

ЛИТЕРАТУРА

- Барабошкин Е.Ю. Палеогеография Восточно-Европейской платформы и ее южного обрамления в раннем мелу // Серия аналитических обзоров «Очерки по региональной геологии России». Вып. 1. М.: Геокарт. ГЕОС, 2005. С. 201–232.
- Буканов В.В. Цветные камни. Геммологический словарь. СПб., 2001. 416 с.
- Геология СССР. Поволжье и Прикамье. Т. XI. Ч. 1. Геологическое описание / Под ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1967. 872 с.
- Левинсон-Лессинг Ф.Ю., Струве Э.А. Петрографический словарь. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 447 с.
- Петроченков Д.А., Натариус А.М. Готеривские аммониты Ульяновской области, как поделочно-ювелирный материал // Вестник геммологии. 2005. №1 (12). С. 23–28.
- Петроченков Д.А. Камнесамоцветное сырье Ульяновской области // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 5. С. 319–323.
- Петроченков Д.А., Барабошкин Е.Ю., Быстров И.Г. Ювелирно-поделочные септиарии Республики Дагестан // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2018. Т. 12. № 1. С. 79–87.

REFERENCES

- Baraboshkin E.Yu. Palaeogeography of the East European Platform and its southern framework in the Early Cretaceous. A series of analytical reviews «Essays on regional geology of Russia». vol. 1, Moscow, Geokart, GEOS Publ., 2005, pp. 201–232. (In Russian).
- Bukanov V.V. *Colored stones. Gemological dictionary.* Saint Petersburg, 2001, 416 p. (In Russian).
- Geology of the USSR. The Volga region and the Kama region. Geological Description.* vol. XI, no. 1, 1967. Edited by Sidorenko A.V. Moscow, Nedra, 872 p. (In Russian).
- Levinson-Lessing F.Yu., Struve E.A. *Petrographic Dictionary.* Moscow, Gosgeoltekhnizdat Publ., 1963, 447 p. (In Russian).
- Petrochenkov D.A., Natarius A.M. Hauerivian ammonites of the Ulyanovsk region, as jobbing-jewel material. *Gemological Bulletin*, 2005, no. 1 (12), pp. 23–28.
- Petrochenkov D.A. Colored-stone raw materials from Ulyanovsk region. *Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)*, 2006, vol. 5, pp. 319–323. (In Russian).
- Petrochenkov D.A., Baraboshkin E.Yu., Bystrov I.G. Jewelry-ornamental septaries, of the Republic of Dagestan. *Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences.* 2018, vol. 12, no. 1, pp. 79–87. (In Russian).

УДК 552.54:552.55:629.55

ЗНАЧЕНИЕ ИЗУЧЕНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ОСАДОЧНОГО ПОРОДООБРАЗОВАНИЯ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК ПОВЕРХНОСТИ

В.Г. КУЗНЕЦОВ

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина
65, Ленинский проспект, г. Москва 119991, Россия
e-mail: vgkuz@yandex.ru

Рассмотрено распределение в геологическом разрезе двух групп осадочных пород — кремнистых и карбонатных разного состава. Учитывая своеобразные условия формирования различных по вещественному составу пород, реконструированы кислотно-щелочные обстановки внешних геосфер. Показано, что в архее это были кислые среды, в протерозое — щелочные и в фанерозое — слабощелочные. При этом в архее поверхностное выветривание было чисто химическим, добиогенным, что и определило интенсивный вынос железа и кремнезёма из основных магматических пород, покрывавших поверхность ранней Земли. Появление цианобактериальных фотосинтезирующих сообществ, утилизации углекислого газа, привели к смене обстановки на щелочную, что определило накопление магнезитов и доломитов. Разнообразная биота фанерозоя обусловила становление близких к современным значениям величин pH среды. Параллельно с развитием жизни менялись механизмы и формы осаждения карбонатного и кремнистого материала.

Ключевые слова: эволюция; карбонатные и кремнистые породы; геохимическая обстановка; геологическая история.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-2-27-34

SIGNIFICANCE OF THE STUDY OF SEDIMENTAL ROCK-FORMING EVOLUTION IN THE EARTH HISTORY FOR THE RECONSTRUCTION OF THE CHANGES OF GEOCHEMICAL SETTINGS ON ITS SURFACE

V.G. KUZNETSOV

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
building 1, 65, Leninsky prospekt, Moscow 119991, Russia
e-mail: vgkuz@yandex.ru

The distribution in the geological section of two groups of sedimentary rocks, siliceous and carbonate rocks of different composition — has been examined. Acid-base conditions of external geospheres have been reconstructed in consideration of the peculiar conditions of the formation of rocks of different material composition. The acidic environments have been shown to be such conditions in the Archean period, the alkaline environments — in the Proterozoic, and slightly alkaline — in the Phanerozoic. At the same time, in the Archean the weathering was purely chemical, prebiogenic, which determined the intense removal of iron and silica from the basic igneous rocks that covered the surface of the early Earth. The emergence of cyanobacterial photosynthesizing communities, utilization of carbon dioxide led to the change to alkaline environment, which determined the accumulation of magnesites and dolomites. The diverse biota of the Phanerozoic caused the formation of pH values close to modern. The mechanisms and forms of the deposition of carbonate and siliceous materials changed alongside with the evolution of life.

Keywords: evolution; carbonate and siliceous rocks; geochemical environment; geological history.

Литология, как наука об осадочных горных породах и осадочных комплексах, их составе, строении, закономерностях пространственного и геохронологического распространения, происхождении, стала развиваться в качестве самостоятельной с начала 20-х гг. XX в. в форме петрографии осадочных пород, т. е. изучения конкретных пород и условий их образования, а с конца 40-х гг. — как литология, т. е. наука, изучающая и устанавливающая общие законы образования и распространения осадочных пород и их комплексов.

К 70-м гг. XX в. сложились чёткие представления о двух, как выразился Н.Б. Вассоевич, научных подходах (разделах) — фациально-седиментологическом (седиментогенетическом) и стадиально-литогенетическом. Первый направлен на выяснение первичных свойств осадка и условий его формирования; второй имеет своей целью познать вторичные свойства породы, являющиеся следствием её преобразования [3].

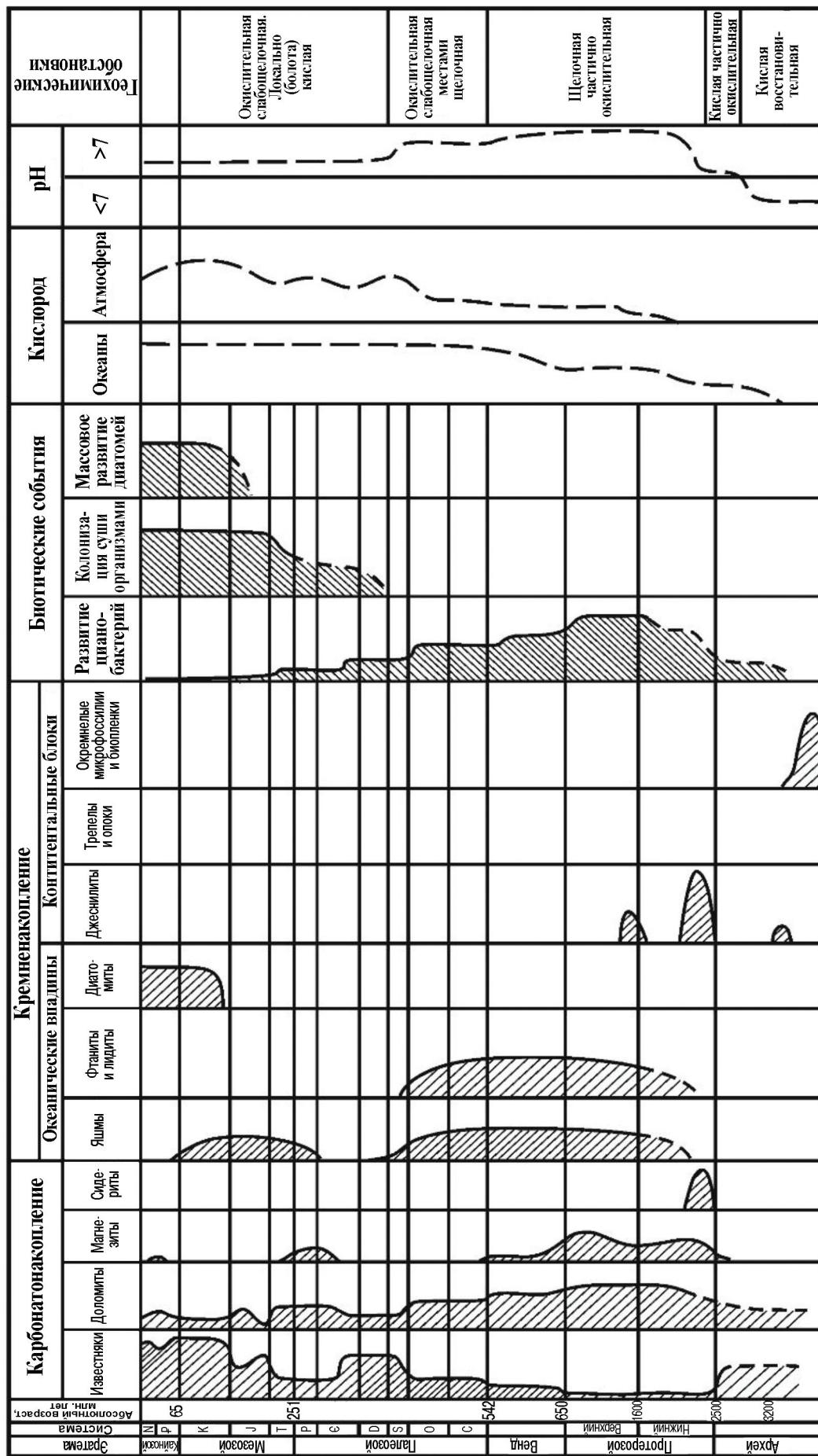
Интересно, однако, отметить, что факт изменения характера осадочных пород в геологической истории был установлен задолго до самого оформления учения об осадочных породах как самостоятельной науки. Еще в 1909 г. Р. Дэли показал, что в истории Земли происходило последовательное изменение состава карбонатных пород — образование доломитов последовательно сменялось формированием известняков, т. е. по сути дела на конкретном примере выявил факт эволюции осадочного породообразования [23].

Идеи об эволюции осадочного породообразования высказывались еще в 40-х гг. прошлого века. Так, Л.В. Пустовалов отмечал, что «... только лишь в том случае, если мы учитываем историческую обстановку осадкообразования, мы можем рассчиты-

вать достигнуть правильных и надёжных результатов. Формальное же сопоставление неминуемо должно привести к грубым ошибкам» [13, с. 371]. В середине XX в. ряд работ по этой тематике опубликовал Н.М. Страхов [17, 18].

Вместе с тем проблема эволюции осадочного процесса и осадочного породообразования, как особая, начала формироваться в рамках общей проблемы эволюции геологических процессов в истории Земли, поставленной академиком А.Л. Яншиным в последней четверти XX в. [20]. Были опубликованы сотни статей по эволюции состава, строения и условий образования отдельных типов осадочных пород, изданы тематические сборники, отдельные монографии. В итоге эволюционное направление сложилось — наряду с седиментологическим и стадиальным — в отдельный раздел. При этом оно не только стало самостоятельным разделом со своими задачами, методами исследования, достижениями, но и, если можно так выражаться, вошло в первые два «классических» раздела, углубив, детализировав и разив ряд известных ранее положений.

В настоящем сообщении рассмотрен лишь один аспект эволюционного направления: как изучение распределения в осадочном разрезе двух групп осадочных пород — карбонатных и кремнистых, позволяет решать проблемы значительно более широкого плана, например, таких как эволюция конкретных групп пород, позволяет реконструировать изменения геохимических обстановок внешних геосфер, раскрывает эволюцию самого процесса осадочного породообразования и др. (рисунок). Подробные фактические данные по распределению этих отложений в определённой мере изложены в [7—10].



Стратиграфическое распределение карбонатных и кремнистых пород, основные биотические события и эволюция геохимических обстановок в истории Земли

Как было сказано, первые сведения по этому вопросу на примере карбонатных пород были получены и изложены уже в начале 20 в. В третьей четверти этого столетия после работ А.Б. Ронова [16] данные выводы, по крайней мере для неогея, получили достаточно достоверную количественную характеристику. Что касается более ранних интервалов геологической истории, то такие данные имеют скорее качественный характер, особенно для архейского этапа. Сейчас это мрамора, кальцифиры и другие глубоко метаморфизованные породы, но, как показал в ряде реконструкций О.М. Розен, в архее преобладали все же кальциевые в своей основе карбонаты [14, 15].

На границе архея и протерозоя среди карбонатных пород в значительных количествах появляется относительно редкая разновидность — сидерит (и сидероплезит) как важный элемент полосчатых железистых руд — железистых кварцитов, или джеспилитов. Высказывается даже мнение, что первоначально все эти руды были сидеритовыми, а их современная минералогия — это результат вторичных преобразований [1]. В современной международной геохронологической шкале этот период под названием сидерий выделяется в интервале 2300—2500 млн. лет. Имеются, однако, интересные и достаточно обоснованные представления о переносе его в кровлю архея и датировке временем интервалом 2630—2420 млн. лет [11]. Преобладающими же карбонатными породами в протерозое были магнезиальные карбонатные породы — доломиты и в меньшей степени, но что специфично и важно — магнезиты. В фанерозое происходило последовательное сокращение масштабов доломитообразования, которое сменялось накоплением известняков. Некоторая незначительная по масштабу аномалия находится на пермский период, когда несколько увеличивается образование доломитов и вновь появляются магнезиты.

Распределение в разрезе разных типов кремнистых пород чётко разделяется на две линии — ветви, локализованные на двух разных геотектонических структурах. В пределах континентального блока кремнистые осадочные образования отмечены в конце эоархея, в частности, в кремнистой формации Исау Гренландии возрастом 3,83 млрд. лет, в которой установлены бактериоморфные образования, биогенная природа которых иногда подвергается сомнению. Кремнистые толщи с достоверными остатками бактериальных форм, которые не вызывают сомнений, в том числе первые кремнистые строматолиты, установлены в породах серии Онвервахт пояса Барбетон Южной Африки и Варравуна кратона Пилбара в Австралии, возраст которых составляет 3,5—3, 3 млрд. лет [24, 33].

В архее имеется несколько горизонтов кремнистых пород в формациях железистых кварцитов, но наибольшее развитие этого типа отложений при-

ходится на интервал основания протерозоя — сидерий. Отдельные, неизмеримо меньшие по масштабам проявления подобных джеспилитов имеются и на других уровнях протерозоя.

В палеозое и мезозое собственно кремнистых толщ в пределах платформ не установлено, известны лишь обогащённые кремнезёмом битуминозно-глинисто-карбонатные толщи типа доманика на Восточно-Европейской платформе или баженовского горизонта в Западной Сибири.

Мощный взрыв кремненакопления отмечается в меловом периоде, который продолжился в кайнозое и обусловил формирование опоковой формации.

Несколько иная картина распределения кремнистых толщ в океаническом секторе. Со второй половины протерозоя и до палеогена с перерывом в карбоне шло формирование яшм. Со второй половины протерозоя практически до начала девона происходило накопление в той или иной степени обогащённых органическим веществом кремнистых сланцев — лидитов и фтанитов. В фанерозое формировались радиоляриты. В мелу и кайнозое появились диатомиты — своеобразный аналог опок континентального блока, в результате чего относительная доля радиоляритов сократилась.

Анализ подобного стратиграфического распределения карбонатных пород разного состава и кремнистых разного типа позволяет сделать некоторые выводы о геохимических условиях и их изменениях в течение геологической истории нашей планеты.

Появление свободного кислорода и соответственно окислительной обстановки определялось обычно по возникновению минералов с высокой степенью окисления, входящих в их состав поливалентных элементов. Другими словами, это проблема в значительной степени геохимическая, поскольку изучается поведение элементов, в том числе, поведение изотопов в ряде случаев. Данный вопрос, т. е. появление свободного кислорода и становление окислительной обстановки, недавно подробно рассмотрен А.В. Масловым и В.Н. Подковыровым [12], поэтому в данном сообщении обращено внимание на второй важнейший геохимический показатель среды — pH и его изменение во времени. Реконструкция этого показателя решается на уровне горных пород, т. е. в рамках литологии.

В этом отношении особый интерес представляют карбонатные породы, которые образуются в несколько различных кислотно-щелочных условиях.

Для архея и начала протерозоя важную информацию можно получить, изучая специфическую для данного временного интервала формацию — железистые кварциты — banded iron formation (BIF) — точнее же одну их составляющую — сидериты и сидероплезиты, главным образом те джес-

пилиты, которые как раз локализованы в основании протерозоя — в сидерии.

Как было отмечено выше, в архее существовала микробиальная жизнь, но она была локализована лишь в водоёмах, поскольку отсутствие озона и соответственно мощное ультрафиолетовое излучение делали невозможным существование наземной биоты. В этих условиях поверхностное субаэральное выветривание было чисто химическим, причем кислым, поскольку первичный вулканизм и поставка в атмосферу «кислых дымов» — CO_2 , H_2S , SO_2 и других, определило именно кислую геохимическую обстановку.

Небольшое отступление. В научной и особенно учебной литературе процессы выветривания — мобилизации вещества в осадочный процесс — подразделяют на физическое (механическое) и химическое; в последнем случае рисуются схемы разложения алюмосиликатов под воздействием воды и углекислого газа. На самом деле химические процессы выветривания, по сути дела, можно назвать биохимическими, поскольку главным агентом являются органические кислоты, образующиеся при разложении органического вещества. Поэтому, кстати, выветривание в гумидной зоне, где обильна растительность и продукты её разложения в виде органических кислот, процесс идёт по кислому типу и наиболее результативно, а в аридном, при резком дефиците растительности, — по щелочному и неизмеримо менее активно, хотя количество углекислого газа в обоих случаях одинаково.

Возвращаясь непосредственно к теме статьи, следует повторить и акцентировать внимание на том, что поверхностное выветривание в архее было именно химическим, абиогенным и добиогенным. В кислых и одновременно восстановительных условиях из основных магматических пород, составлявших поверхность архейской Земли, переходили в раствор железо и кремнезем. При поступлении подобных растворов в конечные водоёмы стока, кислотность вод снижалась, и соответствующие компоненты в виде кварца и карбонатов железа выпадали в осадок. По-видимому, в этом процессе, особенно в отношении железа, могла играть роль микробиальная субстанция, поскольку сейчас показано, что минералы железа, в частности, карбонаты, формируются под воздействием ряда специфических бактерий [5, 6, 22, 25–28, 30–32].

Некоторым, может быть косвенным подтверждением массового развития бактерий в это время, является положительный экскурс $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$. в отложениях с возрастом 2,3–2,3 млрд. лет, который, предположительно, связан с эпохой крупномасштабного захоронения органического вещества, генерация которого и была обусловлена активной микробиальной деятельностью [29].

Если это так, то на суше должны оставаться породы, обеднённые кремнеземом, но относительно

обогащённые алюминием. Действительно, в глубоком докембрии широко распространены глубокометаморфизованные высокоглиноземистые кристаллические сланцы с минералами группы шпинели, дистеновые и силиманитовые гнейсы. Более конкретный пример — надсерия Трансвааль в Южной Африке включает железорудную формацию Курумар и глинисто-алюминистые сланцы с диаспором гамаханской толщи [4].

Не исключено, что само наличие в архее кварцевых песчаников, в том числе так называемых вторичных кварцитов, — это продукты аналогичного, но не столь глубокого, добиогенного, чисто химического выветривания.

Присутствие в водах архейских бассейнов повышенного содержания кремнезема обусловило и образование кремнистых строматолитов, описанных, в частности, в разрезах формаций Хооденег и Кромберг нижнеархейской группы Онвервахт в районе Барбетон Южной Африки, где установлено переслаивание карбонатных и кремнистых образований со строматолитовыми структурами [33]. В обстановках менее кислых водоёмов формировались карбонаты кальция — известняки, ныне глубоко метаморфизованные.

Ситуация кардинально поменялась на границе архея и протерозоя, точнее после сидерия, во время так называемого великого окислительного события (great oxidation event), появления свободного кислорода в интервале 2,45–2,32 млрд. лет [21], и которое было обусловлено взрывным и массовым развитием фотосинтезирующих организмов, прежде всего и главным образом — цианофитов. Последние обусловили интенсивную утилизацию углекислого газа, что и привело к быстрой смене слабокислой среды водоёмов на существенно щелочную. В последних обстановках в большей мере осаждались уже существенно магнезиальные карбонаты — доломиты и даже магнезиты.

Можно полагать, что, как и с наличием свободного кислорода и окислительной обстановкой, кислотно-щелочные условия не везде были одинаковыми; вероятно, разные бассейны, а может быть и отдельные их части, характеризовались различными значениями pH. Не исключено в этой связи, что и само изменение кислотно-щелочных обстановок могло происходить в разных бассейнах не одновременно, было не одномоментно, а несколько раз менялось, что и определило локальное развитие джеспилитов как в сидерии, так и в архее и в меньшей степени в более поздних интервалах протерозоя, равно как и само близкое нахождение в пространстве и в разрезе пород, формирующихся в разных условиях. Таковы, например, кремнистые строматолиты в формации Варравуна в Западной Австралии [24].

Следующий рубеж кардинальных изменений — это граница венд—кембрий, когда вновь возник-

шая высокоорганизованная биота вытеснила цианобактериальные сообщества в существенно ограниченные по масштабам и неблагоприятные для жизни, например, по солёности, условия среды. При этом часть вновь сформировавшихся организмов продолжала усвоение CO_2 , но появились и другие, которые стали активно его производить. Последнее привело к снижению значения рН морских вод, которое быстро стало приближаться к современным значениям, и соответственно накопление магнезиальных карбонатов последовательно сменялось накоплением карбонатов кальциевых – известняков. Другими словами, изучая смену состава карбонатных пород, удаётся реконструировать изменение кислотно-щелочных свойств вод Мирового океана.

Возвращаясь к рассмотрению кремнистой группы пород, интересно обсудить и объяснить появление и исчезновение такой группы, как обогащенных органическим веществом кремнистых сланцев – лидитов и фтанитов, формирование которых приходилось на ранний–средний палеозой и практически закончилось в начале девона [19].

Отмеченный рубеж – это начало колонизации суши, когда количество кислорода в атмосфере обеспечило формирование озонаового слоя, а следовательно, кардинальное сокращение ультрафиолетового облучения земной поверхности, и субазальные обстановки стали пригодными для обитания наземных организмов. Подобное глобальное событие вызвало и глобальное перераспределение необходимых для жизни питательных компонентов – нутриентов, что в свою очередь несколько ограничило генерацию и накопление органического вещества в гидросфере и определило перемещение их на континент.

Еще одно существенное изменение в системе кремненакопления, которое в свое время отметил А.Л. Яншин – появление в меловом периоде и последующее массовое развитие опоковой формации. Дело в том, что на меловой период пришлось становление и развитие покрытосеменных растений, которые, в частности, образовали тропические леса с их огромной биологической продуктивностью, в том числе продукцией органических кислот. Последние обусловили интенсивное химическое, точнее биохимическое, выветривание, появление огромных масс растворённого кремнезема и вынос последнего в Мировой океан. В свою очередь это инициировало становление и развитие

организмов с кремневой функцией и прежде всего диатомей. Одновременно глубокое химическое выветривание определило формирование мощных кор выветривания с глубоким, до образования бокситов, разложением исходных пород. Так, по данным Б.А. Богатырева [2], более 80% мировых запасов бокситов приходится на кайнозой.

Таким образом, эволюционное направление литологии не только изучает эволюцию тех или иных конкретных осадочных пород в течение геологической истории, не только восстанавливает историю глобальных изменений геологической среды, но и «внедряется» в «традиционные», исторически давно сложившиеся разделы литологии. В приведённых примерах – это, в частности, процессы образования осадочного материала. При этом данный подход раскрывает и изменение, эволюцию самих *процессов* этого образования.

Следует добавить, что аналогичная ситуация с официально-седиментологическим разделом литологии, поскольку установлена эволюция *процессов и механизмов седиментации* осадочного материала. В частности, с течением времени изменились механизмы образования карбонатных пород: в до-кембрии это были в основном процессы химические, точнее биохимические, что особенно наглядно проявлено на примере образования магнезиальных карбонатов. Утилизация цианофитами углекислого газа создала в водоёмах протерозоя щелочные условия, которые способствовали осаждению именно карбонатов магния. Появление разнообразной и более высокоорганизованной, чем цианофиты, биоты привело к фиксации карбонатов в скелетах организмов, причем преимущественно карбонатов кальция. Подобное чисто биогенное образование известняков тоже эволюционировало: если в палеозое абсолютно преобладало карбонатонакопление за счёт бентосных организмов, то в мезозое и особенно кайнозое оно сменилось накоплением остатков преимущественно планктонных организмов.

Завершая этот краткий обзор, следует указать и подчеркнуть, что практически во всей геологической истории образование осадочных отложений и их эволюция теснейшим образом связана и обусловлена жизнью и эволюцией органического мира.

Автор считает своей приятной обязанностью выразить благодарность рецензентам за конструктивные замечания, учёт которых способствовал улучшению текста статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Бергман И.А. Железисто-кремнистый рудогенез раннего докембрия // Минеральное сырье. 2013. № 28. 323 с.
- Богатырев Б.А. Эволюция бокситообразования в истории Земли // Концептуальные проблемы литологических исследований в России. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2011. Т. 1 С. 129–133.
- Вассоевич Н.Б. Предисловие // Диагенез и катагенез осадочных образований. М.: Мир, 1971. С. 5–8.
- Дэна Дж.Д., Дэна Э.С., Пэла Ч., Берман Г., Фрэндэль К. Система минералогии. Т. 1. Полутом 2. М.: ИЛ, 1951. 420 с.

5. Дубинина Г.А., Сорокина А.Ю. Нейтрофильные литотрофные железоокисляющие прокариоты и их участие в биогеохимических процессах железа // Микробиология. 2014. Т. 83. № 2. С. 127–142.
6. Зарина Д.Г. Образование магнетита и сидерита термофильными железоредуцирующими бактериями // Палеонтологический журнал. 2004. № 6. Стр. 3–8.
7. Кунецов В.Г. Эволюция карбонатонакопления в истории Земли. М.: ГЕОС, 2003. 262 с.
8. Кунецов В.Г. Соотношение стратиграфического распределения магнезитов с развитием цианобактерий // Докл. Академии наук. 2004. Т. 397. № 5. С. 655–659.
9. Кунецов В.Г. Эволюция кремненакопления в истории Земли и её соотношение с развитием биоты // Докл. Академии наук. 2011. Т. 441. № 6. С. 775–779.
10. Кунецов В.Г. Эволюция осадочного породообразования в истории Земли. М.: Научный мир, 2016. 212 с.
11. Маслов А.В., Гражданкин Д.В. Докембрый в шкале геологического времени. Проект-2012 // Литосфера. 2013. № 3. С. 151–155.
12. Маслов А.В., Подковыров В.Н. Редокс-статус океана 2500–500 млн. лет назад: современные представления // Литология и полезные ископаемые. 2018. № 3. С. 207–230.
13. Пустовалов Л.В. Петрография осадочных пород. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1940. Т. 1. 476 с.
14. Розен О.М. Наблюдаемые признаки первичных осадков и условия раннего литогенеза в истории Земли // Концептуальные проблемы литологических исследований в России. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2011. Т. 2. С. 173–176.
15. Розен О.М., Аббасов А.А., Злобин В.Л., Сафонов В.Т. Карбонатные породы в метаморфических комплексах: петрогенезис, минеральный состав исходных отложений, условия осадконакопления // Известия вузов. Геология и разведка. 2003. № 1. С. 38–47.
16. Ронов А.Б. Стратисфера, или осадочная оболочка Земли (количественное исследование) М.: Наука, 1993. 144 с.
17. Стражох В.Н. Железорудные фации и их аналоги в истории Земли. Опыт историко-геологического анализа процесса осадкообразования. Тр. ИГН АН СССР. Геол. сер. Вып. 73. № 22. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 267 с.
18. Стражох В.Н. О периодичности и необратимой эволюции осадкообразования в истории Земли // Изв. АН СССР, сер. геол. 1949. № 6. С. 70–111.
19. Хорова И.В. Основные черты эволюции кремненакопления в фанерозое // Эволюция осадочного процесса в океанах и на континентах. М.: Наука, 1983. С. 111–120.
20. Яншин А.Л. Эволюция геологических процессов в истории Земли. Л.: Наука, 1988. 39 с.
21. Bakker A., Holland H.D., Wang P-L., Stein H.J., Hannah J.L., Coetzee L.L., Beukes N.J. Dating the rise of atmospheric oxygen // Nature. 2004. V. 427. N 8. P. 117–120.
22. Croal L.R., Jiao Y., Newmann D.K. Phototrophic Fe (II) oxidation in an atmosphere of H₂: implications for Archean banded iron formations // Geobiology. 2009. V. 7. N 1. P. 21–24.
23. Daly R. First calcareous fossils and evolution of limestones // Geol. Soc. Amer. Bull. 1909. V. 20. P. 2517–2527.
24. Hofmann H.J., Grey K., Thorpe R.I. Origin of 3.45 Ga coniform stromatolites in the Warrawoona Group, Western Australia // Geol. Soc. Amer. Bull. 1999. V. 111. P. 1256–1262.
25. Kappler A., Newmann D.K. Formation of Fe (III) minerals by Fe (II) oxidizing photoautotrophic bacteria // Geochim. Cosmochim Acta. 2004. V. 68. N 6. P. 1217–1226.
26. Kappler A., Pasquero C., Konhauser K.O., Newmann D.K. Deposition of banded iron formations by anoxicogenic phototrophic Fe(II)-oxidizing bacteria // Geology. 2005. V. 33. N 11. P. 865–868.
27. Konhauser K., Hamade T., Raiswell R., Morris R.C., Ferris P.C., Southam G., Gansfield D.E. Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formations? // Geology. 2002. V. 30. N. 12. P. 1079–1082.
28. Li J.L., Konhauser K.O., Cole D.R., Phelps T.J. Mineral ecophysiological data provide growing evidence for microbial activity in banded iron-formations // Geology. 2011. V. 39. N 8. P. 707–710.
29. Linda J.E., Brasier M.D. Evolution of Precambrian Atmosphere: Carbon Isotopic Evidence from the Australian Continent // Precambrian Earth: Tempos and Events. Developments in Precambrian Geology. V. 12. 2004. P. 388–403.
30. Miot J., Benceraga K., Morin G., Kappler A., Bernhard S., Obst M., Scouris-Panet F., Guignier J-M., Posth N., Galvez M., Brown G.E., Guyot F. Iron biomineralization by anaerobic neutrophilic iron-oxidizing bacteria // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2009. V. 73. N 3. P. 696–711.
31. Porsch N.R., Konhauser K.O., Kappler A. Microbiological processes in banded iron formation deposition // Sedimentology. 2013. V. 60. N 7. P. 1733–1744.
32. Wilden F., Schenkel S., Heising S., Ehrenreich A., Assmus B., Schink B. Ferrous iron oxidation by anoxicogenic phototrophic bacteria // Nature. 1993. V. 362. N 6423. P. 834–836.
33. Walsh M. Microfossils and possible microfossils from the Early Archean Onverwacht Group, Barberton Mountain Land, South Africa // Precambrian Research. 1992. V. 54. P. 271–292.

REFERENCES

1. Bergman I.A. *The Iron-Siliceous Ore Genesis of the Early Precambrian*. Moscow, VIMS Publ., 2013, 323 p. (in Russian).
2. Bogatyrev B.A. «Evolution of Bauxite Formation in Earth History». *Conceptual Problems of the Lithological Studies in Russia*. Ed. by O. Yapaskurt et al. Vol. I. Kazan, Kazan University Publ., 2011, pp. 129–133. (in Russian).
3. Vassoevich N.B. «Introduction», in *Diagenesis and Catagenesis of Sedimentary Formations*. Moscow, Mir Publ., 1971, pp. 5–8 (in Russian).
4. Dena Dz h.D., Dena E.S., Pelach Ch., Berman G., Frondel K. Sistema mineralogii. T. 1. Polutom 2. M., IL Publ., 1951, 420 s.
5. Dubinina G.A., Sorokina A.Yu. Neutrophilic Lithotrophic Iron Oxidizing Prokaryotes and Their Role in the Biogeochemical Processes of the Iron Cycle, *Microbiology*, 2014, vol. 83, no. 2, pp. 127–142. (in Russian).
6. Zavarzina D.G. «Formation of magnetite and siderite by thermophilic Fe(III)-reducing bacteria», *Paleontological Journal*, 2004, vol. 38, no. 6, pp. 585–589. (in Russian).
7. Kuznetsov V.G. *Evolution of the Carbonate Formation in the Earth History*. Moscow: GEOS Publ., 2003, 262 p. (in Russian).
8. Kuznetsov V.G. The Relationship between Stratigraphic Distribution of Magnesites and Development of Cyanobacteria, *Doklady Earth Sciences*, 2004, vol. 396, no. 6, pp. 783–787. (in Russian)
9. Kuznetsov V.G. Evolution of Silica Accumulation in the Earth's History and Its Relation to Biota Development, *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 441, no. 6, pp. 775–779. (in Russian).
10. Kuznetsov V.G. *Evolution of Sedimentary Rock Formation in the Earth History*. Moscow, Nauchny mir Publ., 2016, 212 p. (in Russian).
11. Maslov A.V., Grazhdankin D.V. Precambrian in the Geological Time Scale, *Litosfera*, 2012, vol. 3, pp. 151–155. (in Russian).
12. Maslov A.V., Podkovyrov V.N. Ocean Redox State at 2500–500 Ma: Modern Concepts, *Lithology and Mineral Resources*, 2018, vol. 53, no. 3, pp. 190–211.
13. Pustovalov L.V. *Petrography of Sedimentary Rocks*. Moscow, Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 1940, Vol. I, 476 p. (in Russian).
14. Rozen O.M. Appearing Signs of Base Sediments and the Conditions of Early Lithogenesis in Earth History, *Conceptual Problems of the Lithological Studies in Russia*. Ed. by O. Yapaskurt et al. Vol. I. Kazan, Kazan University Publ., 2011, pp. 173–176. (in Russian).
15. Rozen O.M., Abbyasov A.A., Zlobin V.L., Safronov V.T. Carbonaceous rocks in metamorphic complexes: petrogenesis, mineral composition of original deposits, conditions of sedimentation, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2003, vol 1, pp. 38–47. (in Russian).
16. Ronov A.B. *Stratisphere, or the Sedimentary Shell of the Earth (Qualitative Study)*. Moscow, Nauka Publ., 1993. 144 p. (in Russian).
17. Strakhov V.N. *Iron-oxide Facies and Their Counterparts in Earth History. An Attempt of Historical and Geological Analysis of the Sedimentation Process*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1947, 267 p. (in Russian).
18. Strakhov V.N. On Periodicity and Irreversible Evolution of Sedimentation in the Earth History, *Izvestia AN SSSR, Geological Series*, 1949, vol. 6, pp. 70–111. (in Russian).
19. Khorova I.V. Main Features of the Evolution of Silica Accumulation in Phanerozoic, *Evolution of Sedimentary Process in the Oceans and Continents*. Ed. by P. Timofeev. Moscow, Nauka Publ., 1982, pp. 111–120. (in Russian).

20. Yanshin A.L. *Evolution of Geological Processes in Earth History*. Leningrad, Nauka Publ., 1988, 39 p. (in Russian).
21. Bakker A., Holland H.D., Wang P-L., Stein H. J., Hannah J. L., Coetzee L.L., Beukes N.J. Dating the rise of atmospheric oxygen, *Nature*, 2004, vol. 427, no. 8, pp. 117–120.
22. Croal L.R., Jiao Y., Newman D.K. Phototrophic Fe (II) oxidation in an atmosphere of H₂: implications for Archean banded iron formations, *Geobiology*, 2009, vol.7, no. 1, pp. 21–24.
23. Daly R. First calcareous fossils and evolution of limestones, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1909, vol. 20, pp. 2517–2527.
24. Hofmann H.J., Grey K., Thorpe R.I. Origin of 3.45 Ga coniform stromatolites in the Warrawoona Group, Western Australia, *Geol. Soc. Amer., Bull.*, 1999, vol. 111, pp. 1256–1262.
25. Kappler A., Newman D.K. Formation of Fe (III) minerals by Fe (II) oxidizing photoautotrophic bacteria, *Geochim. Cosmochim Acta*, 2004, vol. 68, no. 6, pp. 1217–1226.
26. Kappler A., Pasquero C., Konhauser K.O., Newman D.K. Deposition of banded iron formations by anoxicogenic phototrophic Fe(II)-oxidizing bacteria, *Geology* 2005, vol. 33, no. 11, pp. 865–868.
27. Konhauser K., Hamade T., Raiswell R., Morris R.C., Ferris P.C., Southam G., Ganfield D.E. Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formations?, *Geology*, 2002, vol. 30, no. 12, pp. 1079–1082.
28. Li J.L., Konhauser K.O., Cole D.R., Phelps T.J. Mineral ecophysiological data provide growing evidence for microbial activity in banded iron-formations, *Geology*, 2011, vol. 39, no. 8, pp. 707–710.
29. Lindsay J.E., Brasier M.D. Evolution of Precambrian Atmosphere: Carbon Isotopic Evidence from the Australian Continent, in *Precambrian Earth: Tempos and Events. Developments in Precambrian Geology*, vol. 12, Elsevier, 2004, pp. 388–403.
30. Miot J., Bencerara K., Morin G., Kappler A., Bernard S., Obst M., Scouri-Panet F., Guigner J-M., Posth N., Galvez M., Broun G.E., Guyot F. Iron biominerilization by anaerobic neutrophic iron-oxidizing bacteria, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, vol. 73, no. 3, pp. 696–711.
31. Posch N.R., Konhauser K.O., Kappler A. Microbiological processes in banded iron formation deposition, *Sedimentology*, 2013, vol. 60, no. 7, pp. 1733–1744.
32. Widdel F., Schnell S., Heising S., Ehrenreich A., Assmus B., Schink B. Ferrous iron oxidation by anoxicogenic phototrophic bacteria, *Nature*, 1993, vol. 362, no. 6423, pp. 834–836.
33. Walsh M. Microfossils and possible microfossils from the Early Archean Onverwacht Group, Barberton Mountain Land, South Africa, *Precambrian Research*, vol. 54, 1992, pp. 271–292.