

УДК 551.761.1

БИОГЕННЫЕ СТРУКТУРЫ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОГРАНИЧНОГО ПЕРМО-ТРИАСОВОГО ИНТЕРВАЛА ЮЖНОГО ВЕРХОЯНЬЯ, РЕСПУБЛИКА САХА (Якутия)

Мифтахутдинова Д. Н.¹, Кутыгин Р. В.²

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

²Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

E-mail: Dinara.Miftakhutdinova@kpfu.ru

Дано описание биогенных структур (ихнофоссилий и биотурбации) терригенных пород пограничного пермо-триасового интервала в разрезе Тирях-Кобюме (Южное Верхоянье). Изученный интервал сложен переслаиванием песчаников и алевролитов морского происхождения и связан с событием позднепермского массового вымирания. Большинство слоев содержит различные биогенные структуры. Разнообразный таксономический состав ихнофоссилий и высокая степень биотурбации пермских пород свидетельствуют о плотном заселении дна бассейна. В отложениях нижнего триаса разнообразие ихнофоссилий и степень биотурбации резко снижаются. В нижней части триасовых отложений некучанской свиты установлен интервал тонкого переслаивания горизонтально-слоистых пород (без признаков биотурбации) с послойно биотурбированными породами. Данный интервал перекрывается отложениями с высокой степенью биотурбации, что свидетельствует о быстром восстановлении биоразнообразия после пермского массового вымирания.

Ключевые слова: граница перми и триаса, чансинский, индский ярусы, ихнофоссилии, биотурбация, Верхоянье.

DOI: 10.34078/1814-0998-2022-3-16-24

ВВЕДЕНИЕ

Триасовый период начался с постепенного восстановления растительного и животного мира после пермского массового вымирания. В течение последних двух десятилетий понимание процессов и скорости восстановления живой природы в триасе претерпело большие изменения, связанные с уточнением положения границы между палеозоем и мезозоем (Gradstein et al., 2020).

В прошлом веке границы основных подразделений триаса традиционно основывались на смене вертикальной последовательности комплексов аммоноидей (Tozer, 1984). При этом пермо-триасовая граница проводилась по появлению рода *Otoceras*, наиболее древний вид которого (*Otoceras concavum* Tozer) встречен в основании грисбаха Арктической Канады (Tozer, 1994) и в основании некучанской свиты Южного Верхоянья (Dagys, Ermakova, 1996). В настоящее время ключевую роль в обосновании ярусных границ Международной хроностратиграфической шкалы в точках глобального стратотипа границы (GSSPs) триаса играют конодонты (Orchard,

2010). В 2001 г. Международный союз геологических наук (IUGS) утвердил нижнюю границу индского яруса триасовой системы в разрезе Мейшань Южного Китая по первому появлению (FAD – first appearance datum) конодонтов *Hindeodus parvus* (Kozur et Pjatakova) (Yin et al., 2001).

Несмотря на противоречивость данных о стратиграфических взаимоотношениях цератитов рода *Otoceras* с конодонтами *H. parvus* (Shevryev, 2006), существуют вполне убедительные основания считать, что FAD *H. parvus* расположен выше появления первых отоцерасов (Henderson, Vaud, 1997). Это свидетельствует о том, что с принятием GSSP индского яруса по FAD *H. parvus* (Yin et al., 2001) традиционная граница перми и триаса в Бореальной надобласти сместилась вверх по разрезу, а ряд событий, которые ранее считались раннетриасовыми, приобрел позднепермский возраст (Gradstein et al., 2020). Южное Верхоянье – один из немногих в мире регионов, где сохранились непрерывные последовательности морских песчано-глинистых отложений перми и триаса высоких широт. Сходные непрерывные разрезы известны в Арктической Канаде (Algeo et al., 2012), Восточной Гренландии (Bjerager et

al., 2006) и на Шпицбергене (Wignall et al., 1998; Uchman et al., 2016). Непрерывность отложений перми и триаса позволяет изучать геологические события, связанные с самым крупным массовым вымиранием, произошедшим на рубеже перми и триаса. Эти события можно условно разделить на три группы: события, предшествовавшие вымиранию; события, происходившие непосредственно во время вымирания, и события, происходившие уже после основной фазы вымирания и связанные с восстановлением разнообразия органического мира (Hofmann, 2016; Luo et al., 2020).

В типовом разрезе пермских и триасовых отложений Южного Верхоянья (бассейн р. Сеторым, Аллах-Юньская структурно-фациальная зона) граница перми и триаса проведена в 6.3 м выше подошвы некучанской свиты по крупному отрицательному excursion содержания $\delta^{13}C_{org}$ (Захаров и др., 2014).

Этот уровень примерно совпадает с границей между зонами *Otoceras concavum* и *Otoceras boreale*, что позволяет предположительно установить границу перми и триаса по первому появлению в разрезе вида *O. boreale* (Ядренкин и др., 2020).

Пограничные пермские и триасовые отложения Южного Верхоянья достаточно подробно охарактеризованы в лито- и биостратиграфическом отношении (Коростелев, 1972; Абрамов, 1974; Бяков и др., 2016, 2018). Изучение ихнофоссилий в этих отложениях началось лишь в последние годы (Мифтахутдинова, Кутыгин, 2021).

Данная работа основана на материале из разреза Тирях-Кобюме, изученного и детально описанного в 2019 г. (рис. 1) (Кутыгин и др., 2019; Мифтахутдинова, Кутыгин, 2021). Мы использовали методологический подход новейших исследований (Hofmann et al., 2011; Uchman et al., 2016), демонстрирующих эффективность изучения биогенных структур для реконструкции событий массовых вымираний.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

В разрезе Тирях-Кобюме Кобюминской структурно-фациальной зоны Южного Верхоянья пограничный пермо-триасовый интервал включает верхнюю часть привольнинской свиты и нижнюю часть некучанской свиты (Кутыгин и др.,



Рис. 1. Местоположение разреза Тирях-Кобюме: А – обзорная карта; Б – карта расположения изученного разреза; 1 – местоположение разреза Тирях-Кобюме, 2 – границы Верхоянского складчато-надвигового пояса

Fig. 1. Location of the Tiryakh-Kobyumeh section: А – overview map; Б – location of the studied section; 1 – Tiryakh-Kobyumeh section, 2 – Verkhoyansk fold-thrust belt boundaries

2019; Бяков, Кутыгин, 2021). Граница между пермской и триасовыми системами условно проведена в 2.5 м выше подошвы некучанской свиты на основании находки цератитов *Otoceras boreale* Spath (Кутыгин и др., 2019) (рис. 2).

Привольнинская свита представлена чередованием пачек (слоев) преимущественно мелкозернистых алевролитов (10–40 м, иногда до 70 м), содержащих в своей кровле пласты песчаников, мощность которых и размеры обломочного материала вверх по разрезу увеличиваются. Терминальная пачка привольнинской свиты (слой 33) характеризуется отчетливым трансгрессивно-регрессивным строением, характерным для терминальных частей перми и в других районах Верхоянья (Будников и др., 2003; Budnikov et al., 2020). Этот слой делится на три литологические части, переходы между которыми неотчетливые.

Нижняя, трансгрессивная часть слоя 33 (Бяков, Кутыгин, 2021) сложена монотонными алевролитами, плавно огрубляющимися вверх по разрезу. В наиболее тонкозернистых нижних 10 м слоя наблюдаются рассеянные окатанные обломки кварцитов (размером до 1–2 см, реже – до 3 см) и многочисленные тонкие (первые сантиметры) линзочки, заполненные раздробленными остатками призматического слоя иноцерамоподобных двустворок. В 6 м выше подошвы слоя 33 обнаружены остатки двустворок *Unionites*

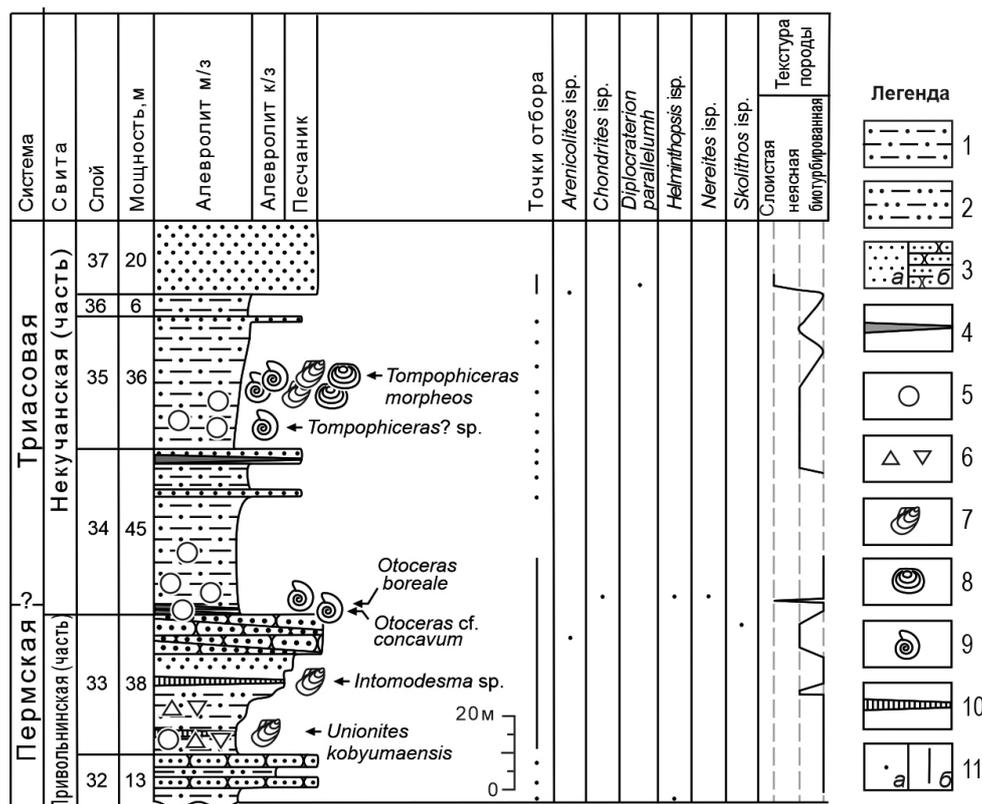


Рис. 2. Фрагмент разреза Тирях-Кобюме с указанием распределения ихнотаксонов и характера биотурбации. Легенда: 1 – алевролиты мелкозернистые; 2 – алевролиты крупнозернистые; 3 – песчаники: а – слоистые, б – массивные; 4 – туфы (вне масштаба); 5 – конкреции; 6 – диамиктиты; 7 – двустворки; 8 – конхостраки; 9 – аммоноидеи; 10 – скопления обломков призматического слоя двустворок (вне масштаба); 11 – отбор образцов: а – точечный, б – сплошной; м/з – мелкозернистый; к/з – крупнозернистый

Fig. 2. Fragment of the Tiryakh-Kobyumeh section with trace fossil taxa distribution and bioturbation character: 1 – fine-grained siltstones; 2 – coarse-grained siltstones; 3 – sandstones: a – laminated, б – massive; 4 – tuffs (off-scale); 5 – concretions; 6 – diamictites; 7 – bivalves; 8 – conchostracans; 9 – ammonoids; 10 – fragments of bivalve shell prismatic layer (off-scale); 11: a – spot sampling, б – dense sampling; м/з – fine-grained; к/з – coarse-grained

kobyumensis Biakov, *Nuculopsis* aff. *wymensis* (Keyserling), *Palaeoneilo?* vel *Palaeonucula?* sp. indet. и мелкие неопределимые гастроподы (Бяков, Кутыгин, 2021).

Средняя часть (8 м) слоя 33 сложена горизонтально-слоистыми крупнозернистыми алевролитами с прослоями (5–10, реже до 20 см) глинистых песчаников и мелкозернистых алевролитов. Для этой части разреза характерны наиболее мощные (до 10–15 см) слойки с обломками призматического слоя иноцерамоподобных двустворок. В одном из таких слойков, на уровне в 20 м выше подошвы слоя 33 была обнаружена гигантская раковина *Intomodesma* sp.

Доминирующую роль в строении верхней, регрессивной части (15 м) слоя 33 приобретают разнозернистые песчаники. Разрез этой части слоя начинается с пологоволнистого переслаивания разнозернистых алевролитов, алевропесчаников и глинистых биотурбированных песчаников, а завершается относительно мощными песчаниками. Нижняя половина этих песчаников имеет горизонтальную слоистость и знаки рьяи

на поверхностях напластования, а верхняя является наиболее грубозернистой и характеризуется массивной, иногда крупной косослоистой текстурой.

Некучанская свита на основании литологического состава разделяется на две части: нижнюю – глинисто-алевролитовую и верхнюю – песчанистую.

Нижняя часть некучанской свиты (слои 34–36 суммарной мощностью 87 м) сложена преимущественно мелкозернистыми алевролитами с многочисленными карбонатно-кремнистыми конкрециями, иногда содержащими остатки беспозвоночных. На уровне 1 м выше подошвы слоя 34 в конкрециях обнаружены аммоноидеи *Otoceras* aff. *gracile* Tozer и *Otoceras* cf. *concavum* Tozer, относимые к зоне *concavum* верхов чансинского яруса. На уровне 2.5 м выше подошвы некучанской свиты в горизонте уплощенных конкреций обнаружена крупная раковина *Otoceras boreale* Spath, по появлению которого мы предварительно проводим в разрезе границу перми и триаса.

Соответственно, часть разреза от 2.5 м выше подошвы слоя 34 до его кровли относится к зоне boreale. В слое 35 некучанской свиты (мощность 36 м) собраны аммоноидеи рода *Tomphiceras*, характеризующие зону morpheos. Здесь же обнаружены раннеиндские комплексы двусторчатых моллюсков (Бяков, Кутыгин, 2021) и конхострак. Слой 36 завершает алевролитовую часть разреза.

Выше залегают песчаники со слоями алевропесчаников и разнозернистых алевролитов. Эта преимущественно песчаная часть мощностью около 500 м перекрывается глинистыми алевролитами оленекского яруса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Коллекция пород, лежащая в основе статьи, насчитывает около 150 образцов. Практически все образцы содержат ихнофоссилии и/или имеют биотурбационную текстуру. Для изучения биогенных структур и текстур пород мы использовали методы ихнофацеального и ихнотекстурного анализов (Droser, Bottjer, 1986).

Основную часть коллекции составляют остатки образцов пород, изначально отобранных на геохимические и палеомагнитные исследования. Образцы были шлифованы нами вкрест напластования, что повлекло следующие особенности их изучения.

Пришлифовки содержат проекции ходов на поверхность поперечного сечения, перпендикулярного к плоскостям напластования. Изучение шлифовок позволяет определить ходы, отличающиеся по своему составу от вмещающей породы. Отличие таких ходов связано с заполнением внутреннего пространства хода переработанным материалом (обычно ходы заполнены более темным веществом) либо с драпировкой (укреплением) стенок.

Одновременно с изучением ихнофоссилий фиксировалось нарушение первичной слоистости осадка донными организмами – биотурбация, и определялась ее интенсивность (степень переработки осадка живыми организмами).

Породы изученного интервала разреза Тирях-Кобюме преимущественно окрашены в темные цвета, участками до темно-серого и даже черного цвета. Текстура темно-серых (черных) прослоев распознается плохо, что не позволяет делать однозначные выводы. Текстура таких прослоев указана на рис. 2 как «текстура неопределенная».

РЕЗУЛЬТАТЫ

Верхняя часть *привольнинской свиты* (слои 32, 33) представлена, как уже отмечалось, алевролитами и песчаниками.

Массивные песчаники, слагающие верхнюю часть свиты, почти не содержат биогенные структуры, при этом слоистость в них также не фиксируется, что, вероятно, свидетельствует о сильной биотурбации (рис. 3, В). Песчаники включают вертикальные, перпендикулярные напластованию норы *Arenicolites* Salter и *Skolithos* Haldeман (Мифтахутдинова, Кутыгин, 2021). Вертикальная архитектура ходов интерпретируется как жилища или убежища организмов-сестонофагов (Knaust, 2017).

Некучанская свита в изученном интервале (слои 34–37) подразделяется по литологическим особенностям на нижнюю и верхнюю части.

Нижняя часть (слои 34–36) сложена мелкозернистыми алевролитами. Нижние 15 м свиты (слой 34, нижняя часть) представлены чередованием тонких (менее 1 мм) прослоев светлого и темного алевролита. Этот интервал был опробован очень детально (см. рис. 2), что позволило зафиксировать чередование «пятнистых» алевролитов с полностью переработанной первичной текстурой (рис. 3, С) с тонкослоистыми алевролитами с пониженной послойной биотурбацией (рис. 3, D). Алевролиты с признаками послойной биотурбации отчасти сохранили горизонтальную слоистость, но в то же время характеризуются переработкой отдельных тонких слоев породы, включающих сечения ихнофоссилий, имеющих более темную окраску (рис. 3, D).

Разнообразие ихнофоссилий в нижних 15 м *некучанской свиты* невелико. Установлены представители двух ихнородов: *Helmintopsis* Heeg и *Nereites* MacLeay in Murchison, которые представляют собой горизонтальные меандрирующие структуры. Эти структуры интерпретируются как ходы червей, питавшихся рыхлым осадком, богатым органическим веществом (*Fodinichnia*) (Knaust, 2017). Присутствие *Helmintopsis* и *Nereites* указывает на обстановки, присущие переходу склоновой части к глубокому шельфу бассейна; такие обстановки относят к зоофикосовой ихнофафии (Knaust, 2017).

Верхняя часть слоя 34 не опробована. Породы нижних 20 м слоя 35 некучанской свиты характеризуются отсутствием биогенных структур. Слоистость и биотурбация отчетливо не фиксируются.

Верхняя часть некучанской свиты (слой 37) сложена мелкозернистыми песчаниками, прослоями, полностью биотурбированными. Перемешивание осадка в процессе литификации хорошо фиксируется в песчаниках, сложенных разными по окраске минеральными зернами.

Ихнофоссилии представлены только вертикальными U-образными ходами рытья *Diplocraterion parallelum* Torell и *Arenicolites* Salter. Вертикальные, глубоко уходящие в осадок ходы от-

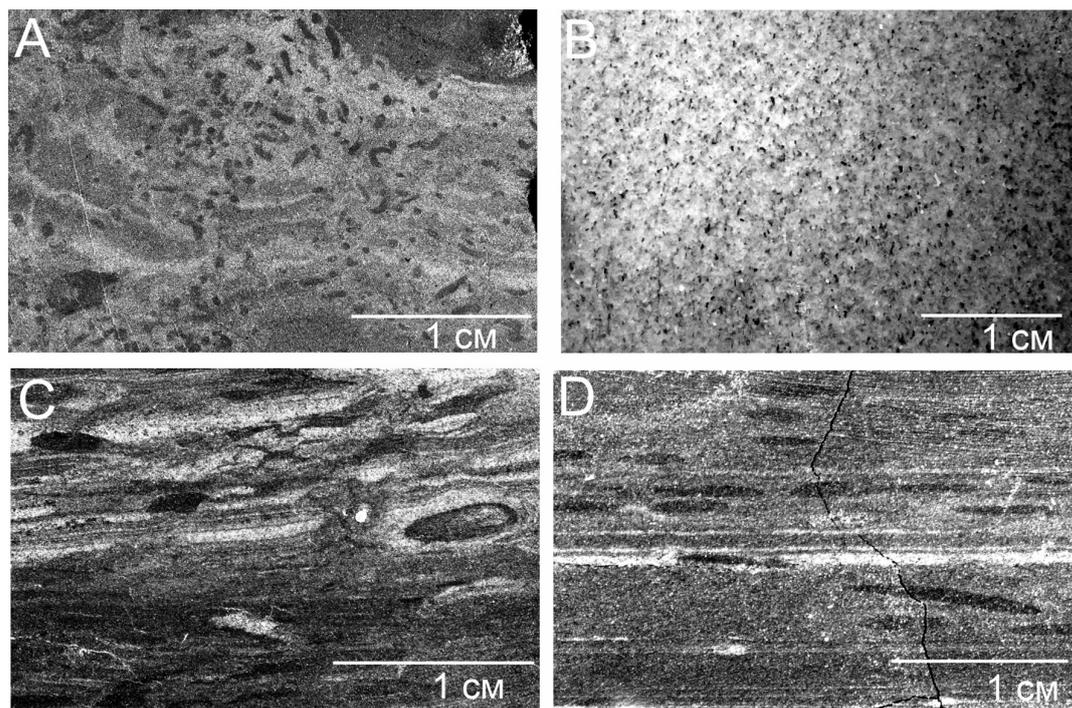


Рис. 3. Биотурбационная текстура пород приграничного интервала разреза Тирях-Кобюме: А – поперечное сечение алевролита с более темными ходами округлого или изогнутого сечения, обр. ГХ 347, привольнинская свита, слой 33 (средняя часть); В – полное отсутствие слоистости в песчанике – массивная текстура, обр. ГХ 378, привольнинская свита, слой 34 (верхняя часть); С – биотурбированный алевролит с сечениями ходов, обр. ГХ 351, некучанская свита, слой 34; D – алевролит с латеральной биотурбацией, обр. ГХ 336, некучанская свита, слой 34

Fig. 3. Textures of bioturbated rocks from the PT boundary interval of the Tiryakh-Kobyumeh section: A – cross-section of siltstone with rounded or curved tubes with darker filling, Sample GH 347, Privolny Fm, Bed 33 (medium part); B – complete absence of stratification in sandstone – massive texture, Sample GH 378, Privolny Fm, Bed 33 (upper part); C – bioturbated siltstone with tube cross-sections, Sample GH 351, Nekuchan Fm, Bed 34; D – siltstone with lateral bioturbation, Sample GH 336, Nekuchan Fm, Bed 34

носят к постройкам организмов, обитавших в условиях высокой гидродинамической энергии с нормальным содержанием кислорода (Knaust, 2017).

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают вывод, что отложения рубежа перми и триаса в Кобюминской части Верхоянского бассейна формировались в условиях колебания глубины бассейна и миграции береговой линии (Будников и др., 2003).

Алевролитовые породы привольнинской свиты обладают пятнистой текстурой. Породы сильно биотурбированы и включают ходы с активным заполнением. Это означает, что осадок был заселен многочисленными животными. Плотное заселение осадка при маленьком ихноразнообразии свидетельствует о пониженном содержании кислорода (Luo et al., 2020).

Массивная текстура песчаников, слагающих терминальную часть привольнинской свиты, камуфлирует биогенные текстурные признаки. Их-

нотаксоны *Arenicolites* и *Skolithos* и массивная структура песчаников, возможно, указывают на обстановки прибрежные, мелководные, что связано с обширной регрессией Верхоянского бассейна в конце хальпирского времени (Budnikov et al., 2020).

Формирование алевролитовой части некучанской свиты связано, вероятно, с углублением бассейна и спокойными условиями шельфа, в который не поступал грубый терригенный материал. Породы биотурбированы, но разнообразие ихнофоссилий невелико. Характер биотурбации этого интервала, где переработаны отдельные тонкие прослои породы и слоистость сохранена, является возможным свидетельством неблагоприятных условий среды обитания, для которых характерны неглубокая переработка зарывающейся фауной рыхлого осадка и отсутствие смешанного пласта – густо заселенного и сильно биотурбированного слоя (Hofmann et al., 2015).

Отсутствие в нижней части слоя 35 некучанской свиты ихнофоссилий и признаков биотурбации может быть связано с плохим сохранени-

ем этих структур в мелкозернистых алевролитах. В то же время причиной могут быть неблагоприятные условия, возникшие после позднепермского массового вымирания (Droser, Bottjer, 1986; Hofmann, 2016; Luo et al., 2020).

Верхняя песчаная часть некучанской свиты сильно биотурбирована. Это может указывать на довольно быстрое восстановление органического мира после вымирания. Вертикальные ходы *Diplocraterion* и *Arenicolites* характерны для сколитовой ихнофаии, развивающейся в мелководных прибрежных условиях (Knaust, 2017), что также указывает на постепенное восстановление нормальных условий в регионе в начале триасового периода.

ВЫВОДЫ

Пограничные отложения перми и триаса в разрезе Тирях-Кобюме содержат многочисленные следы жизнедеятельности организмов. Практически во всех слоях фиксируется биотурбационная текстура пород.

Ихнологический анализ свидетельствует о том, что породы формировались в условиях зоофикосовой и сколитовой ихнофаии, сменяющих друг друга при изменении глубины бассейна.

Ихнотаксоны зоофикосовой ихнофаии относятся к следам питания организмов-илоедов (*Fodinichnia*), такие организмы могли существовать в неблагоприятных условиях и относятся к интервалу, соответствующему событию позднепермского массового вымирания. Биотурбация таких интервалов носит послонный характер – тонкие прослои переработаны организмами, некоторые полностью сохраняют тонкую слоистость, ярусность в биотурбации не фиксируется.

Ихнотаксоны сколитовой ихнофаии относятся к *Domichnia* – постоянным жильным норкам (преимущественно вертикальным). Организмы, строившие такие норки, обитали в обстановках с активной гидродинамикой и высоким содержанием кислорода. Сколитовая ихнофаия приурочена к песчаникам привольнинской и некучанской свит.

Последовательность изменений ихнофаии в изученном разрезе хорошо согласуется с цикличностью пермских отложений Верхоянья, установленной на основе седиментологических и биофаиальных данных (Будников и др., 2003). Это свидетельствует о целесообразности продолжения изучения биогенных структур в разрезах Южного Верхоянья.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изучение биогенных структур выполнено благодаря субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету по государственному

заданию #671–2020–0049 в сфере научной деятельности. Описание разреза проводилось по госзаданию ИГАБМ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Абрамов Б. С. Стратиграфия верхнепалеозойских отложений Южного Верхоянья. Новосибирск : Наука, 1974. 88 с.

Будников И. В., Гриненко В. С., Клец А. Г., Кутыгин Р. В., Сивчиков В. Е. Модель формирования верхнепалеозойских отложений востока Сибирской платформы и ее складчатого обрамления (закономерности осадконакопления, районирование, корреляция) // Отечественная геология. 2003. № 6. С. 86–92.

Бяков А. С., Кутыгин Р. В. Первые находки двустворчатых моллюсков рода *Unionites* Wissmann в боральной перми северо-востока России // Палеонтологический журнал. 2021. № 4. С. 18–23. DOI: 10.31857/S0031031X2104005X

Бяков А. С., Захаров Ю. Д., Хорачек М., Рихоц С., Кутыгин Р. В., Иванов Ю. Ю., Колесов Е. В., Константинов А. Г., Тучкова М. И., Михалицына Т. И. Новые данные о строении и возрасте терминальной перми Южного Верхоянья (северо-восток Азии) // Геология и геофизика. 2006. Т. 57, № 2. С. 353–367. DOI: 10.15372/GiG20160205

Бяков А. С., Кутыгин Р. В., Горячев Н. А., Бурнатный С. С., Наумов А. Н., Ядренкин А. В., Ведерников И. Л., Третьяков М. Ф., Брынько И. В. Открытие позднечансинского комплекса двустворчатых моллюсков и два эпизода вымирания фауны в конце перми на северо-востоке Азии // Доклады Академии наук. 2018. Т. 480, № 1. С. 121–124. DOI: 10.7868/S086956521813025X

Захаров Ю. Д., Бяков А. С., Хорачек М. Глобальная корреляция базальных слоев триаса в свете первых изотопно-углеродных свидетельств по границе перми и триаса на Северо-Востоке Азии // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33, № 1. С. 3–19.

Корстелев В. И. Триасовые отложения Восточного Верхоянья. Якутск : Кн. изд-во, 1972. 174 с.

Кутыгин Р. В., Будников И. В., Бяков А. С., Давыдов В. И., Килясов А. Н., Силантьев В. В. Первые находки цератитов рода *Otoceras* в Кобюминской зоне Южного Верхоянья, северо-восток России // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2019. Т. 161, № 4. С. 550–570. DOI: 10.26907/2542-064X.2019.4.550–570

Мифтахутдинова Д. Н., Кутыгин Р. В. Ихнофоссилии пермо-триасовых отложений Южного Верхоянья (разрез Тирях-Кобюме, Республика Саха (Якутия)) // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2021. Т. 163, № 3. С. 351–370. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.3.351-370

Ядренкин А. В., Бяков А. С., Кутыгин Р. В., Копылова А. В. Новые находки и стратиграфическое распределение фораминифер в пограничных пермско-триасовых отложениях Южного Верхоянья // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39, № 5. С. 69–82. DOI: 10.30911/0207-4028-2020-39-5-69-82

Algeo T., Henderson C. M., Ellwood B., Rowe H., Elswick E., Bates S., Lyons T., Hower J. C., Smith C., Maynard B., Hays L. E., Summons R. E., Fulton J., Freeman K. H. Evidence for a diachronous Late Permian marine crisis from the Canadian Arctic region // *Bulletin of the Geological Society of America*. 2012. 124 (9–10), 1424–1448. DOI:10.1130/B30505.1

Bjerager M., Seidler L., Stemmerik L., Surlyk F. Ammonoid stratigraphy and sedimentary evolution across the Permian–Triassic boundary in East Greenland // *Geological Magazine*. 2006. 143 (5), 635–656. DOI: 10.1017/S0016756806002020

Budnikov I. V., Kutugin R. V., Shi G. R., Sivtchikov V. E., Krivenko O. V. Permian stratigraphy and paleogeography of Central Siberia (Angaraland) – A review // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. 196 (104365), 1–21. DOI: 10.1016/j.jseas2020104365

Dagys A., Ermakova S. Induan (Triassic) Ammonoids from North-Eastern Asia // *Revue de Paléobiologie*. 1996. 15 (2), 401–447.

Droser M. D., Bottjer D. J. A semiquantitative field classification of ichnofabric // *Journal of Sedimentary Petrology*. 1986. 56, 556–559. DOI:10.1306/212F89C2-2B24-11D7-8648000102C1865D

Gradstein F. M., Ogg J. G., Schmitz M. D., Ogg G. M. *Geologic Time Scale*. Elsevier, 2020.

Henderson C. M., Baud A. Correlation of the Permian–Triassic boundary in Arctic Canada and comparison with Meishan, China // *Proceedings of the 30th International Geological Congress*. 1997. 11, 143–152.

Hofmann R. The end-Permian mass extinction // *The Trace-Fossil Record of Major Evolutionary Events*. Vol. 1. Precambrian and Paleozoic. Dordrecht, Springer, 2016. 325–349. DOI: 10.1007/978-94-017-9600-2

Hofmann R., Buatois L., MacNaughton R., Mangano M. Loss of the sedimentary mixed layer as a result of the end-Permian extinction // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2015. 428, 1–11. DOI: 10.5167/uzh-110343

Hofmann R., Goudemand N., Wasmer M., Bucher H., Hautmann M. New trace fossil evidence for an early recovery signal in the aftermath of the end-Permian mass extinction // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2011. 310 (3–4), 216–226. DOI:10.1016/j.palaeo201107014

Knaust D. *Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation*. Springer, Switzerland, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-49837-9

Luo M., Shi G., Buatois L. A., Chen Z. Q. Trace fossils as proxy for biotic recovery after the end-Permian mass extinction: A critical review // *Earth-Science Reviews*. 2020. 203 (103059). DOI: 10.1016/j.earscirev2019103059

Miller M. F., Collinson J. W. Trace fossils from Permian and Triassic sandy braided stream deposits, Central Transantarctic Mountains // *Palaios*. 1994. 9 (6), 605–610. DOI: 10.2307/3515131

Orchard M. J. Triassic conodonts and their role in stage boundary definition // *The Triassic Timescale*. Geological Society London Special Publications, 2010. 334, 139–161. DOI: 10.1144/SP334.7

Shevyrev A. A. Triassic biochronology: State of the art and main problems // *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2006. 14 (6), 629–641. DOI: 10.1134/S0869593806060037

Tozer E. T. The Trias and its ammonoids: The evolution of a time scale // *Miscellaneous Report 35*, Geological Survey of Canada. 1984. 171 p.

Tozer E. T. Canadian Triassic ammonoid faunas // *Geological Survey of Canada Bulletin*. 1994. 467 p.

Uchman A., Hanken N. M., Nielsen J. K., Grundvåg S. A., Piasecki S. Depositional environment, ichnological features and oxygenation of Permian to earliest Triassic marine sediments in central Spitsbergen, Svalbard // *Polar Research*. 2016. 35, 1–21. DOI: 10.3402/polarv3524782

Wignall P. B., Morante R., Newton R. The Permian–Triassic transition in Spitsbergen: $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ chemostratigraphy, Fe and S geochemistry, facies, fauna and trace fossils // *Geological Magazine*. 1998. 135 (1), 47–62. DOI: 10.1017/S0016756897008121

Yin H., Zhang K., Tong J., Yang Z., Wu S. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Permian–Triassic boundary // *Episodes*. 2001. 24 (2), 102–114. DOI: 10.18814/epiiugs/2001/v24i2/004

Поступила в редакцию 22.04.2022 г.

Поступила после доработки 15.06.2022 г.

BIOGENIC STRUCTURES OF THE PERMIAN–TRIASSIC BOUNDARY IN SOUTHERN VERKHOYANYE, REPUBLIC OF SAKHA (Yakutia), RUSSIA

D. N. Miftakhutdinova¹, R. V. Kutugin²

¹ Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan

² Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk

The article describes biogenic structures (trace fossils and bioturbation) of clastic rocks within the Permian–Triassic boundary interval in the Tiryakh-Kobyumeh section (Southern Verkhoyanye). The section is built by interbedding marine sandstones and siltstones, and is associated with the Late Permian mass extinction event. Most of the strata contain a variety of biogenic structures. Different taxonomic compositions of trace fossils and high bioturbation of Permian rocks indicate dense habitation of the basin bottom. In the Lower Triassic deposits, diversity of trace fossils sharply

decreases as well as the degree of bioturbation. In the lower part of the Nekuchan suite's Triassic deposits, an interval of horizontally stratified rocks without bioturbation interbedded with rocks bioturbated by stratum has been identified. The interval is overlaid with highly bioturbated deposits, which indicates a rapid recovery of biodiversity after the Permian mass extinction.

Keywords: Permian–Triassic boundary, Changhsingian, Induan, biogenic structures, trace fossils, bioturbation, Verkhoyanye.

REFERENCES

- Abramov, B. S., 1974. Stratigraphy of the Upper Paleozoic Sediments in the Southern Verkhoyanye. Novosibirsk, Nauka [In Russian].
- Algeo, T., Henderson, C. M., Ellwood, B., Rowe H., Elswick, E., Bates, S., Lyons, T., Hower, J. C., Smith, C., Maynard, B., Hays, L. E., Summons, R. E., Fulton, J., Freeman, K. H., 2012. Evidence for a Diachronous Late Permian Marine Crisis from the Canadian Arctic Region, *Bulletin of the Geological Society of America*. 124 (9–10), 1424–1448. DOI: 10.1130/B30505.1
- Biakov, A. S., Kutygin, R. V., 2021. First Record of the Genus *Unionites* Wissmann (Bivalvia) in the Boreal Permian of Northeast Russia, *Paleontological Journal*. 55 (4), 372–377. DOI: 10.1134/S0031030121040055 [In Russian].
- Biakov, A. S., Kutygin, R. V., Goryachev, N. A., Burnatny, S. S., Naumov, A. N., Yadrenkin, A. V., Vedernikov, I. L., Tretyakov, M. F., Brynko, I. V., 2018. Discovery of the Late Changhsingian Bivalve Complex and Two Fauna Extinction Episodes in Northeast Asia at the End of the Permian, *Doklady Biological Sciences*. 480 (1), 78–81. DOI: 10.1134/S0012496618030018 [In Russian].
- Biakov, A. S., Zakharov, Yu. D., Horacek, M., Richoz, S., Kutygin, R. V., Ivanov, Yu. Yu., Kolesov, E. V., Konstantinov, A. G., Tuchkova, M. I., Mikhalitsyna, T. I., 2016. New Data on the Structure and the Age of the Terminal Permian Strata in the Southern Verkhoyanye (Northeast Asia), *Russian Geology and Geophysics*. 57 (2), 282–293. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.02.005 [In Russian].
- Bjerager, M., Seidler, L., Stemmerik, L., Surlyk, F., 2006. Ammonoid Stratigraphy and Sedimentary Evolution across the Permian–Triassic Boundary in East Greenland, *Geological Magazine*. 143 (5), 635–656. DOI: 10.1017/S0016756806002020
- Budnikov, I. V., Grinenko, V. S., Klets, A. G., Kutygin, R. V., Sivtchikov, V. E., 2003. Formation Model for the Upper Paleozoic Deposits in the East of the Siberian Platform and Its Folded Framing: Sedimentation Patterns, Zoning, Correlation, *Otechestvennaya Geologiya*. 6, 86–92 [In Russian].
- Budnikov, I. V., Kutygin, R. V., Shi, G. R., Sivtchikov, V. E., Krivenko, O. V., 2020. Permian Stratigraphy and Paleogeography of Central Siberia (Angaraland) – A Review, *Journal of Asian Earth Sciences*. 196 (104365), 1–21. DOI: 10.1016/j.jseaes.2020.104365
- Dagys, A., Ermakova, S., 1996. Induan (Triassic) Ammonoids from North-Eastern Asia, *Revue de Paléobiologie*. 15 (2), 401–447.
- Droser, M. D., Bottjer, D. J., 1986. A Semiquantitative Field Classification of Ichnofabric, *Journal of Sedimentary Petrology*. 56, 556–559. DOI: 10.1306/212F89C2-2B24-11D7-8648000102C1865D
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D., Ogg, G. M., 2020. *Geologic Time Scale*. Elsevier.
- Henderson, C. M., Baud, A., 1997. Correlation of the Permian–Triassic Boundary in Arctic Canada and Comparison with Meishan, China, *Proceedings of the 30th International Geological Congress*. 11, 143–152.
- Hofmann, R., 2016. The End-Permian Mass Extinction, *The Trace-Fossil Record of Major Evolutionary Events: Volume 1: Precambrian and Paleozoic*. Dordrecht, Springer. 325–349. DOI: 10.1007/978-94-017-9600-2
- Hofmann, R., Buatois, L., MacNaughton, R., Mangano, M., 2015. Loss of the Sedimentary Mixed Layer as a Result of the End-Permian Extinction, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 428, 1–11. DOI: 10.5167/uzh-110343
- Hofmann, R., Goudemand, N., Wasmer, M., Bucher, H., Hautmann, M., 2011. New Trace Fossil Evidence for an Early Recovery Signal in the Aftermath of the End-Permian Mass Extinction, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 310 (3–4), 216–226. DOI: 10.1016/j.palaeo.2011.07.014
- Knaust, D., 2017. *Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation*. Springer, Switzerland. DOI: 10.1007/978-3-319-49837-9
- Korostelyov, V. I., 1972. Triassic Deposits in the Eastern Verkhoyanye. Yakutsk [In Russian].
- Kutygin, R. V., Budnikov, I. V., Biakov, A. S., Davydov, V. I., Kilyasov, A. N., Silantyev, V. V., 2019. First Findings of *Otoceras* (Ceratitida) in the Kobyumeh Zone of Southern Verkhoyanye, North-East of Russia, *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*. 161 (4), 550–570. DOI: 10.26907/2542-064X.2019.4.550-570 [In Russian].
- Luo, M., Shi, G., Buatois, L. A., Chen, Z. Q., 2020. Trace Fossils as Proxy for Biotic Recovery after the End-Permian Mass Extinction: A Critical Review, *Earth-Science Reviews*. 203 (103059). DOI:10.1016/j.earscirev.2019.103059
- Miftakhutdinova, D. N., Kutygin, R. V., 2021. Trace Fossils of the Permian–Triassic Sediments in Southern Verkhoyanye (Tiryakh-Kobyumeh Section, Republic of Sakha (Yakutia), Russia), *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*. 163 (3), 351–370. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.3.351-370 [In Russian].
- Miller, M. F., Collinson, J. W., 1994. Trace Fossils from Permian and Triassic Sandy Braided Stream Deposits, Central Transantarctic Mountains, *Palaios*. 9 (6), 605–610. DOI: 10.2307/3515131
- Orchard, M. J., 2010. Triassic Conodonts and Their Role in Stage Boundary Definition, *The Triassic Times*.

- cale. Geological Society London Special Publications, 334, 139–161. DOI: 10.1144/SP334.7
- Shevyrev, A. A., 2006. Triassic Biochronology: State of the Art and Main Problems, *Stratigraphy and Geological Correlation*. 14 (6), 629–641. DOI: 10.1134/S0869593806060037
- Tozer, E. T., 1984. The Trias and Its Ammonoids: The Evolution of a Time Scale. Miscellaneous Report 35, Geological Survey of Canada.
- Tozer, E. T., 1994. Canadian Triassic Ammonoid Faunas. Geological Survey of Canada Bulletin.
- Uchman, A., Hanken, N. M., Nielsen, J. K., Grundvåg, S. A., Piasecki, S., 2016. Depositional Environment, Ichthyological Features and Oxygenation of Permian to Earliest Triassic Marine Sediments in Central Spitsbergen, Svalbard, *Polar Research*. 35, 1–21. DOI: 103402/polarv3524782
- Wignall, P. B., Morante, R., Newton, R., 1998. The Permo-Triassic Transition in Spitsbergen: $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ Chemostratigraphy, Fe and S Geochemistry, Facies, Fauna and Trace Fossils, *Geological Magazine*. 135 (1), 47–62. DOI:101017/S0016756897008121
- Yadrenkin, A. V., Biakov, A. S., Kutygin, R. V., Kopylova, A. V., 2020. New Findings and Stratigraphic Distribution of Foraminifera in Permian–Triassic Boundary Deposits of Southern Verkhoyanye, *Russian Journal of Pacific Geology*. 14 (5), 447–459. DOI: 10.1134/S1819714020050097 [In Russian].
- Yin, H., Zhang, K., Tong, J., Yang, Z., Wu, S., 2001. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Permian–Triassic Boundary, *Episodes*. 24 (2), 102–114. DOI: 10.18814/epiiugs/2001/v24i2/004
- Zakharov, Yu. D., Biakov, A. S., Horacek, M., 2014. Global Correlation of Basal Triassic Layers in the Light of the First Carbon Isotope Data on the Permian–Triassic Boundary in Northeast Asia, *Russian Journal of Pacific Geology*. 8 (1), 1–17. DOI: 10.1134/S1819714014010060 [In Russian].