

РАЗДЕЛ 4.
ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.8:56.017.4

**ФАНЕРОЗОЙСКИЕ БИОТИЧЕСКИЕ КРИЗИСЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ
ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА**

Рубан Д. А.

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация
E-mail: ruban-d@mail.ru*

Биотические кризисы многократно случались в фанерозойской истории Земли, однако их природа до сих пор остается предметом дискуссий. Настоящая работа нацелена на изучение возможной связи этих событий со сменой долгосрочных трендов температурных флуктуаций. В качестве материала используются наиболее свежая информация о времени проявления 19 биотических кризисов, а также новые температурные кривые для фанерозоя. Методически работа основана на интерпретации долгосрочных трендов температурных флуктуаций и сопоставлении их смены с биотическими кризисами. По результатам выполненного анализа установлено, что многие биотические кризисы (до двух третей от их общего количества) ассоциировались со сменами долгосрочных трендов, равно как и многие из последних (не менее половины) сопровождалась биотическими кризисами. Определенность таких интерпретаций в значительной степени зависит от выбора температурной кривой и меньше — от выбора шкалы геологического времени (относительной или абсолютной). Выдвинута гипотеза о наличии некоторого механизма, связывающего фанерозойские биотические кризисы со сменой долгосрочных трендов изменений температурного режима. Последующая верификация этой гипотезы может выявить причинно-следственную связь между рассматриваемыми феноменами. При этом смена долгосрочных трендов температурных флуктуаций скорее не вызвала биотические кризисы, а повышала вероятность их развития за счет палеоэкологического стресса.

Ключевые слова: биота, глобальная палеогеография, изменения температур, кайнозой, массовые вымирания, мезозой, палеозой, палеоклиматические тренды, событийный анализ, стратиграфия.

ВВЕДЕНИЕ

Биотические кризисы, неоднократно имевшие место в фанерозойской истории Земли, представляют значительный интерес для современных исследователей. Они отражают реализацию в той или иной мере катастрофических сценариев развития как жизни, так и геологической среды нашей планеты. Крупные из них известны как массовые вымирания, наиболее изученные из которых имели место на рубежах перми/триаса [1, 2, 3] и мела/палеогена [4, 5, 6]. Биотическим кризисам посвящено огромное количество научных работ как зарубежных [7, 8, 9], так и отечественных специалистов [10, 11]. При этом до сих пор нет однозначного понимания ни их точного количества, ни причин. Первое могло измеряться первыми десятками (при этом открытия новых событий такого рода продолжают [12, 13, 14]), а вторые предполагают такие явления как астероидный удар, изменения климата, колебания уровня моря, океаническая аноксия, трапповый вулканизм и т.п. [10, 11, 15, 16]. В целом, современная наука заключает, что биотические кризисы случались в фанерозойской истории сравнительно часто, а причины их различались и при этом

ФАНЕРОЗОЙСКИЕ БИОТИЧЕСКИЕ КРИЗИСЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

зачастую носили комплексный характер (соответствующая проблематика постоянно дебатруется и расширяется).

Глобальные изменения климата входят в число традиционно обсуждаемых причин биотических кризисов [17]. Например, похолодания оказывали резко негативное влияние на палеозойские рифовые экосистемы [18], что способствовало общему снижению биоразнообразия, а амплитуда температурных изменений сама по себе могла выступать фактором массовых вымираний [19]. Связь биотических кризисов и изменений климата могла носить и опосредованный характер. Стоит признать, что попытки прослеживания прямой или косвенной связи путем непосредственного сопоставления кривых отдельных климатических параметров со временем проявления биотических кризисов хотя и полезны, но носят односторонний характер и отражают частично устаревший подход. Однако это не означает, что такие исследования должны быть оставлены вовсе.

Целью настоящей работы является рассмотрение параллелизации (возможного совпадения) фанерозойских биотических кризисов с температурной составляющей долгосрочных изменений климата. Имеются два серьезных основания для проведения подобного рода анализа. Во-первых, современные исследования показывают, что биотические кризисы могли быть определенным образом связаны не только с самими изменениями параметров окружающей среды, но и со сменой их долгосрочных трендов [20, 21]. Во-вторых, в недавнее время были предложены новые температурные кривые для фанерозоя [22, 23], что означает необходимость пересмотра ранее предпринимавшихся сопоставлений. Данная работа представляет своего рода мета-анализ, т.е. получение новых результатов и их оригинальную интерпретацию путем обработки ранее опубликованной информации. Блоки последней не просто обобщаются и сопоставляются, но именно анализируются.

МЕТОДИКА ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ КАРСТОВОГО РЕЛЬЕФА СРЕДСТВАМИ ГИС НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОЙ ГРУППЫ ЯЙЛ КРЫМСКИХ ГОР

В целях настоящего исследования использованы два вида информации. Во-первых, это сведения о фанерозойских биотических кризисах и их проявлении в геологическом времени. Число этих катастроф может оцениваться по-разному. Критический анализ литературы показывает, что в качестве таковых могут пониматься, как минимум, 19 событий: среднекембрийское (1), позднеордовикское (2), раннесилурское (3), живетское (4), фран/фаменское (5), девон/карбоновое (6), серпуховское (7), гваделупское (8), пермь/триасовое (9), ладинское (10), карнийское (11), триас/юрское (12), тоарское (13), ааленское (14), юра/меловое (15), сеноман/туронское (16), мел/палеогеновое (17), палеоцен/эоценовое (18), эоцен/олигоценное (19) [24]. Во-вторых, необходимо обратиться к новым фанерозойским температурным кривым [22, 23]. Изменения климата – довольно широкое понятие, которое подразумевает совокупность различных феноменов. Данная работа фокусируется конкретно на среднемировых температурах (термин используется согласно [22]) и средних для низких широт температурах (в понимании

[23]). Стоит отметить, что два вышеуказанных вида информации имеют довольно сходное временное разрешение, а потому могут сопоставляться напрямую.

Используемые кривые отражают флуктуации температур, которые могут быть определены как элементарные. Их элементарность объясняется тем, что они прослежены первично и с максимально возможным временным разрешением. Однако анализ этих кривых позволяет также установить тенденции, объединяющие однородные серии таких флуктуаций и, следовательно, отражающие более или менее четкую, линейную закономерность изменений температур (рис. 1). Эти тренды могут быть условно названы долгосрочными, при этом их долгосрочность относительна элементарных флуктуаций. Представляется, что и элементарные флуктуации, и смена долгосрочных трендов могут иметь отношение к биотическим кризисам, при этом двойное (рис. 1). Во-первых, они способны оказать прямое воздействие, став причиной (и даже первопричиной в понимании [10]) таких катастроф. Во-вторых, их влияние может быть косвенным, когда они создают более благоприятные условия для реализации кризисов, вызванных другими причинами [20, 21]. Интерес к сменам долгосрочных трендов объясняется тем, что они маркируют наиболее важные изменения температурного режима, предполагающие другую направленность развития окружающей среды. Они не могли не влиять на экосистемы и биоту в целом. Как минимум, организмы оказывались в стрессовых условиях, будучи вынуждены изменяться в соответствии с новыми тенденциями (подробнее эти механизмы охарактеризованы в [20, 21]).

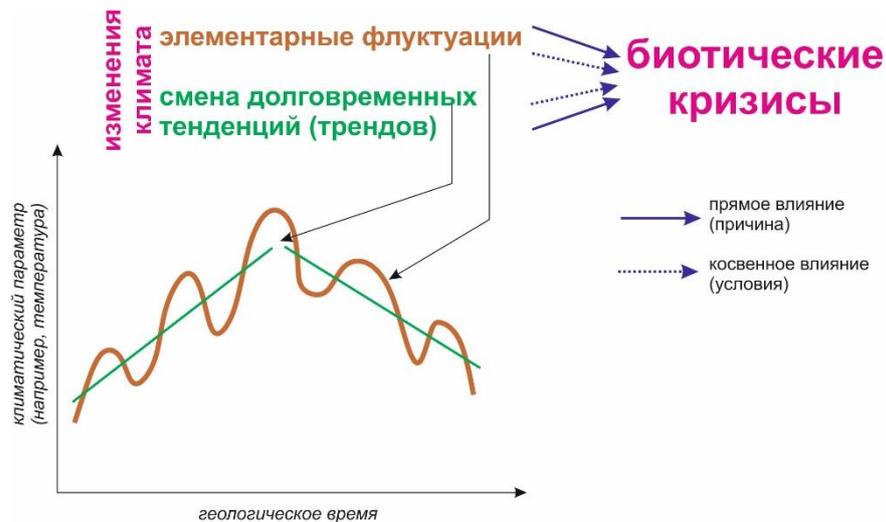


Рис. 1. Возможные соотношения изменений климата и биотических кризисов.

Аналитическая составляющая настоящей работы, предопределяющая ее новизну, заключается в следующем. Прежде всего, фанерозойские температурные кривые [22] интерпретируются с целью выявления долгосрочных трендов. Последние фиксируются таким образом, чтобы отразить однородные серии элементарных

ФАНЕРОЗОЙСКИЕ БИОТИЧЕСКИЕ КРИЗИСЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

флуктуаций. В большинстве случаев это не представляет проблемы, однако на некоторых интервалах четких тенденций не прослеживается. Данная процедура предполагает качественно-визуальную интерпретацию исходной кривой, которая обосновывалась и пояснялась ранее (в том числе в контексте событийного анализа) [20, 21, 24]. Использование специальных статистических методов в этих целях имеет ограниченную пригодность, т.к. они не могут полностью учесть особенностей геологической информации. Крупнейшие аномальные отклонения температур, которые явно не входят в состав серий, понимаются как самостоятельные события, нарушающие тренды. Установление трендов позволяет зафиксировать время их смены (безусловно, она занимала несколько миллионов лет). При этом она могла быть качественно разной. Например, в одних случаях тенденция к потеплению сменялась тенденцией к похолоданию, в других — тенденция к похолоданию усиливалась. Смены долгосрочных трендов могут сопоставляться непосредственно со временем проявления биотических кризисов.

Геологическое время выражается в относительных и абсолютных единицах. Очевидно, что привязка анализируемой кривой к разным временным шкалам может привести к различиям в выделении долгосрочных трендов. При этом предпочтение не должно отдаваться абсолютным шкалам, т.к. относительные единицы геологического времени, во-первых, в некоторой мере соответствуют естественным этапам истории Земли, а, во-вторых, существует изменчивость абсолютных датировок ключевых геологических рубежей (например, [25]). В этой связи настоящий анализ привязан как к относительной шкале геологического времени, где за единицу принят век, так и к абсолютной шкале, где единицы выражены в миллионах лет. С учетом наличия двух альтернативных температурных кривых [22, 23] получаем четыре варианта соотношений биотических кризисов и долгосрочных изменений климата. Безусловно, это варианты должны сравниваться и рассматриваться в совокупности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ температурной кривой [22] при использовании относительной шкалы геологического времени (рис. 2) показывает, что 14 биотических кризисов (1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 — объяснение номеров событий см. выше) ассоциировались непосредственно со сменой долгосрочных трендов температур или располагались на начальных или конечных интервалах этих трендов. Это относится, в частности, к позднеордовикскому, фран/фаменскому, пермь/триасовому, юра-меловому и мел/палеогеновому массовым вымираниям, из которых первые четыре имели место при смене направления трендов. Также более двух третей смен долгосрочных трендов параллелизовались с биотическими кризисами.

Анализ температурной кривой [22] при использовании абсолютной шкалы геологического времени (рис. 3) показывает, что 12 биотических кризисов (1, 2, 5, 6, 7, 9, 10, 15, 16, 17, 18, 19 — объяснение номеров событий см. выше) ассоциировались непосредственно со сменой долгосрочных трендов температур или располагались на начальных или конечных интервалах этих трендов. Это относится, в частности, к пяти вышеуказанным массовым вымираниям, из которых, как и в предыдущем

случае, первые четыре имели место при смене направления трендов. Также более трех четвертей смен долгосрочных трендов параллелизовались с биотическими кризисами.

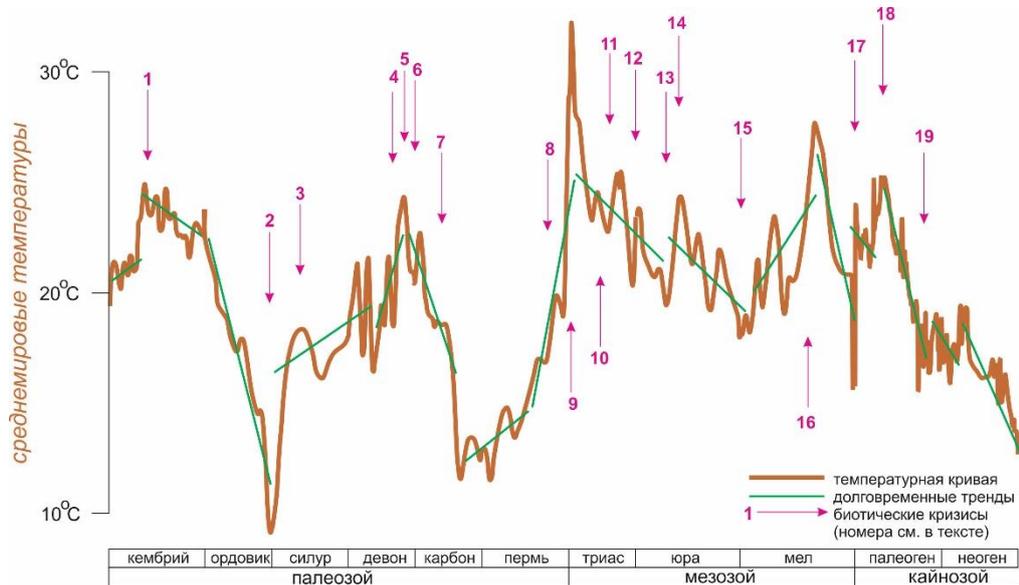


Рис. 2. Ординарные флуктуации (по данным [22]) и интерпретированные долгосрочные тренды изменений температур в фанерозое и биотические кризисы (на основании [24]) при использовании относительной шкалы геологического времени (данная схема не предназначена для сопоставления кризисов и элементарных температурных флуктуаций).

Анализ температурной кривой [23] при использовании относительной шкалы геологического времени (рис. 4) показывает, что 8 биотических кризисов (2, 3, 5, 6, 7, 9, 15, 17 — объяснение событий номеров см. выше) ассоциировались непосредственно со сменой долгосрочных трендов температур или располагались на начальных или конечных интервалах этих трендов. Это относится к вышеупомянутым позднеордовикскому, фран/фаменскому, пермь/триасовому, юра-меловому и мел/палеогеновому массовым вымираниям, из которых последние четыре имели место при смене направления трендов. Также три четверти смен долгосрочных трендов параллелизовались с биотическими кризисами.

Наконец, анализ температурной кривой [23] при использовании абсолютной шкалы геологического времени (рис. 5) показывает, что только 6 биотических кризисов (6, 10, 14, 15, 17, 18 — объяснение событий номеров см. выше) ассоциировались непосредственно со сменой долгосрочных трендов температур или располагались на начальных или конечных интервалах этих трендов.

ФАНЕРОЗОЙСКИЕ БИОТИЧЕСКИЕ КРИЗИСЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

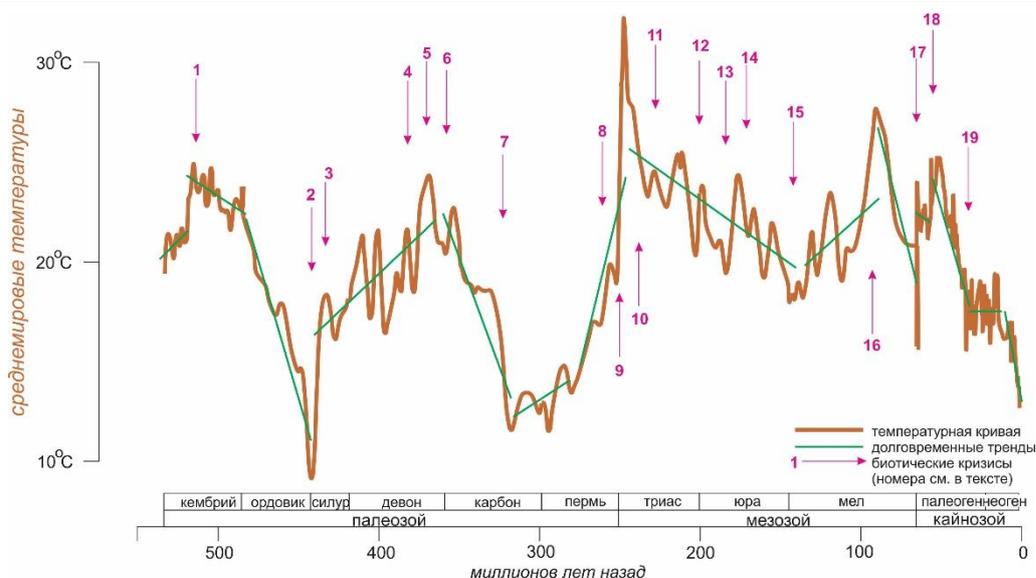


Рис. 3. Обычные флуктуации (по данным [22]) и интерпретированные долгосрочные тренды изменений температур в фанерозое и биотические кризисы (на основании [24]) при использовании абсолютной шкалы геологического времени (данная схема не предназначена для сопоставления кризисов и элементарных температурных флуктуаций).

Это относится в том числе к юра/меловому и мел/палеогеновому массовым вымираниям, которые имели место при смене направления трендов. Также более половины смен долгосрочных трендов параллелизовались с биотическими кризисами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение полученных результатов указывает на совпадение фанерозойских биотических кризисов и долгосрочных изменений климата в геологическом времени. Кроме того, в ряде случаев с такой сменой совпадало несколько биотических кризисов, как это имело место в девоне и юре (рис. 2–5). Однако сила такой ассоциации различается в зависимости от выбора температурной кривой и в меньшей степени от выбора между относительной и абсолютной шкалами. Использование кривой [22] и относительной шкалы указывает на более тесную ассоциацию, которая не оставляет сомнений в наличии некоторой связи между рассматриваемыми феноменами. Однако кривая [23] и абсолютная шкала делают такую ассоциацию менее определенной, а связь — несколько менее очевидной. В целом, результаты проведенных анализов позволяют выдвинуть гипотезу о наличии некоторого механизма, объясняющего заметную параллелизацию некоторых биотических кризисов со сменой долгосрочных трендов на температурных кривых.

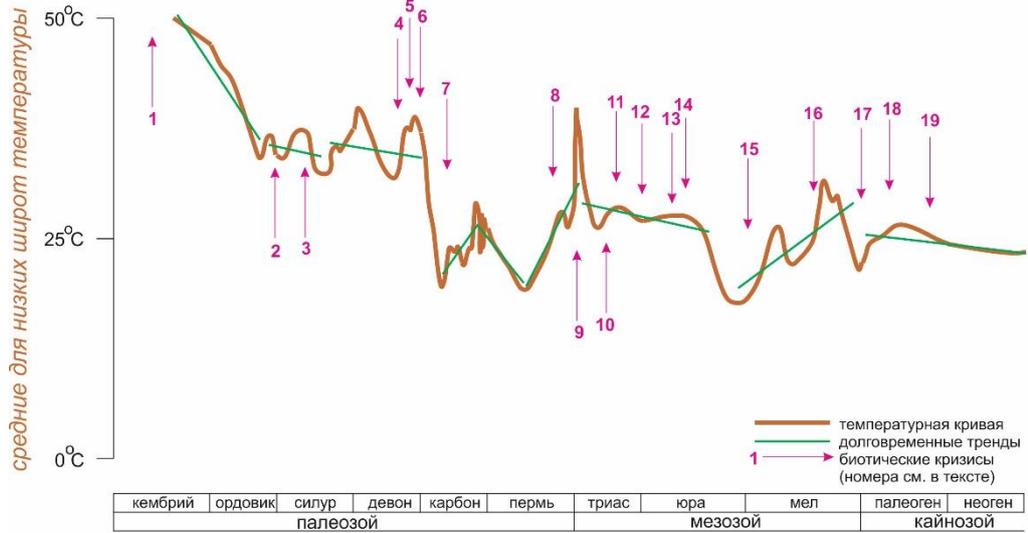


Рис. 4. Ординарные флуктуации (по данным [23]) и интерпретированные долгосрочные тренды изменений температур в фанерозое и биотические кризисы (на основании [24]) при использовании относительной шкалы геологического времени (данная схема не предназначена для сопоставления кризисов и элементарных температурных флуктуаций).

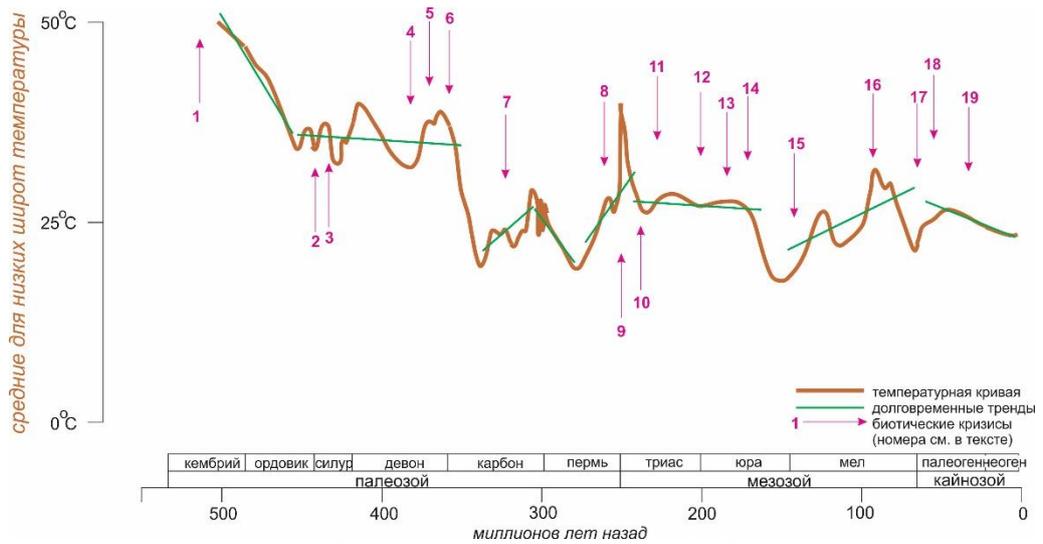


Рис. 5. Ординарные флуктуации (по данным [23]) и интерпретированные долгосрочные тренды изменений температур в фанерозое и биотические кризисы (на основании [24]) при использовании абсолютной шкалы геологического времени (данная схема не предназначена для сопоставления кризисов и элементарных температурных флуктуаций).

ФАНЕРОЗОЙСКИЕ БИОТИЧЕСКИЕ КРИЗИСЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Может ли последующая верификация вышеуказанной гипотезы действительно привести к установлению причинно-следственной связи? Для ответа на этот вопрос необходимо рассмотреть три обстоятельства. Во-первых, совпадение феноменов может быть сугубо случайным. Хотя исключать такой возможности в принципе нельзя, проведенный анализ фиксирует действительно большое количество случаев, когда биотические кризисы происходили во время смен трендов. Во-вторых, совпадение может быть следствием того, что биотические кризисы являются выражением планетарных катастроф, которые оказывали влияние и на температурный режим. Подобную возможность нельзя отвергать в принципе, но представляется крайне маловероятным, что многие катастрофические события фанерозоя, проявлявшиеся очень быстро (в геологическом понимании), были способны надолго «разворачивать» направление элементарных флуктуаций температурного режима. В-третьих, совпадение может быть лишь кажущимся за счет того, что аномальное изменение температур, вызванное катастрофой и фиксируемое в масштабе века или нескольких миллионов лет, влияет на внешний вид предшествующего и последующего трендов. В этом отношении необходимо отметить, что, с одной стороны, интерпретация трендов проводилась так, чтобы по возможности избежать такой ситуации, а, с другой, — тренды фиксируют именно однородные серии элементарных флуктуаций. Например, резкое похолодание самого конца ордовика (хирнантский век) может быть каким-либо образом связано с планетарной катастрофой, однако ему предшествовала довольно длительная тенденция к похолоданию [22, 23].

Таким образом, кажется вполне возможным, что зафиксированные данным исследованием ассоциации феноменов в геологическом времени отражают действительную причинно-следственную связь. Однако она не должна пониматься слишком упрощенно, в том числе и потому, что подобного рода связь ранее прослеживалась для другого возможного фактора биотических событий фанерозоя — глобальных колебаний уровня моря [20]. Более того, изменение температурного режима — это лишь один из многих аспектов климатической эволюции Земли. Здесь также уместно вспомнить о необходимости различия между причинами и первопричинами массовых вымираний [10]. Видится гораздо более вероятным, что смены долгосрочных трендов изменений среднегодовых температур создавали именно условия, в которых вероятность биотических кризисов, имевших разные причины [10, 11, 15, 16], увеличивалась (рис. 1). Однако нельзя исключать и того, что в отдельных случаях смены трендов сами могли оказать непосредственное и при этом негативное влияние на экосистемы.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ указывает на заметную параллелизацию и гипотетическую причинно-следственную связь фанерозойских биотических кризисов с долгосрочными изменениями климата. Имели место довольно частые совпадения катастрофических событий со сменой трендов на температурных кривых. Такая смена может рассматриваться не как первопричина биотических кризисов, а как

фактор увеличения вероятности их проявления, независимо от того, чем они были вызваны. При этом определенность полученных результатов и их интерпретаций находятся в тесной зависимости от выбора температурной кривой (использование относительной или абсолютной шкалы геологического времени влияет меньше).

Настоящая работа демонстрирует, что использование, с одной стороны, существенно обновленной информации (в данном случае об изменениях температурного режима), а, с другой, — новых концептуальных представлений (в данном случае о потенциальном значении смены долгосрочных трендов) может сформировать новый взгляд на природу биотических кризисов. Это делает соответствующие исследования перспективными. Тем не менее прослеживание отдельных совпадений феноменов в геологическом времени не должно рассматриваться как «окончательное» решение рассматриваемой научной проблемы, которое по определению сложно в силу комплексности, многофакторности механизмов биологической эволюции и ее связи с геологической историей планеты, а также несовершенства наших знаний о фанерозойской истории Земли.

Список литературы

1. Захаров В.А. Пограничный пермо-триасовый биотический кризис в бореальной биогеографической области // Труды Геологического института. 2006. № 580. С. 72–76.
2. Knoll A.H., Bambach R.K., Payne J.L., Pruss S., Fischer W.W. Paleophysiology and end-Permian mass extinction // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. V. 256. P. 295–313.
3. Shen J., Zhang Y.G., Yang H., Xie S., Pearson A. Early and late phases of the Permian–Triassic mass extinction marked by different atmospheric CO₂ regimes // *Nature Geoscience*. 2022. V. 15. P. 839–844.
4. Грачёв А.Ф. Тайна вымирания динозавров // *Земля и Вселенная*. 2010. № 3. С. 70–80.
5. Irizarry K.M., Witts J.D., Garb M.P., Rashkova A., Landman N.H., Patzkowsky M.E. Faunal and stratigraphic analysis of the basal Cretaceous–Paleogene (K–Pg) boundary event deposits, Brazos River, Texas, USA // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2023. V. 610. P. 111334.
6. Keller G. Deccan volcanism, the Chicxulub impact, and the end-Cretaceous mass extinction: Coincidence? Cause and effect? // *Special Paper of the Geological Society of America*. 2014. V. 505. P. 57–89.
7. Bailey R. Mass extinctions and their causes // *Geology Today*. 2024. V. 40. P. 21–28.
8. Bambach R.K. Phanerozoic biodiversity mass extinctions // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2006. V. 34. P. 127–155.
9. Raup D.M., Sepkoski, Jr. J.J. Mass extinctions in the marine fossil record // *Science*. 1982. V. 215. P. 1501–1503.
10. Бараш М.С. Причины и первопричины массовых вымираний биоты в фанерозое // Доклады Академии наук. 2012. № 4. С. 424–427.
11. Дмитриева Н.А. Массовые вымирания в истории эволюции Земли // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. 2011. № 2. С. 81–88.
12. Dal Corso J., Bernardi M., Sun Y., Song H., Seyfullah L.J., Preto N., Gianolla P., Ruffell A., Kustatscher E., Roghi G., Merico A., Hohn S., Schmidt A.R., Marzoli A., Newton R.J., Wignall P.B., Benton M.J. Extinction and dawn of the modern world in the Carnian (Late Triassic) // *Science Advances*. 2020. V. 6. P. eaba0099.
13. Fantasia A., Mattioli E., Spangenberg J.E., Adatte T., Bernardez E., Ferreira J., Thibault N., Krencker F.-N., Bodin S. The middle-late Aalenian event: A precursor of the Mesozoic Marine Revolution // *Global and Planetary Change*. 2022. V. 208. P. 103705.
14. Ruban D.A. Examining the Ladinian crisis in light of the current knowledge of the Triassic biodiversity changes // *Gondwana Research*. 2017. V. 48. P. 285–291.
15. Bond D.P.G., Grasby S.E. On the causes of mass extinctions // *Palaeogeography, Palaeoclimatology,*

ФАНЕРОЗОЙСКИЕ БИОТИЧЕСКИЕ КРИЗИСЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

- Palaeoecology. 2017. V. 478. P. 3–29.
16. Rampino M.R., Caldeira K., Prokoph A. What causes mass extinctions? Large asteroid/comet impacts, flood-basalt volcanism, and ocean anoxia—Correlations and cycles // Special Paper of the Geological Society of America. 2019. V. 542. P. 271–302.
 17. Alsulami A., Petrovskii S. A model of mass extinction accounting for the differential evolutionary response of species to a climate change // Chaos, Solitons and Fractals. 2023. V. 175. P. 114018.
 18. Stanley S.M. Climatic cooling and mass extinction of Paleozoic reef communities // Palaios. 1988. V. 3. P. 228–232.
 19. Song H., Kemp D.B., Tian L., Chu D., Song H., Dai X. Thresholds of temperature change for mass extinctions // Nature Communications. 2021. V. 12. P. 4694.
 20. Ruban D.A. Paleozoic-Mesozoic Eustatic Changes and Mass Extinctions: New Insights from Event Interpretation // Life. 2020. V. 10. P. 281.
 21. Ruban G.G. The relation between the Givetian and Serpukhovian biotic crises and long-term environmental trend changes // Geosystems and Geoenvironment. 2024. V. 3. P. 100265.
 22. Scotese C.R., Song H., Mills B.J.W., van der Meer D.G. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years // Earth-Science Reviews. 2021. V. 215. P. 103503.
 23. Grossman E.L., Joachimski M.M. Ocean temperatures through the Phanerozoic reassessed // Scientific Reports. 2022. V. 12. P. 8938.
 24. Рубан Д.А. Неравнозначность массовых вымираний в истории жизни на Земле: новый подход к ранжированию // Вестник Псковского государственного университета. Серия "Естественные и физико-математические науки". 2022. № 3. С. 49–59.
 25. Rogov M.A., Panchenko I.V., Augland L.E., Ershova V.B., Yashunsky V.Yu. The first CA-ID-TIMS U-Pb dating of the Tithonian/Berriasian boundary beds in a Boreal succession. Gondwana Research. 2023. V. 118. P. 165-173.

PHANEROZOIC BIOTIC CRISES AND LONG-TERM TRENDS OF CLIMATE CHANGES

Ruban D. A.

*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation
E-mail: ruban-d@mail.ru*

Biotic crises were common in the Phanerozoic history of the Earth, although their nature remains debatable. Particularly, significant temperature changes could potentially affect the biotic evolution, although there is not any agreement of how these changes could be linked to biotic crises. Indeed, the knowledge of their possible correspondence should be updated regularly regarding the appearance of new portions of knowledge about biotic crises and palaeotemperatures. For instance, several new crises (Ladinian and Carnian in the Triassic, Aalenian in the Jurassic) have been proven very recently, and two detailed, but alternative palaeotemperature reconstructions have been published. The present work aims at studying the possible relations of the catastrophic biotic events to the changes of the long-term trends of temperature fluctuations. Trend changes should be distinguished from ordinary temperature changes because these are the events of different levels. The material is constituted by the freshest information about the timing of 19 biotic crises (mid-Cambrian, Late Ordovician, early Silurian, Givetian, Frasnian/Famennian, Devonian/Carboniferous, Serpukhovian, Guadalupian, Permian/Triassic, Ladinian, Carnian, Triassic/Jurassic, Toarcian, Aalenian, Jurassic/Cretaceous, Cenomanian/Turonian, Cretaceous/Paleogene, Paleocene/Eocene, Eocene/Oligocene) and

the recently updated temperature curves proposed for the entire Phanerozoic. Methodologically, this work is a kind of meta-analysis, i.e., it offers a new treatment of the already published information. It is based on the interpretation of long-term trends of temperature fluctuations and the comparison of their changes to the biotic crises. Long-term trends are outlined so to relate the sequences of ordinary fluctuations with the same direction of changes on original palaeotemperature curves. Two alternative curves are considered for better objectivity of the analysis. Moreover, the fluctuations depicted by these curves are analyzed in regard to both relative and absolute geological time scales. The results of the undertaken analysis imply that many biotic crises (up to two thirds of their total number) associated with the long-term trend changes, as well as many of the latter (not less than a half of them) were accompanied by biotic crises. The certainty of these interpretations depends significantly on the choice of the temperature curve and less on the choice of the geological time scale (relative or numerical). Some biotic events demonstrate perfect correspondence of changes of the long-term palaeotemperature trends irrespective of the choice of the original curve and the geological time scale. For instance, this is a case of the Cretaceous/Paleogene mass extinction, and the same is true for the Devonian/Carboniferous biotic crisis. A hypothesis about the presence of any mechanism relating the Phanerozoic biotic crises and the shifts of the long-term temperature trends is proposed. Subsequent verification of this hypothesis can establish the causal relation between the considered phenomena. Likely, changes of long-term trends of temperature fluctuations did not cause biotic crises, but increased their probability via environmental stress. In other words, these changes acted indirectly making fossils more vulnerable to various negative influences. The conclusions made in the present study should not be judged final. Much has been learned about connections of the biotic evolution and temperature changes in the Phanerozoic. Two other uncertainties, which make future investigations necessary, include the presence of alternative palaeotemperature reconstructions (apparently, those available are far from being ideal) and the regular updates of the geological time scales (moreover, it is unclear whether relative or absolute scales should be preferred in such studies). Anyway, this study stresses the importance of attention to the correspondence of the events of a different scale (short-term biotic crises and long-term temperature trend changes).

Keywords: biota, global palaeogeography, temperature changes, Cenozoic, mass extinctions, Mesozoic, Paleozoic, palaeoclimatic trends, event analysis, stratigraphy.

References

1. Zakharov V. A. Pogranichnyy permo-triasovyy bioticheskiy krizis v boreal'noy bioticheskoy oblasti (A Permian-Triassic boundary biotic crisis in the Boreal biogeographical region). Proceedings of the Geological Institute, 2006, no. 580, pp. 72–76 (in Russian).
2. Knoll A. H., Bambach R. K., Payne J. L., Pruss S., Fischer W.W. Paleophysiology and end-Permian mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, vol. 256, pp. 295–313.
3. Shen J., Zhang Y. G., Yang H., Xie S., Pearson A. Early and late phases of the Permian–Triassic mass extinction marked by different atmospheric CO₂ regimes. *Nature Geoscience*, 2022, vol. 15, pp. 839–844.
4. Grachyov A. F. Tayna vamiraniya dinozavrov (Enigma of dinosaur extinction). *Earth and Universe*, 2010, no. 3, pp. 70–80 (in Russian).
5. Irizarry K. M., Witts J. D., Garb M. P., Rashkova A., Landman N. H., Patzkowsky M. E. Faunal and stratigraphic analysis of the basal Cretaceous-Paleogene (K-Pg) boundary event deposits, Brazos River, Texas, USA.

ФАНЕРОЗОЙСКИЕ БИОТИЧЕСКИЕ КРИЗИСЫ
И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

- Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2023, vol. 610, p. 111–334.
6. Keller G. Deccan volcanism, the Chicxulub impact, and the end-Cretaceous mass extinction: Coincidence? Cause and effect? Special Paper of the Geological Society of America, 2014, vol. 505, pp. 57–89.
 7. Bailey R. Mass extinctions and their causes. *Geology Today*, 2024, vol. 40, pp. 21–28.
 8. Bambach R. K. Phanerozoic biodiversity mass extinctions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2006, vol. 34, pp. 127–155.
 9. Raup D. M., Sepkoski Jr. J. J. Mass extinctions in the marine fossil record. *Science*, 1982, vol. 215, pp. 1501–1503.
 10. Barash M. S. Prichiny i pervoprichiny massovykh vymiraniy bioty v fanerozoe (Triggers and causes of mass extinction of biota in the Phanerozoic). *Proceedings of the Academy of Sciences*, 2012, no. 4, pp. 424–427 (in Russian).
 11. Dmitrieva N. A. Massovye vymiraniya v istorii evolyutsii Zemli (Mass extinctions in the history of evolution on the Earth). *Development of life in the process of abiotic changes on the Earth*, 2011, no. 2, pp. 81–88 (in Russian).
 12. Dal Corso J., Bernardi M., Sun Y., Song H., Seyfullah L. J., Preto N., Gianolla P., Ruffell A., Kustatscher E., Roghi G., Merico A., Hohn S., Schmidt A. R., Marzoli A., Newton R. J., Wignall P. B., Benton M. J. Extinction and dawn of the modern world in the Carnian (Late Triassic). *Science Advances*, 2020, vol. 6, p. eaba0099.
 13. Fantasia A., Mattioli E., Spangenberg J. E., Adatte T., Bernardez E., Ferreira J., Thibault N., Krencker F.-N., Bodin S. The middle-late Aalenian event: A precursor of the Mesozoic Marine Revolution. *Global and Planetary Change*, 2022, vol. 208, p. 103705.
 14. Ruban D. A. Examining the Ladinian crisis in light of the current knowledge of the Triassic biodiversity changes. *Gondwana Research*, 2017, vol. 48, pp. 285–291.
 15. Bond D. P. G., Grasby S. E. On the causes of mass extinctions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, vol. 478, pp. 3–29.
 16. Rampino M. R., Caldeira K., Prokoph A. What causes mass extinctions? Large asteroid/comet impacts, flood-basalt volcanism, and ocean anoxia—Correlations and cycles. Special Paper of the Geological Society of America, 2019, vol. 542, pp. 271–302.
 17. Alsulami A., Petrovskii S. A model of mass extinction accounting for the differential evolutionary response of species to a climate change. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2023, vol. 175, p. 114018.
 18. Stanley S. M. Climatic cooling and mass extinction of Paleozoic reef communities. *Palaaios*, 1988, vol. 3, pp. 228–232.
 19. Song H., Kemp D. B., Tian L., Chu D., Song H., Dai X. Thresholds of temperature change for mass extinctions. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, p. 4694.
 20. Ruban D. A. Paleozoic-Mesozoic Eustatic Changes and Mass Extinctions: New Insights from Event Interpretation. *Life*, 2020, vol. 10, p. 281.
 21. Ruban D. A. The relation between the Givetian and Serpukhovian biotic crises and long-term environmental trend changes. *Geosystems and Geoenvironment*, 2024, vol. 3, p. 100265.
 22. Scotese C. R., Song H., Mills B. J. W., van der Meer D. G. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years. *Earth-Science Reviews*, 2021, vol. 215, p. 103503.
 23. Grossman E. L., Joachimski M. M. Ocean temperatures through the Phanerozoic reassessed. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, p. 8938.
 24. Ruban D. A. Neravnoznachnot' massovykh vymiraniy v istorii zhizni na Zemle: novyy podkhod k ranzhirovaniyu (Inequivalence of mass extinctions in the history of Life on the Earth: a new approach for ranking). *Herald of the Pskov State University. Series Natural and Physical-Mathematical Sciences*, 2022, no. 3, pp. 49–59 (in Russian).
 25. Rogov M. A., Panchenko I. V., Augland L. E., Ershova V. B., Yashunsky V. Yu. The first CA-ID-TIMS U-Pb dating of the Tithonian/Berriasian boundary beds in a Boreal succession. *Gondwana Research*, 2023, vol. 118, pp. 165–173.

Поступила в редакцию 16.09.2024 г.