

ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.73:562

В.В. МАРУСИН

**СТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ И СЕДИМЕНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ПАЛЕОИХНОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Одной из групп палеонтологических остатков, предоставляющих возможность решения комплексных геологических задач, являются ископаемые следы жизнедеятельности. Они представляют собой осадочные текстуры, образованные в результате жизнедеятельности (питания, перемещения и т. д.) организмов в осадке. Особое, «пограничное», положение ихнофоссилий между палеонтологическими остатками и осадочными текстурами приводит к тому, что использование ихнофоссилий для установления возраста, расчленения и корреляции отложений сопровождается серьезными ограничениями. Автором показаны основные особенности группы ископаемых следов жизнедеятельности, а также возможности применения данных палеоихнологического анализа для решения седиментологических и стратиграфических задач.

Ключевые слова: ископаемые следы жизнедеятельности; ихнофашии; ихнотекстурный анализ; ихностратиграфия.

Изучение осадочных последовательностей любого возраста в настоящее время подразумевает использование комплексного подхода с привлечением максимально-широкого спектра анализов и методик с целью получения наиболее полного и достоверного результата. Использование палеонтологического материала, который встречается в изучаемых последовательностях, зачастую предоставляет весьма важную информацию об обстановках обитания населявших осадочный бассейн организмов и, следовательно, позволяет уточнить обстановку осадконакопления вмещающих отложений. Однако как для решения эволюционных и стратиграфических задач, так и для уточнения интерпретации полученных литолого-седиментологических данных зачастую требуются исключительные условия сохранности палеонтологического материала (автохтонная сохранность, минимальные деформации материала, присутствие стенобионтных форм и т. д.), что в геологической летописи встречается относительно редко.

Одной из групп палеонтологических остатков, предоставляющих возможность решения подобных комплексных задач, являются ископаемые следы жизнедеятельности. Они представляют собой осадочные текстуры, образованные в результате жиз-

недеятельности (питания, перемещения и т. д.) организмов в осадке. Ввиду того, что ископаемые следы жизнедеятельности, строго говоря, не являются палеонтологическими остатками, но осадочными текстурами, образованными в результате жизнедеятельности организмов [1, 4], их использование для установления возраста, расчленения и корреляции отложений сопровождается серьезными ограничениями. Это связано в том числе и с тем, что ихнофоссилии не отражают напрямую морфологию организмов, оставлявших следы — широко известны случаи, когда ископаемые следы схожей морфологии образованы неблизкородственными организмами [10, 21], и наоборот — один и тот же организм в зависимости от типа поведения и характера субстрата может образовывать весьма отличающиеся по морфологии следы [18]. Следует оговориться, что особое, «пограничное», положение ихнофоссилий между палеонтологическими остатками и осадочными текстурами приводит к определенным сложностям в плане их наименования и классификации — для следов жизнедеятельности не могут применяться устоявшиеся правила зоологической номенклатуры. В качестве аналогов зоологическим терминам «род» и «вид» были приняты термины «ихнород» (ichnogenera/ichno-

gen./igen.) и «ихновид» (ichnospecies/ichnosp./isp.), основывающиеся на морфологических признаках определённых следов: форма норы/системы нор, пространственная ориентировка образуемых нор, тип стенки норы и её морфологические черты, ветвление (наличие, характер), тип заполнения норы (менисковое, обрушение норы, пассивное заполнение норы осадком) и т. д. [3, 4].

Ихнофоссилии в литологии и стратиграфии

Как уже упоминалось, использование ихнофоссилий для решения задач расчленения и корреляции отложений сопряжено с рядом сложностей и ограничений. Одним из основных «сдерживающих» факторов является высокая фациальная приуроченность ископаемых следов жизнедеятельности: образование организмом нор той или иной морфологии зачастую зависит от гидродинамических особенностей среды, типа вмещающего осадка, а также наличия и характера поступления питательных веществ.

Ихнофации. Высокая фациальная приуроченность следов позволяет выделить определённые ихнокомплексы, приуроченные к определённым типам осадков (фактически — к обстановкам обитания) (ихнофации). Следы жизнедеятельности могут быть носителями ценной информации о среде, в которой происходило накопление осадка или о её отдельных параметрах, а также об обитавших здесь организмах и их образе жизни [1]. Ихнофации представляют собой устойчивые во времени ассоциации ископаемых следов жизнедеятельности, сформированные и приуроченные к определённым обстановкам осадконакопления [4]. Первые попытки сформулировать концепцию ихнофаций и построить ихнофациальную модель были предприняты начиная с 50-х гг. XX в. Адольфом Зейлахером в серии статей [15, 16], в которых делался вывод о существовании устойчивых во времени комплексов ихнотаксонов и их связи с гидродинамическими и батиметрическими условиями среды обитания. Уникальной особенностью ихнофоссилий является их априорно-автохтонная сохранность, что даёт более достоверную информацию об обстановках формирования конкретного ихноценоза. Современная ихнофациальная модель представляет собой сложный ансамбль ихноценозов (15 ихнофаций), характеризующих большую часть обстановок осадконакопления как морских, так и пресноводных и наземных, которая четко отражает структуру бентосных роящихся сообществ (ex. gr. Celliforma, Scoyenia, Mergmia и т.д.) [4, 13]. Однако типологичными для морских обстановок являются пять ихнофаций: Psilonichnus, Skolithos, Cruziana, Zoophycos, Nereites.

В частности, ихнофация Skolithos, характеризующая обстановки с активной гидродинамикой и

соответственно большим количеством поступающего обломочного материала и питательных веществ, представлена преимущественно вертикальными простыми норами обитания организмов-фильтраторов (норы *Skolithos*, *Arenicolites*, а также *Diplocraterion* и *Ophiomorpha*) и демонстрирует практически полное отсутствие горизонтальных нор [7].

В то же время ихнофация *Nereites* представляет собой устойчивое ихносообщество, приуроченное к наиболее гидродинамически-спокойным обстановкам седиментации. Первоначальная батиметрическая интерпретация данной ихнофации — глубоководные обстановки абиссальных равнин, однако в последующих работах было показано, что она характеризует практически любые условия с тонкозернистой фоновой седиментацией и редкими прослоями песчаников, отвечающих дистальным отложениям турбидных потоков. Наиболее характерные черты ихнофации: доминирование горизонтальных систем следов графоглиптид (*Spirographe*, *Helminthoraphe*, *Cosmoraphe*, *Nereites*, *Urohelminthoidea*, *Paleodictyon*), подчинённое число следов ползания (*Scolicia*), отсутствие активно-зарывающихся форм и общее высокое таксономическое разнообразие [4].

Наиболее таксономически-разнообразной является ихнофация *Cruziana*, характеризующаяся высоким таксономическим разнообразием как горизонтальных следов питания и перемещения (*Archaeonassa*, *Asteriacites*, *Cruziana*, *Curvolithus*, *Didymalichnus*, *Gyrochorte*, *Monomorphichnus*, *Rusophycus* и др.) организмов в субстрате, так и биотурбирующих организмов (*Phycodes*, *Rhizocorallium*, *Diplocraterion*, *Arthropycus*, *Teichichnus*, *Arenicolites* и др.). Присутствие большого количества горизонтальных следов указывает на относительно спокойные гидродинамические условия (отсутствие долговременных сильных однонаправленных потоков, периодическая потоковая седиментация), в то же время большое число биотурбирующих ихнотаксонов свидетельствует о постоянном поступлении обломочного материала и частиц пищи.

Первоначально обстановки седиментации, характерные для ихнофации *Cruziana*, были интерпретированы как область шельфовой зоны от нижней части зоны волновой деятельности до бровки шельфа [6], однако в последствии было показано, что в зависимости от гидродинамического режима и условий седиментации ихноценоз фации *Cruziana* может встречаться в приливно-отливных условиях, дельтах и лагунах [9].

Несмотря на то, что современная ихнофациальная модель представляет ихнофации, как серию ихноценозов, последовательно сменяющихся по мере смещения по батиметрическому профилю, в действительности ихнофации отражают лишь особенности гидродинамического режима, характера седиментации и поступления питательных

веществ, нежели определённые батиметрические зоны.

Седиментология. При комплексном литолого-седиментологическом изучении фанерозойских осадочных последовательностей исследователи вынуждены сталкиваться с литологическими «последствиями» жизнедеятельности бентосных организмов — биотурбацией. Перемешивание осадка роющими организмами может иметь самые разные масштабы и зачастую приводит к полному уничтожению первичных осадочных текстур. Для определения степени переработки субстрата бентосными организмами в настоящий момент применяются как количественные (вертикальный и горизонтальный индексы биотурбации (BI)), так и качественные (таксономические определения) оценки [12, 20]. Грамотное проведение ихнотекстурного анализа часто позволяет установить не только состав ихносообщества и эволюционные аспекты экосистемы [14], но и степень переработки и последовательность колонизации субстрата, а также восстановить обстановки осадконакопления [11, 20].

Роль переработки осадка роющими организмами в формировании облика осадочных пород и структуре экосистемы весьма велика. Появление в позднем венде [14] интенсивной биотурбации, обусловленной освоением бентосными сообществами новых пищевых ресурсов и колонизацией внутриседиментационного экопространства, привело к значительному изменению облика экосистемы: активное биоперемешивание осадка роющими организмами привело к постепенному сокращению количества и роли микробиальных матов, отвечавших в докембрийское время за стабилизацию осадка, кардинально повлияло на сохранность мягкотелых организмов и макроводорослей, и послужило первым шагом к формированию экосистемы типичного фанерозойского облика. Феномен освоения бентосными сообществами массы осадка носит в литературе название «Первая агрономическая революция» [19].

На основании изучения обширных литературных данных, скважинного материала и естественных обнажений было установлено, что вертикальное распределение следов в слое имеет в целом закономерный характер и, в зависимости от конкретной ситуации, каждый раз представлено определённым набором ихнотаксонов, характеризующихся определённым типом поведения (ихногильдии) [5]. Ихногильдии формируются естественным путём на основании сходства в строении тела, использовании пространства организмами и источнике питательных веществ [3].

В терминах секвентной стратиграфии ихнофосилии зачастую являются маркерами изменений в обстановках осадконакопления — изменение количества и характера приносимого обломочного материала, перерывы в осадконакоплении, интен-

сивное рециклирование осадка находят свое отражение в структуре ихнокомплекса. Так, в частности, периоды минимального привноса обломочного материала характеризуются формированием стагнационного ихносообщества, характеризующегося относительно высоким таксономическим разнообразием и высокими значениями индекса биотурбации [20].

Следует отметить, что при решении комплексных литолого-седиментологических задач собственно данные ихнофациального и ихнотекстурного анализа не могут являться основой для построения моделей, поскольку не могут в достаточной мере точно указать на батиметрические и гидродинамические условия осадконакопления вмещающих отложений. Данные ихнофациального и ихнотекстурного анализа могут служить только лишь для корректировки и уточнения седиментологических моделей, построенных на основании комплексного литологического и геохимического изучения осадочных последовательностей, и свидетельствуют скорее о палеоэкологических особенностях и внутренней структуре бентосных сообществ. Использование данных о стратиграфическом распределении комплексов ископаемых следов жизнедеятельности для установления изменений в гидродинамическом режиме, поверхностей несогласия и секвентных границ разного масштаба может быть оправдано в полной мере только при изучении скважинного материала [2, 13]. Отсутствие возможности латерального прослеживания границ слоёв и пачек, затруднённое определение типов слоистости и поверхностных седиментационных текстур значительно затрудняют реконструкцию обстановок осадконакопления. В этом случае данные ихнотекстурного анализа могут предоставить информацию о характере седиментации.

Стратиграфия. Наряду с литолого-седиментологическими задачами, ископаемые следы жизнедеятельности могут применяться также и для решения стратиграфических задач. Из-за высокой фациальной приуроченности и низких темпов обновления типов поведения организмов в осадке следы жизнедеятельности не могут применяться для целей биостратиграфии в фанерозое: практически все основные типы поведения морских беспозвоночных организмов в осадке известны начиная с раннего фанерозоя (кембрия и ордовика) вплоть до наших дней [4]. Однако при изучении верхневендских и кембрийских осадочных последовательностей следы жизнедеятельности, наряду с мелкими скелетными остатками, археоциатами, трилобитами и конодонтами, играют весьма важную роль при определении возраста и корреляции отложений. В пограничном интервале верхнего венда и нижнего кембрия динамика появления новых типов поведения организмов в осадке (в том числе — появление интенсивной биотурбации) на-

столько высока, что на данном основании проводится зональное расчленение данного интервала [8]. И хотя приведённые ихнозоны не являются общепринятыми и стандартизированными, нижняя граница фортунского яруса (подошва кембрия) в Международной стратиграфической шкале в настоящее время проводится по первому появлению (F.A.D.) ископаемых следов *Treptichnus pedum* [4]. Также на основании последовательной смены во времени представителей ихнорода *Cruziana* (следы ползания трилобитов) была разработана ихнозональная шкала всего нижнего палеозоя («крузиановая ихностратиграфия») [17]. Однако применимость зональной шкалы по крузианам для расчленения отложений, определения возраста и дальнемагистральной корреляции (т. е. выполнения основных задач глобальной стратиграфии) имеет сравнительно узкий интервал применения: относительно низкая разрешающая способность крузиановых ихнозон (порядка одного периода) делает их менее предпочтительными для использования, по сравнению с конодонтами, трилобитами, граптолитами и другими палеозойскими ортостратиг-

рафическими группами. Использование этих ихнозон является целесообразным только для раннекембрийских силикокластических осадочных последовательностей, в которых по каким-либо причинам невозможно определение возраста по комплексам археоциат.

Заключение

Таким образом, при изучении как естественных обнажений, так и скважинного материала палеоихнологический анализ является важным подспорьем для решения литолого-седиментологических, палеоэкологических и палеонтолого-стратиграфических задач самого разного масштаба. Применение данных ихнотекстурного анализа в комплексе с разносторонним литологическим, седиментологическим, геохимическим и палеонтологическим изучением осадочных последовательностей позволяет существенно более детально установить как седиментологическую модель осадочного бассейна, так и установить экологическую структуру населявших его бентосных сообществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микулаш Р., Дронов А. Палеоихнология — введение в изучение ископаемых следов жизнедеятельности. Прага: Геологический институт Академии наук Чешской Республики, 2006. 122 с.
2. Ян П.А., Вакуленко Л.Г. Смена состава ихнофоссилий в келловей-оксфордских отложениях Западно-Сибирского бассейна как отражение цикличности седиментогенеза // Геология и геофизика. 2010. Т. 52. № 10. С. 1517–1537.
3. Bromley R.G. Trace fossils. Biology, taphonomy and applications. Second edition. London: Chapman & Hall, 1996. 361 p.
4. Buatois L.A., Mangano M.G. Ichnology. Organism–Substrate Interactions in Space and Time. Cambridge: University Press, 2011. 358 p.
5. Ekdale A.A., Bromley R.G. Analysis of composite ichnofabrics: an example in uppermost Cretaceous chalk of Denmark // Palaios. 1991. V. 6. P. 232–249.
6. Frey R.W., Seilacher A. Uniformity in marine invertebrate ichnology // Lethaia. 1980. V. 13. P. 183–207.
7. Frey R.W., Pemberton S.G. Biogenic structures in outcrops and cores. I. Approaches to Ichnology // Bulletin of Canadian Petroleum Geology. 1985. V. 33. P. 72–115.
8. Jensen S. The Proterozoic and Earliest Cambrian trace fossil record; patterns, problems and perspectives // Integrative and Comparative Biology. 2003. V. 43. P. 219–228.
9. MacEachern J.A., Pemberton S.G. Ichnological aspects of incised valley fill systems from the Viking Formation of the Western Canada Sedimentary Basin, Alberta, Canada // Incised Valley Systems and Sedimentary Sequences / R. Boyd, B.A. Zaitlin, R. Dalrymple (eds), Society for Sedimentary Geology Special Publication, 1994. V. 51. P. 129–157.
10. Martin A.J. Neoichnology of an Arctic fluvial point bar, North Slope, Alaska (USA) // Geological Quarterly. 2009. V. 53. No. 4. P. 383–396.
11. McIlroy D. Lateral variability in shallow marine ichnofabrics: implications for the ichnofabric analysis method // Journal of the Geological Society, London. 2007. V. 164. P. 359–369.
12. McIlroy D. Ichnological analysis: The common ground between ichnofacies workers and ichnofabric analysts // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2008. V. 270. P. 332–338.
13. Pemberton S.G., MacEachern A. The Sequence Stratigraphic Significance of Trace Fossils: Examples from the Cretaceous Foreland Basin of Alberta, Canada // American Association of Petroleum Geologists Memoir. 1995. V. 64. P. 429–475.
14. Rogov V., Marusin V., Bykova N., Goy Y., Nagovitsin K., Kochnev B., Karlova G., Grazhdankin D. The oldest evidence of bioturbation on Earth // Geology. 2012. V. 40. No. 5. P. 395–398.
15. Seilacher A. Die Geologische Bedeutung Fossiler Lebensspuren // Zeitschrift Deutschen Geologische Gesellschaft. 1954. V. 105. P. 214–227.
16. Seilacher A. Bathymetry of trace fossils // Marine geology. 1967. V. 5. P. 413–428.
17. Seilacher A. An updated Cruziana stratigraphy of Gondwanan Paleozoic sandstones // The Geology of Lybia 5. Amsterdam: Elsevier, 1992. P. 1565–1580.
18. Seilacher A. Trace fossil analysis. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 226 p.
19. Seilacher A., Pfluger F. From biomats to benthic agriculture: a biohistoric revolution // Biostabilization of sediments / Krumben W.E., Paterson D.M., Stal L.J. (eds), Oldenburg. 1994. P. 97–105.
20. Taylor A., Goldring R., Gowland S. Analysis and application of ichnofabrics // Earth-Science Reviews. 2003. V. 60. P. 227–259.
21. Vannier J., Calandra I., Gaillard C., Zylinska A. Priapulid worms: Pioneer horizontal burrowers at the Precambrian-Cambrian boundary // Geology. 2010. V. 38. P. 711–714.

ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А. Трофимука, (630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3; e-mail: marussin.vas@gmail.com)