитическом центре Института геологии и минералогии Сибирского отделения (СО) Российской Академии наук (РАН). Содержание в породах органического углерода определялось в лаборатории геохимии нефти и газа Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

Результаты литологических исследований

В рассматриваемом районе осадочный чехол состоит из верхнепротерозойско-кембрийских терригенно-карбонатных отложений и несогласно перекрывающих их четвертичных алевро-песчаных образований. Возрастной диапазон куонамской свиты охватывает верхнюю часть ботомского яруса, тойонский ярус нижнего кембрия и нижнюю часть амгинского яруса среднего кембрия [9]. В изученных разрезах куонамская свита согласно залегает на глинистых известняках эмяксинской свиты и характеризуется выдержанным строением и мощностью около 30 м (рис. 2). В её составе выделяются четыре литолого-стратиграфических горизонта [7].

Нижний бороулахский горизонт, соответствующий пачке I, имеет мощность около 8 м и представлен переслаиванием чёрных глинисто-кремнистых и глинистых, неравномерно карбонатизированных пород. Наблюдается постепенное снижение глинистости пачки в результате уменьшения мощности прослоев аргиллитов от 0,3–1,1 м в основании разреза до 0,01–0,05 м в верхней части. Для глинисто-кремнистых пород характерна тонкая (≤ 10 мм) линзовидно-горизонтальная слоистость, обусловленная неравномерным распределением карбонатного, кремнистого, глинистого и органического вещества (рис. 3, а). Содержание кремнезёма изменяется от 35 до 50 %. Глинистый материал в количестве 20–35 % представлен иллитом. В составе карбонатной примеси, количество которой не превышает 15 %, присутствуют кальцит и доломит. Концентрация органического углерода ($C_{орг.}$) по всему разрезу высокая (8–10 %).

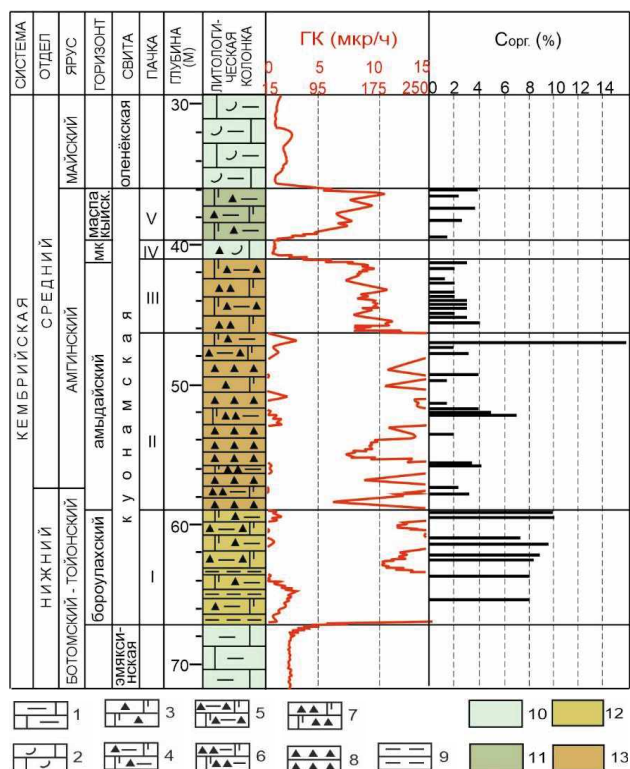


Рис. 2. Строение и состав куонамской свиты (на примере одной из скважин). 1, 2 – известняки: 1 – глинистые, 2 – с фаунистическим детритом; 3–5 – смешанные породы: 3 – кремнисто-карбонатные, 4 – глинисто-кремнисто-карбонатные, 5 – карбонатно-глинисто-кремнистые; 6–8 – силициты: 6 – глинисто-карбонатные, 7 – карбонатные, 8 – с примесью карбонатного материала <5%; 9 – аргиллиты; 10–13 – преобладающий состав пород в разных пачках: 10 – карбонатный, 11 – кремнисто-карбонатный, 12 – кремнисто-глинистый, 13 – кремнистый

Fig. 2. Structure and composition of the Kuonamka formation (on the example of one of the wells). 1, 2 – limestones: 1 – argillaceous, 2 – with faunal detritus; 3–5 – mixed rocks: 3 – siliceous-carbonate, 4 – argillaceous-siliceous-carbonate, 5 – carbonate-clay-siliceous; 6–8 – silicites: 6 – clay-carbonate, 7 – carbonate, 8 – with carbonate material <5%; 9 – mudstones; 10–13 – prevailing composition of rocks in different members: 10 – calcareous, 11 – siliceous-calcareous, 12 – siliceous-argillaceous, 13 – siliceous

В основании горизонта наблюдается довольно существенная примесь обломков кварца, полевых шпатов и реже мусковита пелитово-алевритовой размерности, доля которой вверх по разрезу постепенно снижается от 5 до 1 %. Достаточно широко развита пиритизация (4–5 %). Пирит присутствует в виде неравномерно рассеянных мелких зерен и стяжений (от долей мм до 2–3 мм), нередко минерализует органическое вещество. Следует отметить, что в обнажениях (в том числе в долине р. Кюленке) в основании горизонта залегает пласт

аргиллитов с конкрециями фосфоритов [7]. В изученных разрезах фосфатные конкреции не зафиксированы, что связано, по-видимому, с неполным выносом при бурении тонкослоистых листоватых аргиллитов. Ввиду того, что бороулахский горизонт отличается повышенными содержаниями глинистого, углеродистого и фосфатного вещества, он принят в качестве маркирующего [7, 16].

Вышележащий амыдайский горизонт характеризуется наибольшей мощностью (18–21 м), преобладанием кремнистой составляющей и двучленным строением. Нижняя пачка II сложена силицитами с примесью карбонатного материала и прослоями кремнистых известняков. Породы чёрные углеродистые, микроскопически линзовидно-горизонтально-слоистые за счет неравномерного распределения кремнистого, карбонатного и органического вещества (рис. 3, б, в). Карбонатная составляющая силицитов изменяется от 3–5 до 35 % и представлена в основном кальцитом, в меньшей степени доломитом. Содержание Сорг. меняется от 2 до 14 %, преобладающее 3–5 %. Примесь глинистого материала незначительная, в основном 2–4 %. В верхней пачке III глинистой примеси становится больше (7–15 %), возрастает роль карбонатной компоненты с доминированием доломита (10–40 %) и начинают преобладать смешанные глинисто-карбонатно-кремнистые и глинисто-кремнисто-карбонатные породы (рис. 3, г). Концентрация ОВ становится ниже, в целом 2–3 %, за исключением единичного прослоя глинисто-кремнистого известняка в приподошвенной части, где содержание Сорг. достигает 17 %. Повсеместно присутствует пирит (1–3 %) в виде тонкой сыпи, глобулей и линзовидных стяжений (до 0,7 мм), часто приуроченных к детритовому ОВ.

Следующий малокуонамский горизонт (пачка IV), несмотря на малую мощность (0,3–1,7 м), тоже рассматривается в качестве маркирующего, поскольку отличается исключительно известковым составом и прослеживается на всей площади развития свиты [1, 4, 9]. В изученных разрезах горизонт мощностью 1,0–1,5 м представлен серыми глинистыми, участками слабо окремненными известняками с примесью фаунистического детрита (рис. 3, д), значения Сорг. в которых меньше 1 %.

Завершает разрез пачка V мощностью 3–4 м, относящаяся к маспакьскому горизонту, сложенная темно-серыми до чёрных глинисто-кремнисто-карбонатными горизонтально-тонкослоистыми породами с прослоями чёрных известковистых аргиллитов. В смешанных породах слоистость обусловлена чередованием слойков (0,5–10,0 мм) с преобладанием глинистого, кремнистого или карбонатного материала (рис. 3, е).

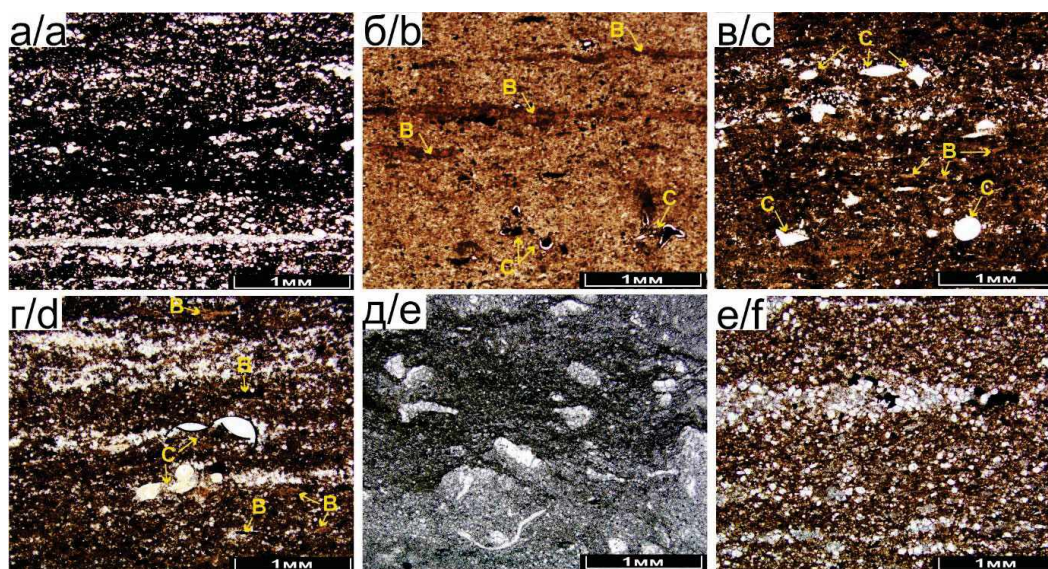


Рис. 3. Основные типы пород куонамской свиты: а) кремнисто-глинистая слабо карбонатизированная порода с высоким содержанием Сорг. (7 %) и нечеткой микрослоистостью (бороулахский горизонт); б, в) силициты с детритом кремниевых организмов (С) и бактериально-водорослевыми остатками (В). Примесь карбонатного материала 1–5 %, содержание Сорг. 6–8 % (нижняя пачка амыдайского горизонта); г) глинисто-карбонатно-кремнистая порода с содержанием Сорг. 5 %, послойной концентрацией карбонатного материала, бактериально-водорослевым и фаунистическим детритом (верхняя пачка амыдайского горизонта); д) известняк микрокристаллический с редко рассеянным скелетным детритом (малокуонамский горизонт); е) глинисто-кремнисто-карбонатная порода с микролинзовидной слоистостью за счет обособлений карбонатного материала в глинисто-кремнистой матрице, обогащенной ОВ (Сорг. 3 %, маспакыйский горизонт)

Fig. 3. The main types of rocks of the Kuonamka Formation: a) siliceous-argillaceous low carbonatized rock with a high content Corg. (7%) and illegible microlayering (Boroulakh horizon); b, c) silicites with detritus of siliceous organisms (C) and bacterial-algal remnants (C). Admixture of carbonate material 1–5%, Corg. content 6–8% (lower member of the Amydai horizon); d) argillaceous-carbonate-siliceous rock with Corg. content 5%, layered concentration of carbonate material, bacterial-algal and faunal detritus (upper member of the Amydai horizon); e) microcrystalline limestone with sparsely scattered skeletal detritus (Malokuonam horizon); f) argillaceous-siliceous-carbonate rock with microlenticular lamination caused segregation of carbonate material in a argillaceous-siliceous matrix enriched in organic matter (Corg. 3%, Maspakiy horizon)

Содержание кремнезёма изменяется в пределах 20–35 %, кальцита 20–45 %, доломита 15–20 %, а глинистого материала от 7 до 25 %. ОВ присутствует в количестве 2–3 %, редко 4 %. Пирит (≤ 4 %) встречается в виде хаотично рассеянных зерен и мелких скоплений (0,1–0,5 мм), преимущественно в ассоциации с ОВ.

Перекрываются углеродистые отложения куонамской свиты светло-серыми и пестроцветными глинистыми известняками с остатками разнообразной фауны оленёкской свиты. Содержание ОВ в них резко падает до 0,5 % и ниже.

Анализ строения и состава куонамской свиты показал, что в ней присутствует три основных порообразующих компоненты: глинистая, кремнистая и карбонатная, соотношения между которыми в каждом горизонте различны. В нижнем бороулахском горизонте преобладает глинистый материал, в амыдайском горизонте доминирует кремнистая составляющая, верхние малокуонамский и маспакыйский горизонты отличаются высоким содержанием карбонатного вещества.

Среди глинистых минералов аргиллитов и смешанных пород по данным рентгеновского анализа наиболее распространены иллит, смектит и смешанослойные образования ряда иллит–смектит. В меньшем количестве присутствует хлорит, причем в основном он концентрируется в бороулахском горизонте. Преобладание смектита и иллита при отсутствии каолинита указывает на существенную удаленность источника сноса. Об этом же свидетельствует незначительное содержание терригенных обломков исключительно алевритовой размерности.

В карбонатной части зафиксировано два минерала: кальцит и доломит, преимущественно тонко-микрокристаллические, в большинстве случаев присутствующие совместно. Иногда встречается яснокристаллический кальцит, выполняющий остатки скелетной фауны, состав которой из-за очень мелких размеров ($\leq 0,2$ мм) определить затруднительно (рис. 4, а). Судя по незначительной примеси фаунистического детрита, накопление карбонатного вещества в большей степени было

связано с привнесом тонкозернистого материала из достаточно удаленных мелководных областей, чем с отмиранием планктонных организмов. Только в малокуонамское время наблюдается некоторое увеличение содержания скелетных остатков.

Кремнезём представлен тонкозернистым агрегатом в виде смеси тонкокристаллического кварца и халцедона с хаотично рассеянными остатками спикул кремнёвых губок, центральные части которых нередко выполнены чёрным ОВ, реже радиолариями (рис. 4, б). Нередко наблюдается перекристаллизация сферолитово-волокнистых агрегатов, слагающих фаунистические остатки, в тонкокристаллические, что свидетельствует о преимущественно биогенном характере кремнистой седиментации.

Кроме основных компонентов, иногда в качестве породообразующего выступает ОВ, морфология и форма нахождения которого различны. Исследование ОВ в прозрачных шлифах под поляризационным микроскопом и методом сканирующей электронной микроскопии показало, что оно присутствует в двух формах: 1) в виде тонкоперетертого детрита (размер частиц меньше 0,05 мм), неравномерно рассеянного и/или образующего послойные скопления (рис. 4, в); 2) в виде аморфного ве-

щества, окрашенного в проходящем свете в разные оттенки красного, желтого и бурого цвета, выполняющего послойно ориентированные сильно уплощенные линзочки (шириной 0,01–0,15 мм, длиной от 0,05 до 1–2 мм) (рис. 4, г).

Детритовое ОВ представлено в основном фрагментами цианобактериального планктона. Степень преобразования органических остатков различна: от хорошо сохранившихся нитевидных и палочковидных форм, присущих цианобактериям, в составе которых, согласно данным рентгеноспектрального микрозондового анализа, помимо углерода присутствуют такие элементы, как О, Р, Cl, S, Si, Al, K, Na, Ca, Mg, Fe, V (рис. 5, а), до углефицированных остатков неясного генезиса без элементов-примесей (рис. 5, б). Линзовидные выделения бесструктурного ОВ, похожего на коллоальгенит с незначительной примесью микроэлементов (рис. 5, в), встречаются реже и представляют собой разложившиеся до аморфного состояния остатки водорослей неясной систематики. Каких-либо закономерностей в распределении различных форм ОВ не выявлено, нередко они присутствуют вместе, что подтверждает данные геохимических исследований о смешанном водорослево-бактериальном биоценозе куонамского бассейна [17].

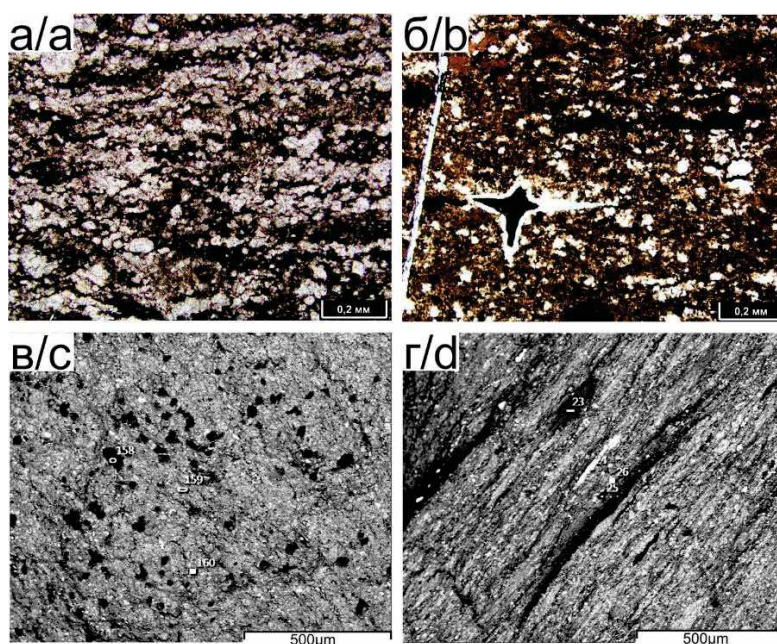


Рис. 4. Породообразующие компоненты (а, б – фото шлифов в параллельных николях; в, г – фото образцов в обратно-рассеянных электронах – ОРЭ): а) яснокристаллический кальцит слагает фаунистические остатки округлых форм, образующих послойно-линзовидные скопления в углеродисто-кремнисто-глинистой матрице; б) многочисленные остатки кремниевых спикул и раковин (белое) в силиците, обогащенном ОВ; в) тонкоперетертый водорослево-бактериальный детрит (чёрное) хаотично распределен в глинисто-кремнисто-карбонатной матрице; г) послойно-линзовидное распределение аморфного ОВ (чёрное) в карбонатном силиците

Fig. 4. Rock-forming components (a, b – photo of thin sections in plain light; c, d – photo of samples in back-scattered electrons – BSE): a) clear-crystalline calcite composes faunal remnants of rounded forms, forming layered lenticular accumulations in a carbonaceous-siliceous-argillaceous matrix; b) numerous remnants of siliceous spicules and shells (white) in silicite enriched in organic matter; c) finely ground algal-bacterial detritus (black) randomly distributed in a argillaceous-siliceous-carbonate matrix; d) layered lenticular distribution of amorphous organic matter (black) in carbonate silicite

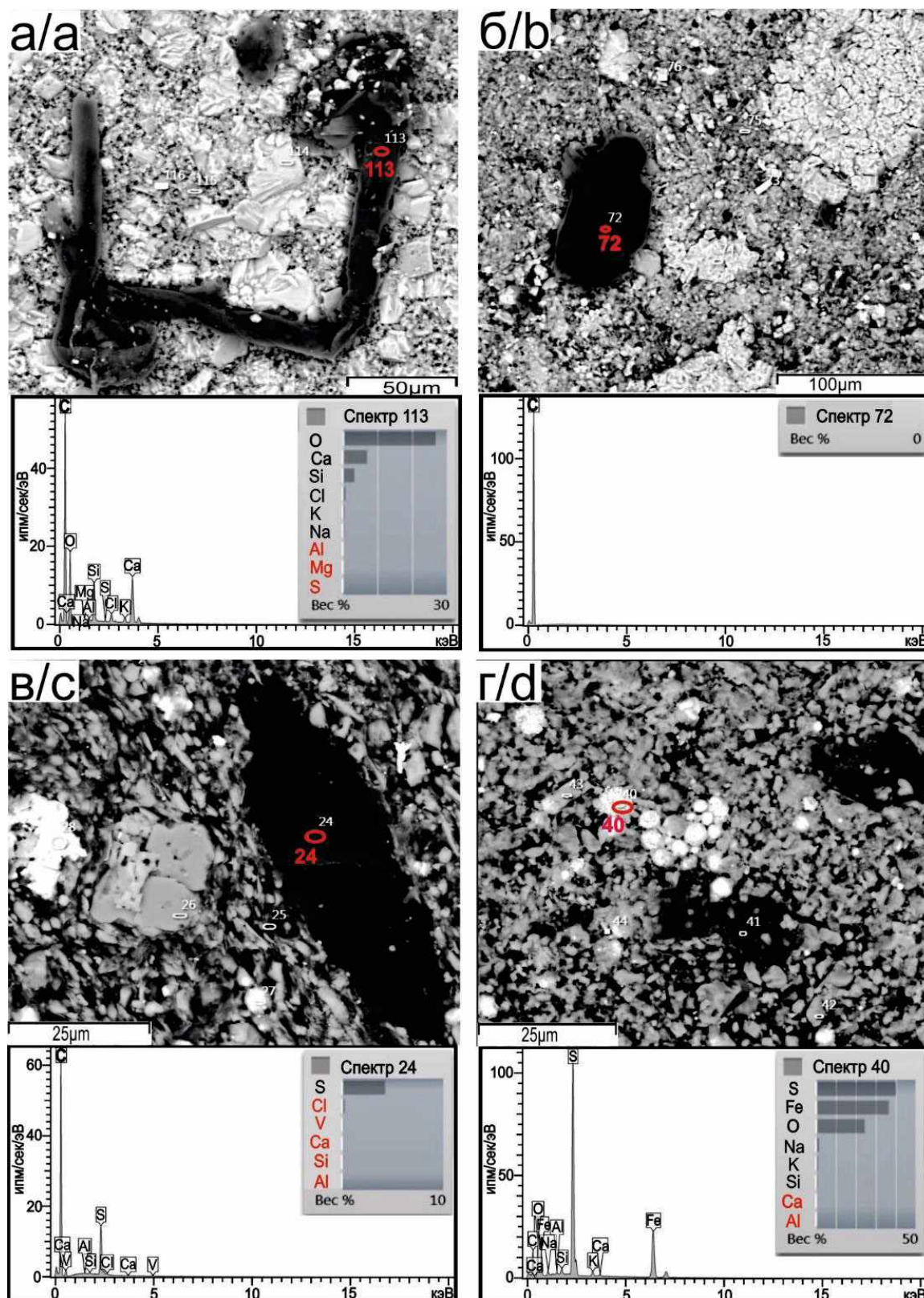


Рис. 5. Органическое вещество (снимки в ОПЭ с результатами рентгеноспектрального микроанализа): а) хорошо сохранившийся фрагмент цианобактериального планктона нитевидной формы; б) углефицированный остаток, в составе которого отсутствуют элементы-примеси; в) линзовидное выделение коллоальгенита; г) тонкоперетертый цианобактериальный детрит в ассоциации с фрамбоидальным пиритом

Fig. 5. Organic matter (images in the BSE with the results of X-ray spectral microanalysis): а) well-preserved filiform fragment of cyanobacterial plankton; б) carbonized remnant without admixture elements; в) lenticular segregation of colloalgenite; д) finely ground cyanobacterial detritus in association with framboidal pyrite

Результаты геохимических исследований

Для уточнения минералогического состава и условий седиментации куонамской свиты использовались петрохимические модули [18]. На рис. 6 приведены сводные диаграммы петрохимических модулей, на которых видны вариации в химическом составе пород различных пачек. Карбонатные породы Я.Э. Юдович выделяет в отдельный тип карбонатолитов, однако с помощью гидролизатного модуля можно оценить состав силикатной примеси в этих породах.

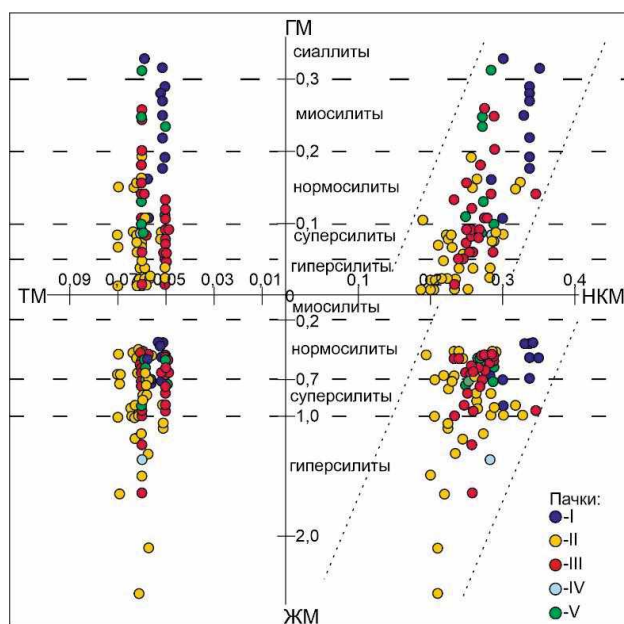


Рис. 6. Положение фигуративных точек составов пород куонамской свиты на сводной модульной диаграмме [18]

Fig. 6. Position of the figurative points of the rock compositions of the Kuonamka Formation on the summary modular diagram [18]

Согласно значениям гидролизатного модуля – ГМ ($(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})/\text{SiO}_2$) куонамская свита на территории исследования сложена главным образом силитами (ГМ менее 0,30), но распределение их типов по разрезу неравномерное. В нижнем бороулахском и верхнем маспакыйском горизонтах доминируют нормо- и мио-силиты, что связано с несколько повышенной глинистостью этих отложений. Наибольшее содержание глинистого материала наблюдается в образцах из подошвы боханского и кровли маспакыйского горизонта, которые относятся к сиаллитам (ГМ=0,3–0,55). В нижней части амыдайского горизонта (пачка II) преобладают гипер- и суперсилиты (ГМ не более 0,2), что отражает повышенную кремнистость этой части разреза. В верхней части амыдайского горизонта (пачка III) наблюдается переслаивание всех

типов силитов при преобладании супер- и нормосилитов.

Вместе с ГМ для разделения глиноземистых и железистых компонентов применяется железный модуль – ЖМ ($(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO})/(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$). Согласно показателям ЖМ в бороулахском и маспакыйском горизонтах с более высоким содержанием глинистого и карбонатного материала доминируют нормально железистые силиты. В амыдайском горизонте наблюдается переслаивание нормо-, гипер- и супержелезистых пород, причем первые два типа присутствуют примерно в равных количествах, а объем силитов с повышенным ЖМ заметно меньше.

По значениям модуля нормированной щелочности НКМ ($(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$) породы куонамской свиты нормально щелочные (НКМ=0,2–0,4), примесь полевых шпатов в них незначительна, что подтверждается результатами петрографического анализа. На модульных диаграммах отмечается тренд на позитивную корреляцию ГМ–НКМ, что отражает возрастание роли ПШ с увеличением глинистости пород. Тренд на негативную корреляцию ЖМ–НКМ указывает на более высокую железистость кремнистых и карбонатно-кремнистых пород.

Титановый модуль – ТМ ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) обычно используют для определения происхождения осадка. В изученных разрезах абсолютно все породы характеризуются стабильно низкими значениями ТМ (в среднем 0,05–0,06), что характерно для силитов, а также свидетельствует об отсутствии примеси основной вулканокластической [19] и может служить индикатором глубоководных обстановок [20].

Алюмокремниевый модуль – АМ ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) по химическому смыслу дублирует гидролизатный модуль, но в более грубом виде отражает глинистость обломочных пород. Значения АМ практически во всех образцах амыдайского горизонта низкие (от 0,01 до 0,1), что указывает на их повышенную кремнистость, а в маспакыйском и бороудахском горизонтах нередко отмечаются образцы с более высокими значениями от 0,11 до 0,24, соответствующие нормоглиноземистым породам.

Фемический модуль ФМ ($(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})/\text{SiO}_2$) полезен для распознавания вулканокластической примеси. В образцах, содержащих доломит в породообразующих количествах, его применение ограничено, поэтому они не рассматривались. В остальных породах куонамской свиты ФМ изменяется от 0,01 до 0,15, что позволяет классифицировать их как гипо- и нормофемические силиты.

Диаграмма ФМ–НКМ (рис. 7) используется для установления состава глинистого вещества. На ней видно, что фигуративные точки составов пород в большинстве сосредоточены в полях IV и V, отве-

чая преобладанию глинистого вещества хлорит-иллитового состава (IV) и смешанослойных минералов (V), за исключением нескольких образцов боханского горизонта, в глинистом веществе которых помимо гидрослюда есть тонкодисперсная примесь полевых шпатов (VI). Этот вывод полностью совпадает с петрографическими наблюдениями и данными рентгеноструктурных исследований.

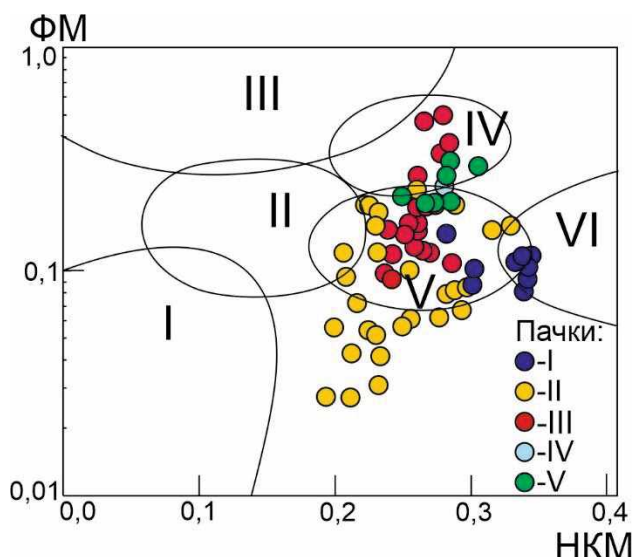


Рис. 7. Модульная диаграмма ФМ–НКМ [18]. Поля глинистых пород: I – с преобладанием каолинита, II – с преобладанием смектита с примесью каолинита и гидрослюда, III – с преобладанием хлорита с примесью железистых гидрослюдов, IV – хлорит-гидрослюдистого состава, V – хлорит-смектит-гидрослюдистого состава, VI – гидрослюдистого состава с тонкой примесью полевых шпатов

Fig. 7. FM–SPM module diagram [18]. The fields of clay rocks: I – with a predominance of kaolinite, II – with a predominance of smectite with an admixture of kaolinite and hydromica, III – with a predominance of chlorite with an admixture of ferruginous hydromicas, IV – chlorite-hydromica composition, V – chlorite-smectite-hydromica composition, VI – hydromica composition with a fine admixture of feldspars

Анализ микроэлементного состава (таблица) показал, что куонамской свите свойственны повышенные содержания ванадия, никеля и молибдена, что характерно для черносланцевых толщ по всему миру [21]. При этом наблюдается неравномерное распределение их по разрезу на фоне общего тренда на уменьшение вверх. В целом повышенные концентрации этих элементов наблюдаются в породах, обогащенных ОВ, при этом наиболее углеродистый бороулахский горизонт (пачка I) отличается аномально высокими количествами. Содержа-

ния Cu в основной части разреза пониженные, за исключением бороулахского горизонта, где они немного выше кларковых. Концентрация марганца в разрезе значительно ниже кларка, за исключением редких образцов, где карбонатная составляющая занимает более 40 %. Тенденция на увеличение концентраций по мере возрастания карбонатности характерна и для стронция, значения которого часто выше кларковых. Распределение бария неравномерное. В бороулахском горизонте его содержание заметно превышает кларковые значения, в остальных горизонтах Ba в основном ниже кларка, лишь в нескольких образцах наблюдаются кларковые и более высокие количества. Концентрации урана в большинстве случаев выше кларковых (13 ± 2 г/т или $0,0013 \pm 0,0002$ %), при этом наблюдается хорошая корреляция между U и Сорг. (рис. 8, а). Содержания редкоземельных элементов в изученных отложениях ниже кларковых, что обусловлено незначительным количеством терригенной примеси.

Таблица. Микроэлементный состав пород куонамской свиты

Table. Microelement composition of the rocks of the Kuonamka Formation

Элементы Elements	Содержание, г/т/Content, g/t					
	Пачка/Member					Кларк Clark
	I	II	III	IV	V	
V	482 – 2971 1581	45 – 685 197	65 – 653 232	12	60 – 255 145	250
Ni	66 – 213 157	18 – 160 41	17 – 196 56	10	21 – 79 43	68
Mo	61 – 276 122	8 – 169 35	22 – 68 32	1	19 – 70 33	20
Cu	40 – 111 94	8 – 47 23	16 – 53 28	19	16 – 51 24	70
Mn	124 – 279 193	27 – 292 68	40 – 471 179	458	118 – 558 224	400
Ba	668 – 954 762	228 – 725 473	301 – 1079 565	335	407 – 666 556	500
Sr	207 – 446 310	83 – 736 291	91 – 787 291	396	477 – 797 519	190
U	23 – 46 35	6 – 67 16	6 – 127 13	1	8 – 23 13	13

Примечание: числитель – минимальное и максимальное значения, знаменатель – среднее значение.

Note: the numerator is the minimum and maximum values, the denominator is the mean value.

Для реконструкции окислительно-восстановительных обстановок использовался ряд классических показателей. В первую очередь, степень пиритизации железа – СП [22], согласно значениям которой во время формирования куонамской свиты господствовали восстановительные обстановки. Средние величины СП в амыдайском горизонте – 0,7, а в бороулахском и маспакыйском горизонтах – 0,8, что говорит об условиях близких к эвксинско-

му типу и подтверждается низким содержанием оксида марганца $\leq 0,03\%$.

Хорошо согласуется с данными, полученными при анализе СП, такой показатель редокс-обстановок, как отношение $C_{орг.}$ и сульфидной серы [23], который изменяется от 0,7 до 12,6 (в среднем 5) при среднем медианном значении 4,4. Существование обстановок близких к эвксинным подтверждается тем фактом, что линия регрессии $C_{орг.}$ и S начинается не с нуля, при этом прослеживается довольно тесная связь органического углерода и серы сульфидной (рис. 8, б). К тому же анализ пород под электронным сканирующим микроскопом показал широкое развитие по органическому веществу фрамбоидального пирита (рис. 5, з), образование которого, по мнению многих исследователей, обусловлено деятельностью сульфатредуцирующих бактерий в восстановительных условиях, существовавших в наддонных водах и в верхнем слое осадков [24, 25 и др.].

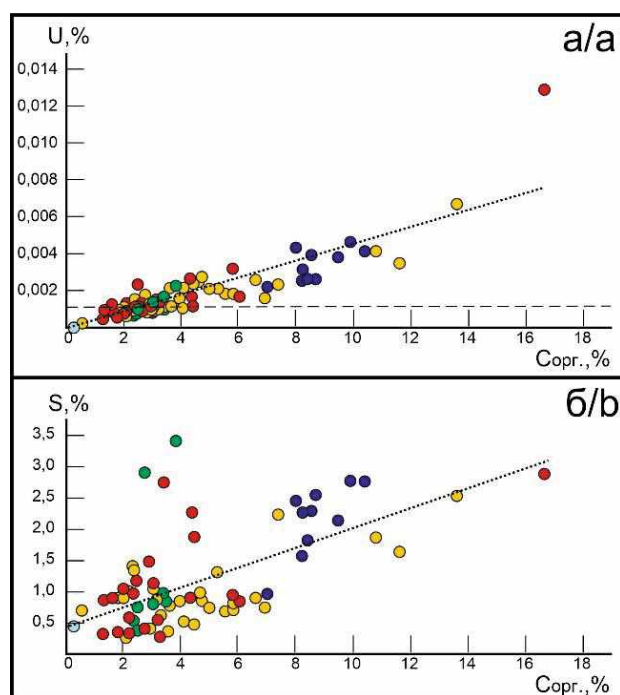


Рис. 8. Взаимосвязь содержания органического углерода и урана (а) и серы (б)

Fig. 8. Relationship between the content of organic carbon and uranium (a) and sulfur (b)

Еще одним доказательством бескислородных условий седиментации являются высокие значения отношения Mo/Mn , поскольку молибден активно осаждается в обстановках сероводородного заражения, а марганец в данной ситуации находится в растворенной форме [26]. В большинстве образцов куонамской свиты величина Mo/Mn более 0,09 при среднем значении 0,5. В бороулахском горизонте

она наиболее высокая и изменяется в диапазоне от 0,7 до 2. Самый низкий показатель $Mo/Mn=0,02$ зафиксирован в малокуонамском горизонте. Тем не менее он тоже характеризует аноксидные условия, хоть и близок к границе перехода к субоксидным. Кроме того, существование восстановительных обстановок подтверждает такой показатель, как содержание аутигенного урана ($U_{аут.}$), осаждение которого из морской воды происходит в бескислородных условиях [27–29]. Доля $U_{аут.}$ в общем содержании урана ($U_{общ.}$), находящегося в породах, согласно [28], определяется по формуле $U_{аут.}=U_{общ.}-Th/3$. По данным [28, 29] значения $10 < U_{аут.} < 15$ указывают на бескислородную среду, а $U_{аут.} > 15$ характеризуют эвксинные условия. В куонамской свите доля аутигенного урана изменяется от 10 до 66, причем наиболее высокие значения (> 15) наблюдаются в бороулахском горизонте и нижней пачке амыдайского горизонта.

Присутствие в осадках эксгальационных компонентов устанавливается по модулю $Fe+Mn/Ti$ [30], значения которого должно быть ≥ 25 . Во всех изученных пачках этот модуль изменяется от 7 до 24, причем значения более 20 фиксируются в единичных случаях, а средние значения составляют 10–12. Подтверждением практически полного отсутствия подводной эксгальативной деятельности является и модуль Бострёма – $Al/(Al+Fe+Mn)$ [31], величина которого повсеместно $\geq 0,4$ (в среднем 0,6), при том что влияние эксгальативного компонента определяется значениями $< 0,4$.

Индикатором палеосолёности является соотношение в породе Sr/Ba , значение которого в большинстве образцов куонамской свиты равно или чуть более 1, что соответствует обстановкам нормальной морской солёности [32, 33].

Заключение

Анализ литолого-геохимических характеристик высокоуглеродистых отложений кембрия в бассейне р. Кюленке показал:

1. Куонамская свита в изученных разрезах обладает выдержанным строением, в котором четко прослеживаются четыре литолого-стратиграфических горизонта. Состав отложений преимущественно смешанный и определяется вариациями трёх основных минеральных групп: глинистой, карбонатной и кремнистой. Кроме того, в качестве порообразующего участвует органическое вещество, содержание которого изменяется от 2 до 17 %, при средних значениях около 5 %, за исключением малокуонамского горизонта, где $C_{орг.} < 1\%$. Наибольшие концентрации ОВ приурочены к породам смешанного карбонатно-глинисто-кремнистого состава, высокие содержания также характерны

для силицитов, а самые низкие показатели Сор_г отмечаются в известняках. Вверх по разрезу фиксируется тренд на сокращение роли кремнистого материала (от 90 до 10 %) и органического вещества (от 7 до 1 %) на фоне повышения содержания карбонатной составляющей.

2. Литохимические данные и такие литологические особенности свиты, как наличие тонкопелеретертого карбонатного материала, отсутствие крупных фаунистических остатков, широкое развитие радиоляриево-спикуловых кремней, минимальное содержание терригенной примеси, высокая концентрация ОВ и доминирование тонкослоистых текстур, указывают на то, что осадконакопление происходило далеко от источников сноса в депрессионной зоне открытого морского бассейна со слабой циркуляцией придонных вод в бескислородных условиях. Геохимическая среда в карбонатно-кремнистых илах была преимущественно эвксинной.

3. Изменения в составе горизонтов отражают эволюцию осадочного бассейна. Начало формирования куонамской свиты связано с трансгрессией [9, 10, 13], достигшей максимума во время накопления нижней пачки амыдайского горизонта, что отразилось в преобладании кремнистой биогенной составляющей. Увеличение доли карбонатных осадков в малокуонамское и маспакыйское время связано с постепенным заполнением окраинных частей бассейна продуктами разрушения расположенной на западе барьерно-рифовой системы [9, 10, 12] и последующим обмелением. Таким образом, куонамская свита сформировалась в течение одного крупного трансгрессивно-регрессивного седиментационного цикла и представляет собой последовательность заполнения глубоководной депрессии с некомпенсированным осадконакоплением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриненко В.С., Баранов В.В., Девятков В.П. Северо-Азиатская черносланцевая рудоносная мегапровинция на северо-востоке Евразии и её перспективная мирагения // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 36–55.
2. Мустафин С.К., Трифонов А.Н., Стручков К.К. Горючие сланцы – как комплексное минеральное сырьё: региональные аспекты прогнозирования и оценки, перспективы освоения // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. – 2021. – № 24. – С. 146–154.
3. Organic-matter-rich Shales of China / C. Zou, R. Zhu, S. Wu, D. Dong, Z. Qiu, Y. Wang, L. Wang, S. Lin, J. Cui, L. Su, Z. Yang, Z.Q. Chen, J.G. Ogg // Earth-Science Reviews. – 2019. – Vol. 189. – P. 51–78.
4. Enrichment of platinum group elements in Lower Cambrian polymetallic black shale, SE Yangtze Block, China / Y. Fu, Z. Yang, P. Xia, C. Li // Frontiers in Earth Science. – 2021. – Vol. 9. – P. 651948.
5. Kerogen composition and origin, oil and gas generation potential of the Berriasian Wealden Shales of the Lower Saxony Basin / F. Froidl, R. Littke, S. Grohmann, A. Baniasad, J. Böcker, C. Hartkopf-Fröder, P. Weniger // International Journal of Coal Geology. – 2021. – Vol. 246. – P. 103831.
6. Гурари Ф.Г. Доманикиты и их нефтегазоносность // Советская геология. – 1981. – № 11. – С. 3–12.
7. Бахтуров С.Ф., Евтушенко В.М., Переладов В.С. Куонамская битуминозная карбонатно-сланцевая формация. – Новосибирск: Наука, 1988. – 160 с.
8. Кембрий Сибирской платформы (Юдомо-Оленекский тип разреза. Куонамский комплекс отложений) / В.Е. Савицкий, В.М. Евтушенко, Л.И. Егорова, А.Э. Конторович, Ю.Я. Шабанов. – М.: Недра, 1972. – 199 с.
9. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы / С.С. Сухов, Ю.Я. Шабанов, Т.В. Пегель, С.В. Сараев, Ю.Ф. Филиппов, И.В. Коровников, В.М. Сундуков, А.Б. Федоров, А.И. Варламов, А.С. Ефимов, В.А. Конторович, А.Э. Конторович. – Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2016. – 497 с.
10. Конторович А.Э., Савицкий В.Е. К палеогеографии Сибирской платформы в раннюю и среднюю кембрийскую эпохи // Вопросы литологии и палеогеографии Сибири. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1970. – С. 95–106.
11. Эллен С.С. О причинах образования Восточно-Сибирской системы некомпенсированных прогибов // Некомпенсированные прогибы платформ и их нефтегазоносность. – Казань: Изд-во Казан. Ун-та, 1976. – С. 30–41.
12. Перспективы нефтегазоносности кембрийских барьерных рифовых систем Сибирской платформы в свете новых геолого-геофизических данных / М.А. Масленников, С.С. Сухов, П.Н. Соболев, Е.Г. Наумова, А.Н. Процко, И.В. Ракитина, О.Л. Константинова // Геология нефти и газа. – 2021. – № 4. – С. 29–50.
13. Старосельцев В.С., Шишкин Б.Б. Обстановки накопления углеродистых пород кембрия Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 787–796.
14. Коровников И.В., Парфенова Т.М. Трилобиты, биостратиграфия и геохимия куонамской свиты среднего кембрия (северо-восток Сибирской платформы, р. Кюленке) // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 11. – С. 1531–1545.
15. Тектоническая карта нефтегазоносных провинций Сибирской платформы / под ред. В.С. Старосельцева. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2001.
16. Савицкий В.Е. Стратиграфия и фации нижнего и среднего кембрия Сибирской платформы: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 1971. – 44 с.
17. Геохимия органического вещества нефтепроизводящих пород среднего кембрия (северо-восток Сибирской платформы) / Т.М. Парфенова, И.В. Коровников, Е.Н. Иванова, В.Н. Меленевский // Геология нефти и газа. – 2011. – № 5. – С. 64–72.
18. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. – СПб.: Наука, 2000. – 479 с.
19. Grasso V.G. The TiO₂ frequency in volcanic rocks // Geologische Rundschau. – 1968. – Vol. 57. – P. 930–935.
20. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. – Л.: Наука, 1988. – 272 с.

21. Vind J., Tamm K. Review of the extraction of key metallic values from black shales in relation to their geological and mineralogical properties // *Minerals Engineering*. – 2021. – Vol. 174. – P. 107271.
22. Degree of pyritisation of iron as a paleoenvironmental indicator of bottom-water oxygenation / R. Raiswell, F. Buckley, R.A. Berner, T.F. Anderson // *Journal of Sedimentary Petrology*. – 1988. – № 58. – P. 812–819.
23. Berner R.A., Raiswell R. Burial of organic carbon and pyrite sulphur in sediments over Phanerozoic time: a new theory // *Geochim et Cosmochim. Acta*. – 1983. – Vol. 47. – P. 855–862.
24. A high-resolution chemical and structural study of framboidal pyrite formed within a low- temperature bacterial biofilm / L.C. Maclean, T. Tylizszczak, P.U. Gilbert, D. Zhou, T.J. Pray, T.C. Onstott, G. Southam // *Geobiology*. – 2008. – № 6 (5). – P. 471–480.
25. Mechanisms of pyrite formation promoted by sulfate-reducing bacteria in pure culture / A. Duverger, J.S. Berg, F. Guyot, S. Bernard, J. Miot, V. Busigny // *Frontiers in Earth Science*. – 2020. – Vol. 8. – P. 588310.
26. Холодов В.Н., Недумов Р.И. О геохимических критериях появления сероводородного заражения в водах древних водоемов // *Известия АН СССР, Серия геологическая*. – 1991. – № 12. – С. 74–82.
27. Algeo T.J., Li C. Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems // *Geochimica et Cosmochimica. Acta*. – 2020. – Vol. 287. – P. 8–26.
28. Wignall P.B., Myers K.J. Interpreting benthic oxygen levels in mudrocks: a new approach // *Geology*. – 1988. – № 16. – P. 452–455.
29. Wignall P.B. *Black shales*. – Oxford: Oxford University Press, 1994. – 130 p.
30. Страхов Н.М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. – М.: Наука, 1976. – 300 с.
31. Aluminum-poor ferromanganous sediments on active oceanic ridges / K. Boström, M.N.A. Peterson, O. Joensuu, D.E. Fisher // *Journal of Geophysical Research*. – 1969. – Vol. 74. – № 12. – P. 3261–3270.
32. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – 742 с.
33. Wei W., Algeo T.J. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2020. – Vol. 287. – P. 341–366.

Информация об авторах

Ирина Валерьевна Вараксина, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. VaraksinaIV@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию: 22.05.2023

Поступила после рецензирования: 08.08.2023

Принята к публикации: 21.02.2024

REFERENCES

1. Grinenko V.S., Baranov V.V., Devyatov V.P. North-Asian black shale ore-bearing megaprovince in the northeastern Eurasia and its prospective minerogeny. *Ores and metals*, 2022, no. 2, pp. 36–55. (In Russ.)
2. Mustafin S.K., Trifonov A.N., Struchkov K.K. Oil shale as a complex mineral raw material: regional aspects of forecasting and assessment, development prospects. *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky*, 2021, no. 24, pp. 146–154. (In Russ.)
3. Zou C., Zhu R., Wu S., Dong D., Qiu Z., Wang Y., Wang L., Lin S., Cui J., Su L., Yang Z., Chen Z.Q., Ogg J.G. Organic-matter-rich Shales of China. *Earth-Science Reviews*, 2019, vol. 189, pp. 51–78.
4. Fu Y., Yang Z., Xia P., Li C. Enrichment of platinum group elements in lower Cambrian polymetallic black shale, SE Yangtze Block, China. *Frontiers in Earth Science*, 2021, vol. 9, pp. 651948.
5. Froidl F., Littke R., Grohmann S., Baniasad A., Böcker J., Hartkopf-Fröder C., Weniger P. Kerogen composition and origin, oil and gas generation potential of the Berriasian Wealden Shales of the Lower Saxony Basin. *International Journal of Coal Geology*, 2021, vol. 246, pp. 103831.
6. Gurari F.G. Domanikites and their oil and gas potential. *Sovetskaya geologiya*, 1981, no. 11, pp. 3–12. (In Russ.)
7. Bahturov S.F., Evtushenko V.M., Pereladov V.S. *Kuonamska bituminous carbonate-shale Formation*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 160 p. (In Russ.)
8. Savitskiy V.E., Evtushenko V.M., Egorova L.I., Kontorovich A.E., Shabanov Yu.Ya. *Cambrian of the Siberian Platform (Yudomo-Oleneksky type of section. Kuonamsky sedimentary complex)*. Moscow, Nedra Publ., 1972. 199 p. (In Russ.)
9. Suhov S.S., Shabanov Yu.Ya., Pegel T.V., Saraev S.V., Filippov YU.F., Korovnikov I.V., Sundukov V.M., Fedorov A.B., Varlamov A.I., Efimov A.S., Kontorovich V.A., Kontorovich A.E. *Stratigraphy of oil and gas bearing basins of Siberia. Cambrian of the Siberian Platform*. Novosibirsk, INGG SO RAN Publ., 2016. 497 p. (In Russ.)
10. Kontorovich A.E., Savitskiy V.E. On the Paleogeography of the Siberian Platform in the Early and Middle Cambrian. *Questions of lithology and paleogeography of Siberia*. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 1970. pp. 95–106. (In Russ.)
11. Ellern S.S. On the reasons for the formation of the East Siberian system of uncompensated troughs. *Uncompensated platform deflections and their oil and gas potential*. Kazan, Kazan University Publ., 1976. pp. 30–41. (In Russ.)
12. Maslennikov M.A., Suhov S.S., Sobolev P.N., Naumova E.G., Procko A.N., Rakitina I.V., Konstantinova O.L. Cambrian barrier reef systems of Siberian platform: petroleum potential in light of new geological and geophysical data. *Oil and gas geology*, 2021, no. 4, pp. 29–50. (In Russ.)

13. Staroselcev V.S., Shishkin B.B. Environmental conditions of accumulation of Cambrian carbonaceous rocks in the Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 787–796. (In Russ.)
14. Korovnikov I.V., Parfenova T.M. Trilobites, biostratigraphy, and geochemistry of the Middle Cambrian Kuonamka Formation (northeastern Siberian platform, Kyulenk river). *Russian Geology and Geophysics*, 2021, vol. 62, no. 11, pp. 1531–1545. (In Russ.)
15. Staroselcev V.S. *Tectonic map of the oil and gas provinces of the Siberian Platform*. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 2001. (In Russ.)
16. Savitskiy V.E. *Stratigraphy and facies of the Lower and Middle Cambrian of the Siberian Platform*. Dr. Diss. Abstract. Novosibirsk, 1971. 44 p. (In Russ.)
17. Parfenova T.M., Korovnikov I.V., Ivanova E.N., Melenevskiy V.N. Geochemistry of organic matter of Middle cambrian oil producing rocks (north-east of Siberian platform). *Oil and gas geology*, 2011, no. 5, pp. 64–72. (In Russ.)
18. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Fundamentals of lithochemistry*. St Petersburg, Nauka Publ., 2000. 479 p. (In Russ.)
19. Grasso V.G. The TiO₂ frequency in volcanic rocks. *Geologische Rundschau*, 1968, vol. 57, pp. 930–935.
20. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geochemistry of black shales*. St Petersburg, Nauka Publ., 1988. 272 p. (In Russ.)
21. Vind J., Tamm K. Review of the extraction of key metallic values from black shales in relation to their geological and mineralogical properties. *Minerals Engineering*, 2021, vol. 174, pp. 107271.
22. Raiswell R., Buckley F., Berner R.A., Anderson T.F. Degree of pyritisation of iron as a paleoenvironmental indicator of bottom-water oxygenation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1988, no. 58, pp. 812–819.
23. Berner R.A., Raiswell R. Burial of organic carbon and pyrite sulphur in sediments over Phanerozoic time: a new theory. *Geochim et Cosmochim. Acta*, 1983, vol. 47, pp. 855–862.
24. Maclean L.C., Tyliczszak T., Gilbert P.U., Zhou D., Pray T.J., Onstott T.C., Southam G. A high-resolution chemical and structural study of framboidal pyrite formed within a low-temperature bacterial biofilm. *Geobiology*, 2008, no. 6 (5), pp. 471–480.
25. Duverger A., Berg J.S., Guyot F., Bernard S., Miot J., Busigny V. Mechanisms of pyrite formation promoted by sulfate-reducing bacteria in pure culture. *Frontiers in Earth Science*, 2020, vol. 8, pp. 588310.
26. Holodov V.N., Nedumov R.I. On geochemical criteria for the appearance of hydrogen sulfide contamination in the waters of ancient reservoirs. *Izvestiya AN SSSR, Seriya geologicheskaya*, 1991, no. 12, pp. 74–82. (In Russ.)
27. Algeo T.J., Li C. Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, vol. 287, pp. 8–26.
28. Wignall P.B., Myers K.J. Interpreting benthic oxygen levels in mudrocks: a new approach. *Geology*, 1988, no. 16, pp. 452–455.
29. Wignall P.B. *Black shales*. Oxford, Oxford University Press, 1994. 130 p.
30. Strahov N.M. *Problems of geochemistry of modern oceanic lithogenesis*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 300 p.
31. Boström K., Peterson M.N.A., Joensuu O., Fisher D.E. Aluminum-poor ferromanganoan sediments on active oceanic ridges. *Journal of Geophysical Research*, 1969, vol. 74, no. 12, pp. 3261–3270.
32. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry)*. Syktyvkar, Geoprint Publ., 2011. 742 p. (In Russ.)
33. Wei W., Algeo T.J. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, vol. 287, pp. 341–366.

Information about the authors

Irina V. Varaksina, Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. VaraksinaIV@ipgg.sbras.ru

Received: 22.05.2023

Revised: 08.08.2023

Accepted: 21.02.2024