

## **Структуры стилолитизации как вероятные пути миграции органического вещества в осадочных породах микробиального генезиса**

*О. Н. Злобина\*, И. В. Вараксина*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: ZlobinaON@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Изучены возможности сохранения, миграции и преобразования органического вещества (ОВ) в породах докембрийского возраста, текстурно-структурные характеристики которых неразрывно связаны с физиологическими особенностями микроорганизмов, и роль в этих процессах структур стилолитизации. Сходство современных строматолитов с древними аналогами в механизме осаждения карбонатного микрита и образования пористых каркасов позволило установить, что ОВ цианобактериальных плёнок в значительном количестве могло сохраняться после погружения построек в бассейне седиментации и преобразования их в осадочные толщи, концентрируясь на многочисленных реликтовых поверхностях между микритовыми выделениями карбоната, осажённого микроорганизмами при жизни. Последующие преобразования выражались в перекристаллизации карбонатного вещества, сопровождающейся значительной потерей первичной пустотности, вытеснением и перераспределением ОВ, а также глинистого материала, осевшего из взвеси. При детальном петрографическом исследовании наблюдалось, как глинисто-органический материал (ГОМ), вытеснённый перекристаллизацией, концентрировался на гранях кристаллов и в межкристаллических порах на определённых участках и слагал соприкасающиеся друг с другом многочисленные линзовидные слои, формирующие поверхности сложных конфигураций - зачаточные микростилолиты. По мнению авторов, перекристаллизация является одним из основных катализаторов процессов стилолитизации, потому что создаёт минеральные агрегаты, в которых давление на заключённый между ними ГОМ очень сильно различается в разных точках. Это способствует возникновению явления дифференцированного растворения под давлением, более интенсивному преобразованию ОВ в зонах с максимальной нагрузкой и, как следствие, избыточному выделению CO<sub>2</sub>, что, в свою очередь, приводит к насыщению углекислотой поровых растворов и инициации процессов химического растворения. Вероятно, так в строматолитах образуются стилолиты и сопряжённая с ними трещинная пустотность, доступная для миграции ОВ.

**Ключевые слова:** Строматолиты, перекристаллизация, преобразование органического вещества, стилолитизация

## **Stylolitization structures as possible migration routes of organic matter in microbial genesis sedimentary deposits**

*O. N. Zlobina\*, I. V. Varaksina*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian  
Federation

\* e-mail: ZlobinaON@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** It was studied that the possibilities of preservation, migration and transformation of organic matter (OM) in rocks of Precambrian age, the textural and structural characteristics of which are

inextricably linked with the physiological characteristics of microorganisms, and the role of stylolithization structures in these processes. The similarity of modern stromatolites with ancient ones in the mechanism of deposition of carbonate micrite and the formation of porous frameworks allowed us to establish that a significant amount OM of cyanobacterial laminae could be preserved after the buildings were immersed in the sedimentation basin and transformed into sedimentary strata. OM was concentrated on numerous relict surfaces between micrite carbonate secretions deposited by microorganisms during life. Subsequent transformations were expressed in the recrystallization of the carbonate substance, accompanied by a significant loss of primary voidness, outgassing and redistribution of OM, as well as clay material deposited from the suspension. During detailed petrographic studies, it was observed how clay-organic material (COM), displaced by recrystallization, concentrated on the crystal faces and in intercrystalline pores in certain areas and composed numerous lenticular layers in contact with each other, forming surfaces of complex configurations - rudimentary microstylolites. According to the authors, recrystallization is one of the main catalysts of stylolithization processes, because it creates mineral aggregates in which the pressure on the COM enclosed between them varies greatly at different points. This contributes to the occurrence of the phenomenon of differentiated dissolution under pressure, more intensive transformation of OM in areas with maximum load and, as a consequence, excessive release of CO<sub>2</sub>, which in turn leads to saturation of pore solutions with carbon dioxide and initiation of chemical dissolution. Probably, this is how stylolites and associated fractured voidness are formed in stromatolites, which is available for the migration of OM.

**Keywords:** Stromatolites, recrystallization, transformation of organic matter, stylolithization

В 19 веке ученые-естествоиспытатели при изучении геологических разрезов (в карьерах и естественных обнажениях) обратили внимание на хорошо выделяющиеся более темным цветом в плотных карбонатных породах зигзагообразные, зачастую субпараллельные линии, которые были отнесены к текстурным особенностям породы, отражающим в вертикальном срезе реликтовые контуры поверхностей наложения. Предполагалось, что эти бугристые поверхности соответствуют «микрорельефу» дна бассейна седиментации (по типу захороненных знаков ряби и т.п.) и сложены тонкими глинистыми намывами. Однако, многообразие конфигураций линий (столбчатого, зубчатого, бугорчатого и смешанного типов) с различной частотой и амплитудой пиков свидетельствовало о более сложном механизме их образования - вероятном сочетании меж- и внутри слоевых физико-химических процессов. Считается, что представление об их формировании в результате растворения в условиях дифференцированного давления, характерных для постседиментационных стадий, было впервые высказано Э.К. Фуксом в 1894 г. (первоисточники к настоящему времени утрачены) [1]. Термин «стилолит» состоит из двух греческих слов *στυλος* – «столб», *λίθος* – «камень» и означает единичный столбец, шип, зубец, но также используется для названия образований в осадочных породах, сложенных битуминозным, глинистым, карбонатным материалом, минералами кремнезёма, сульфидами, окислами и гидроокислами железа [2]. В данной работе рассматриваются структуры стилолитизации, которые в качестве элементов включают отдельные слойки (толщиной от менее мм до нескольких мм, иногда см), формирующие в вертикальном разрезе зигзагоподобные линии - собственно стилолиты, а также осложняющие и генетически связанные с ними трещины и пустоты.

Объектом данного исследования являются карбонатные отложения, вскрытые многочисленными скважинами на территории Сибирской платформы. Особое внимание среди них заслуживают докембрийские комплексы, сложенные автохтонными карбонатными породами строматолитового генезиса, в связи с предполагаемо высоким нефтегазогенерирующим потенциалом. По данным В.В. Харахинова с коллегами установлено, что ресурсами, генерирующими углеводороды, обладала вся толща рифея, а не только существенно глинистые нефтематеринские породы [3]. Поэтому представляется актуальным анализ возможностей сохранения, миграции и преобразования органического вещества (ОВ) в породах, текстурно-структурные характеристики которых неразрывно связаны с физиологическими особенностями микроорганизмов, и роль в этих процессах структур стилолитизации.

Работы по изучению современной строматолитовой системы в заливе Шарк Западной Австралии показали, что это микробиальное сообщество по своим биологическим, экологическим характеристикам и географическому распространению типов с различными морфометрическими особенностями можно считать аналогом докембрийских образований и использовать для сравнительных седиментологических исследований [4-7]. Анализ внутренних тканей строматолитов из залива Шарк выявил повсеместное осаждение в микробных матах микрокристаллического карбоната, образующего каркас столбиков и цемент в межстолбчатом пространстве, что является также типичным для докембрийских строматолитов [8-9]. В поперечном разрезе современного конусообразного биолита прослеживается тонкослоистая (ламинитовая) структура надстраивающихся друг над другом известковых корочек с распределяющимися на них остатками цианобактериальных плёнок, присутствуют многочисленные межламинные пустоты, заполненные в прижизненном состоянии морской водой (с растворёнными в ней органоминеральными соединениями и взвесью) и пузырями с кислородом, сгенерированным этими микроорганизмами в результате фотосинтеза (рис. 1А) [7]. Распределение ОВ хорошо отражается в срезах, пропитанных хлоридом метилтиониния (метиленовым синим), где органика окрашивается в фиолетовый цвет (рис. 1А). Количество ОВ производимого цианобактериями этих строматолитов в естественных условиях точно установить до настоящего времени не удалось из-за непрерывного употребления биоплёнок в пищу морскими организмами. Опыты с перемещёнными в лабораторные условия биолитами указывают на возрастание толщины многослойного мата приблизительно на 2-3 мм в год при скорости накопления за одни сутки микрокристаллического карбоната  $\sim 0,33 \text{ } \mu\text{моль/см}^2$  и органического углерода  $\sim 2,5 \text{ } \mu\text{моль/см}^2$  [10, 11]. По мере увеличения глубины бассейна и погружения строматолитовых построек в неблагоприятные условия цианобактериальные маты отмирают и вместе с ними захоранивается улавливаемый внеклеточным слизистым матриксом тонко-мелкозернистый терригенный материал (зёрна кварца, полевых шпатов, обломков пород, слюдистых и глинистых чешуек).

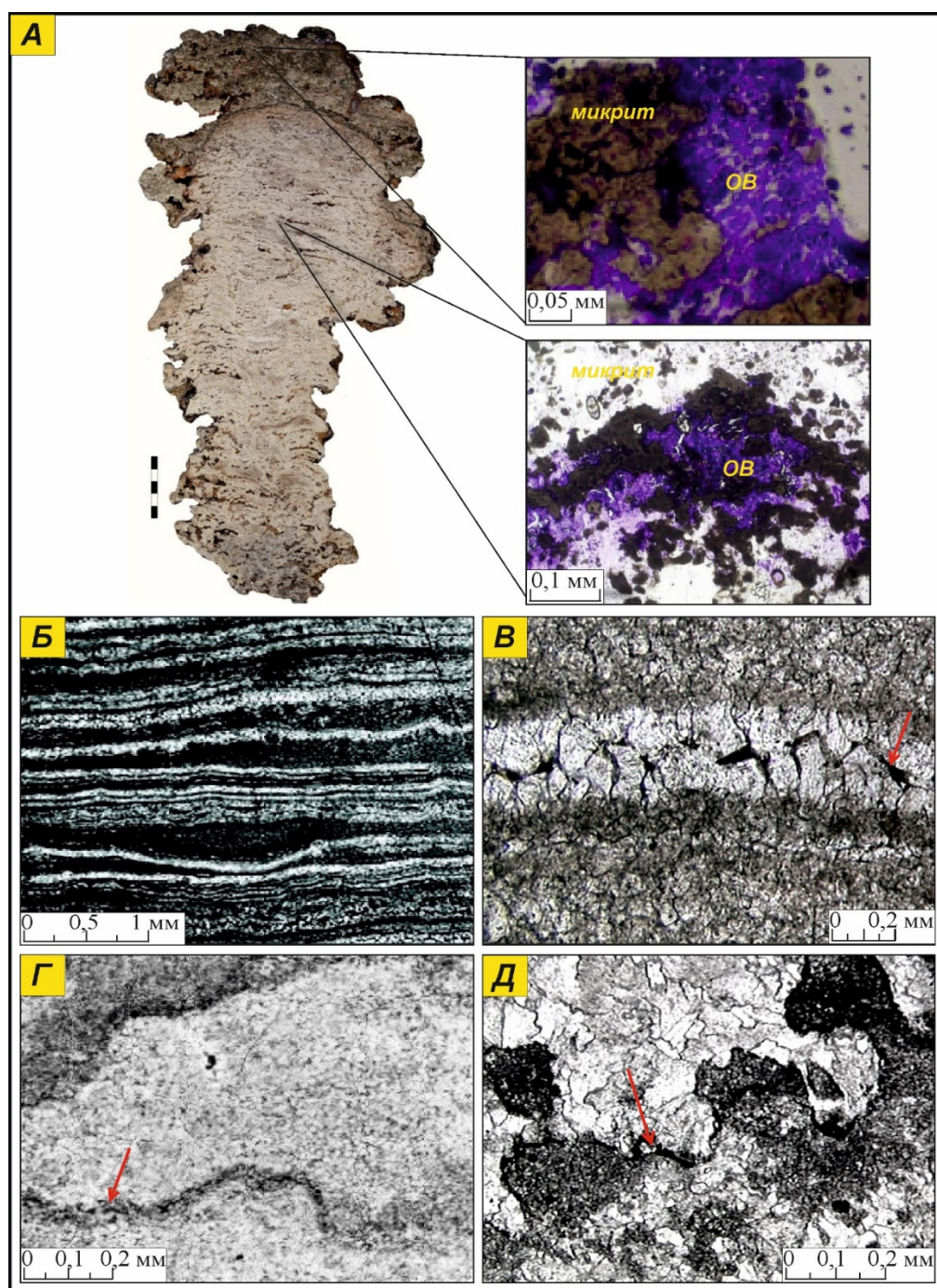


Рис. 1. Современные и древние строматолиты: распределение глинисто-органического материала (ГОМ), характер перекристаллизации, образование стилолитов

**А** – микробиолит из залива Шарк Западной Австралии [7], тонкие срезы с верхней корочки и из средней части, органическое вещество окрашено хлоридом метилтиониния; **Б** - тонкослоистая (ламинитовая) структура рифейского строматолита с чередующимися слойками в разной степени насыщенными ГОМ; **В** - примазки ГОМ на гранях кристаллов доломита в осевой части линзовидной фенестральной структуры в перекристаллизованном пластовом строматолите (верхний рифей, Куюмбинское месторождение); **Г** - фрагмент сильно перекристаллизованного строматолитового столбика с мелкобугорчатым микростилолитом, заполненным ГОМ в смеси с микрокристаллическим доломитом (доломитовой «мукой»); **Д** - формирование сутуровидного стилолита в краевой части перекристаллизованного микроstromатолита (верхний рифей, Куюмбинское месторождение)

Постепенно прекращается активный газо-водообмен внутренних полостей с морской средой, в них происходит медленное осаждение взвешенных частиц и образование пирита в результате жизнедеятельности сульфатредуцирующих микроорганизмов. Вероятно, таким естественным образом (без растворения и избыточного давления) формируются прототипы стилолитов - слойки, которые на поперечных срезах имеют контуры кривых линий, где относительно ровные мелкобугорчатые или мелкозубчатые участки (поверхность матов рельефна) примыкают к стенкам частично заполненных полостей. В составе слойков присутствует аквагенное органическое вещество, пелитоморфный и тонкочешуйчатый глинистый материал, выделения пирита, обломки кварца, полевых шпатов, слюдистые пластинки. При последовательном погружении осадочных толщ создаются благоприятные условия для сохранения большей части ОВ, заключённого в таких слойках, пустотах и в межкристаллических порах карбонатного вещества (диаметр первичных выделений карбоната от  $<1$  мкм до 50 мкм, иногда до 100-200 мкм [11, 12], первичная пористость на некоторых участках может достигать 40% и более [13]).

В последующих преобразованиях, по мнению авторов, основная роль принадлежит перекристаллизации карбонатного вещества с вытеснением и перераспределением глинисто-органического материала (ГОМ), заключённого в межкристаллических порах, и изменениям ОВ в зависимости от термобарических условий (рис. 1Б-Д). В результате перекристаллизации (зачастую неоднородной) большая часть первичной пористости утрачивается, порода уплотняется. Характер перераспределения ГОМ зависит от морфологического типа строматолитов, среди них выделяется пять основных: пластовые, желваковые, микростроматиты, столбчатые ветвящиеся и столбчатые неветвящиеся [14 и др.]. В пластовых микробиальных образованиях глинисто-органическое вещество вытесняется к плоскостям подошвы и кровли отдельных неоднородно перекристаллизованных ламинитовых слойков (рис. 1Б) [15 и др.]. В желваковых образованиях и микростроматитах перераспределение ГОМ происходит от центральных участков к их периферической части, с образованием более тёмных контурных каёмок, сложенных микритом, пропитанным ОВ, по которым затем развиваются микростилолиты сложной, сутуровидной формы (рис. 1Д). Внутренняя структура из-за интенсивной перекристаллизации часто полностью утрачивается, но некоторое количество ГОМ может оставаться в виде микровключений в кристаллах, образуя «теневые реликты» микробиальных образований, и высвободиться при более поздних (наложенных) процессах растворения пород. Следует заметить, что участки контурных каёмок тоже могут перекристаллизовываться с увеличением размерности кристаллов и диаметра межкристаллических пор, заполненных ОВ. В преобразованиях столбчатых строматолитов наблюдаются различные вариации и сочетания, описанные для первых трёх морфотипов. Одновременно с перестройкой карбонатного каркаса во внутренних полостях – фенестрах за счёт отжимания в них поровых растворов происходит постепенная или ступенчатая (порционная) кристаллизация наиболее крупных идиоморфных кристаллов кальцита, доломита, сульфатных минералов (рис. 1В). Характер заполнения может

различаться [16], но по наблюдениям авторов для фенестр вытянутой линзовидной формы свойственен рост кристаллов на верхней и нижней стенках одновременно навстречу друг другу и смыкания по средней линии. На плоскостях смыкания, как правило, концентрируются остатки глинисто-органического вещества в виде примазок на гранях кристаллов, в осевой части иногда остаются свободные поровые каналы полигональной формы. Таким образом, ГОМ, вытесненный перекристаллизацией, концентрируется на гранях кристаллов и в межкристаллических порах на определённых участках и может слагать соприкасающиеся друг с другом многочисленные линзовидные слойки, формирующие в 3D-плане поверхность сложных конфигураций - зачаточные микростилолиты. Перекристаллизация, по-видимому, является одним из основных катализаторов процессов стилолитизации, потому что создаёт минеральные агрегаты, в которых давление на заключённый между ними ГОМ очень сильно различается в разных точках [17]. Это способствует возникновению явления дифференцированного растворения под давлением, более интенсивному преобразованию ОВ в зонах с максимальной нагрузкой и как следствие избыточному выделению  $\text{CO}_2$ , что в свою очередь приводит к насыщению углекислотой поровых растворов и инициации процессов химического растворения. На участках с очень малым количеством глинисто-органического заполнителя микростилолитов возможно дробление и истирание карбонатного материала до состояния «муки», что часто наблюдалось авторами при изучении шлифов (рис. 1Г) и подтверждается лабораторными испытаниями [18]. В совокупности физико-химических процессов возникают трещины и щелевидные пустоты, сопряжённые с микростилолитами, по которым становится возможной более активная миграция ОВ.

Таким образом, изучение стилолитов в карбонатных отложениях докембрия подтвердило гипотезу их диагенетического образования [2]. Возможно, такое раннее возникновение стилолитов характерно только пород биогенного генезиса. В результате последовательного и многостадийного развития процессов стилолитизации, происходило перераспределение ОВ с концентрацией в стилолитовых швах, по которым в дальнейшем оно мигрировало.

*Работа выполнена в рамках темы FWZZ-2022-0008 Государственной программы ФНИ.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов В.Г. Рассказывает образец осадочной породы // Природа. – 2017. – № 4. – С. 58-60.
2. Кузнецов В.Г., Журавлева Л.М. Стилолиты – время образования и многостадийность процесса // Известия Вузов. Геология и Разведка. – 2014. – № 5. – С. 17-22.
3. Харахинов В.В., Шленкин С.И., Зеренинов В.А., Рябченко В.Н., Зощенко В.А. Нефтегазоносность докембрийских толщ Куюмбинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазоаккумуляции [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т. 6. – № 1. – С. 1-31. – URL: [http://www.ngtp.ru/rub/4/12\\_2011.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/4/12_2011.pdf) (дата обращения: 16.05.2022).
4. Golubic S., Hofmann H.J. Comparison of Holocene and Mid-Precambrian Entophysalidaceae (Cyanophyta) in stromatolitic algal mats: cell division and degradation // Journal of Paleontology. – 1976. – № 50. – P. 1074-1082.

5. Golubic S., Microbial mats and modern stromatolites in Shark Bay, Western Australia // Planetary ecology; Proceedings of the Sixth International Symposium on Environmental Biogeochemistry, Santa Fe. – 1985. – P. 3-16.
6. Burns B.P., Goh F., Allen M., Nellan B.A. Microbial diversity of extant stromatolites in the hypersaline marine environment of Shark Bay, Australia // Environmental Microbiology. – 2004. – № 6. – P. 1096-1101.
7. Suosaari E.P., Reid R.P., Playford P.E., Foster J.S., Stolz J.F., Casaburi G., Hagan P.D., Chirayath V., Macintyre I.G., Planavsky N.J., Eberli G.P. New multi-scale perspectives on the stromatolites of Shark Bay, Western Australia // Nature, Scientific reports. – 2016. – № 6:20557. – P. 1-13.
8. Grotzinger J.P., Knoll A.H. (1999) Stromatolites in Precambrian carbonates: evolutionary mileposts or environmental dipsticks? // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. – 1999. – № 27 – P. 313-358.
9. Schopf J.W., Klein C. The Proterozoic Biosphere: a multidisciplinary study. – Cambridge University Press, New York, NY: 1992. – 1353 p.
10. Fenchel T., Kühl M. Artificial Cyanobacterial Mats: Growth, Structure, and Vertical Zonation Patterns // Microbial Ecology. – 2000. – № 40 – P. 85-93.
11. Kühl M., Fenchel T., Kazmierczak J. (2003) Growth, Structure and Calcification Potential of an Artificial Cyanobacterial Mat. In: Krumbein W.E., Paterson D.M., Zavarzin G.A. (eds) Fossil and Recent Biofilms. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-0193-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-0193-8_5).
12. Spadafora A., Perri E., McKenzie J., Vasconcelos C. Microbial biomineralization processes forming modern Ca:Mg carbonate stromatolites // Sedimentology. – 2010. – Vol. 57 – P. 27-40.
13. Sabater S. Structure and architecture of a stromatolite from a Mediterranean stream // Aquatic Microbial Ecology. – 2000. – Vol. 21 – P. 161-168.
14. Хабаров Е.М. Карбонатная седиментация в мезоэопротерозойских бассейнах юга Восточной Сибири и некоторые вопросы эволюции рифообразования в докембрии // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 10. – С. 1447–1465.
15. Вараксина И.В., Хабаров Е.М. Микроструктуры, литологические ассоциации и условия образования рифейских строматолитов Байкитской антеклизы (запад Сибирской платформы) // Литосфера. – 2007. – №.4. – С. 59-72.
16. Шалдыбин М.В. Фенестровые структуры рифейских карбонатных пород Юрубчено-Тохомской зоны // Геология нефти и газа. – 2017. – №.3. – С. 61-68.
17. Грошкова Н.Ю., Кузнецов В.Г., Пименов Ю.Г., Сухы В. Влияние стилолитобразования на коллекторские свойства карбонатных пород // Геология нефти и газа. – 1985. – № 7. – С. 50–54.
18. Скворцова З.Н., Траскин В.Ю., Породенко Е.В., Симонов Я.И. Роль рекристаллизационной ползучести в диагенезе карбонатных отложений: теория и лабораторное моделирование // Коллоидный журнал. – 2018. – Т. 80. – № 1. – С. 3-16.

© О. Н. Злобина, И. В. Вараксина, 2022