

УДК 551.461.8

АБИОТИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ВЕЛИКОГО МАССОВОГО ВЫМИРАНИЯ МОРСКОЙ БИОТЫ НА РУБЕЖЕ ТРИАСА И ЮРЫ

© 2015 г. М. С. Бараш

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: barashms@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.04.2014 г.

В интервале триасово-юрской границы вымерло 80% видов морских организмов. Рассматриваются основные гипотезы о причинах этого массового вымирания. “Триггером” вымирания было мощное излияние базальтов в Центрально-Атлантической магматической провинции. Кроме того, обнаружен ряд метеоритных кратеров. Под влиянием космических причин на Земле развились две основные последовательности событий: земные, приводящие к мощному вулканизму, и космические — импакт-события. Они вызвали сходные последствия: выбросы вредных химических соединений и аэрозолей. Возникли парниковый эффект, затемнение атмосферы, препятствующее фотосинтезу, стагнация океана, аноксия. Сократилась биопродуктивность, разрушились пищевые цепи. В итоге были нарушены все жизненно важные процессы, и произошло вымирание значительной части биоты.

DOI: 10.7868/S0030157415030016

Триасовый период (251–199.6 млн. л. н.) был временем восстановления и развития биоты океанов после великого массового вымирания на рубеже палеозоя и мезозоя, на границе пермского и триасового периодов. Однако в конце триаса произошло следующее из пяти великих массовых вымираний фанерозоя, которое охватило и морские, и наземные сообщества. По интенсивности это было третье крупнейшее массовое вымирание после пермского и мелового. Предполагается, что в интервале длительностью от 600 тыс. л. до 8.3 млн. л. вымерло 47% родов, 80% видов [19, 44]. Важнейшим тектоническим фоном всех процессов были дезинтеграция Пангеи и рифтообразование при открытии пра-Атлантического океана (рис. 1).

Из 257 семейств животных, которые жили в позднем триасе и ранней юре, в конце рэта, у границы триаса и юры (Triassic-Jurassic boundary — TJB) вымерло 61 семейство, однако 32 исчезло на несколько млн. лет раньше, в нории [11]. Вымерло 48% родов беспозвоночных, главным образом головоногих, двустворок, гастропод и брахиопод [38]. Таксоны аммонитов постепенно вымирали к концу триаса. В интервале границы триаса и юры исчезло не менее шести надсемейств аммонитов, выжило в условиях кризиса только одно [16] (рис. 2). Вымирание в разной степени затронуло разные таксоны. Так, среди двустворчатых моллюсков и брахиопод больше пострадали формы с крупными раковинами и небольшими ареалами. Наиболее пострадали эндемичные и глубоководные формы, наименее — космополитные. Среди радиолярий вымирания отмечены на родовом уровне. Все 35 семейств гастропод рэта пережили катастрофу на TJB. Мало пострадали рыбы, вероятно, имело место массовое

вымирание морских рептилий [37]. В Европейском регионе в конце триаса погибло 92% видов и 42% родов морских организмов, а в наземных экосистемах некоторых районов — около 50% четвероногих и до 95% видов растений [11].

В конце триаса произошло глобальное исчезновение многих рифообразующих организмов, прежде всего склерактиниевых кораллов и губок: вымерло 50 родов, выжило 11. Исчезли коралловые рифы и почти все известковые губки (16 из 18 семейств). Таким образом, произошло полное уничтожение рифовых экосистем [17]. Массовому вымиранию подверглись остракоды, фораминиферы, кокколитофориды, радиолярии, динофлагелляты.

Массовое исчезновение в позднем триасе не было единовременным событием. Вымирания аммоноидей, брахиопод, конодонтов были ступенчатыми. Выделяются отдельные события с увеличением скорости вымирания к концу триаса: в среднем, позднем и в конце норийского века, а также в конце рэта [23]. Морские рептилии претерпели существенное вымирание еще раньше — в конце ладинского века.

Детальные микропалеонтологические, геохимические и литологические исследования интервала триасового кризиса проведены в Австрийских Альпах [9]. В конце рэта сократилось количество и размеры доминирующего вида известкового нанопланктона *Prinsiosphaera triassica*, что коррелируется с повышением $\delta^{18}\text{O}$ и постепенным падением значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$. В комплексах донных фораминифер уменьшилось обилие и разнообразие таксонов с известковыми раковинками и стали доминировать агглютинирующие виды. Эти данные по-

казывают сокращение карбонатной продукции, вплоть до почти полного отсутствия известковых нанофоссилий и бентосных фораминифер в самом конце триаса. Катастрофические условия времени массового вымирания характеризуются обилием агглютинирующих фораминифер *Trochammina*.

Рассматриваются четыре основные гипотезы о причинах массового исчезновения организмов в конце триаса: мощный вулканизм и сопровождающие его явления, климатические колебания, изменения уровня моря с сопутствующей аноксией, и импакт-события (удары астероидов). Предполагается [20 и др.], что основным “триггером” переворотов, как морской, так и наземной биот была единая глобальная причина. Она проявляется в совпадении времени мощного излияния базальтов в Центрально-Атлантической Магматической провинции (ЦАМП), пик интенсивности которого оценивается в 199.0 ± 2.4 млн. л. н. [26], со временем массового вымирания на ТJB около 200 млн. л. н. [32]. Возможно, это излияние было крупнейшим, по крайней мере, по площади. Оно охватывает более 7 млн. км², от Франции до Южной Бразилии. Излилось более 2.5×10^6 км³ базальтов [25].

На восточной окраине Северной Америки, в Южной Америке, в северо-западной Африке и юго-западной Европе имеются свидетельства активных тектонических событий, сопровождавшихся вулканической деятельностью. Это связывается с главной фазой рифтообразования, которое предшествовало открытию пра-Атлантического океана. При извержениях имели место выброс пеплов, дегазация базальтов, выделение значительных количеств CO₂ и SO₂, которые должны были повлиять на состав атмосферы и океана.

Сопоставление возраста начала базальтовых излияний в ЦАМП и уровня массового вымирания на ТJB противоречиво, т.к. разные определения дают несколько отличные результаты, вплоть до более позднего начала излияний [19]. Однако U–Pb возраст границы по мультисернам циркона был оценен в 199.6 ± 0.4 млн. л. н. [32]. А возраст излияний базальтов ЦАМП в Канаде методом ²⁰⁶Pb/²³⁸U по зерну циркона был оценен как 201.27 ± 0.27 млн. л. н. [35]. Эти данные позволяют соотносить время излияния базальтов с началом массового вымирания. Новая высокоточная U/Pb геохронология по вулканическим пеплам из независимых морских стратиграфических разрезов показала, что триасово-юрский биологический кризис коррелируется с началом наземных вулканических излияний в ЦАМП в пределах менее 150 тыс. лет [36]. Авторы проанализировали три слоя вулканических пеплов, включающих ТJB, в бассейне Пукара (Pucara) в северном Перу и слой пепла в разрезе каньона Нью-Йорк в штате Невада (США). Авторами было показано, что сопутствующее падение и поднятие уровня моря и негативный пик δ¹³C в самом конце триаса имели место в течение менее 290 тыс. лет. Такие быстрые

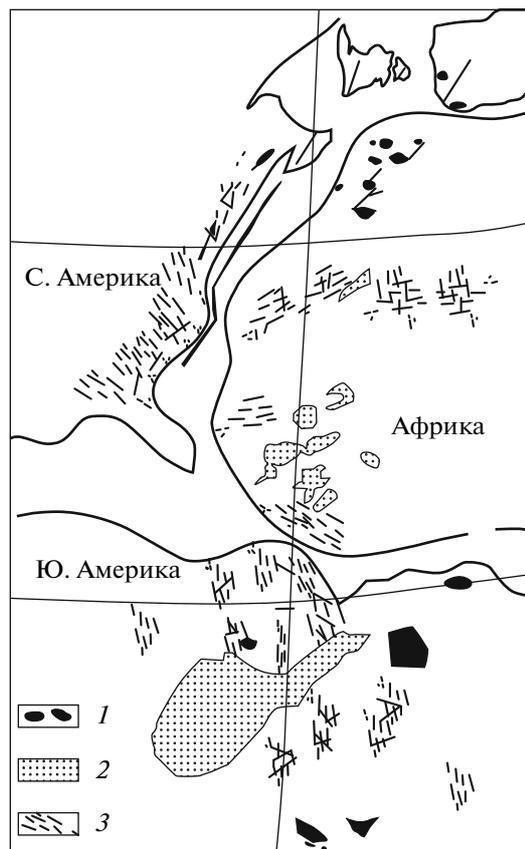


Рис. 1. Центрально-Атлантическая магматическая провинция (ЦАМП), связанная с рифтообразованием при дезинтеграции Пангеи в триасе [26]. 1 – вулканы; 2 – силлы; 3 – группы даек.

флюктуации уровня моря в глобальном масштабе предполагают, что вымирание на ТJB было тесно связано с глобальным похолоданием и потенциально вызвано вулканизмом ЦАМП (рис. 3).

Минералогическое изучение самого верхнего слоя рэта в Северных Австрийских Альпах [33] выявило псевдоморфозы кристаллов пироксена и амфибола, образовавшиеся из дистального мафического вулканического пепла. Обнаружены сферические зерна, образовавшиеся по вулканическому стеклу. Эти признаки пеплового слоя, который отложился близко к ТJB, интерпретированы как прямое доказательство вулканизма в ЦАМП, совпадающего или непосредственно предшествовавшего массовому вымиранию, и первоначальной отрицательной изотопно-углеродной аномалии. Состав глинистых минералов над границей отражает выветривание в условиях жаркого и гумидного парникового климата. Данные показывают прямую связь между самыми верхними морскими отложениями триаса и материалом из ЦАМП. Свидетельствами существенного влияния вулканической активности ЦАМП на изменения условий среды у ТJB в морской среде являются сдвиг соотношения

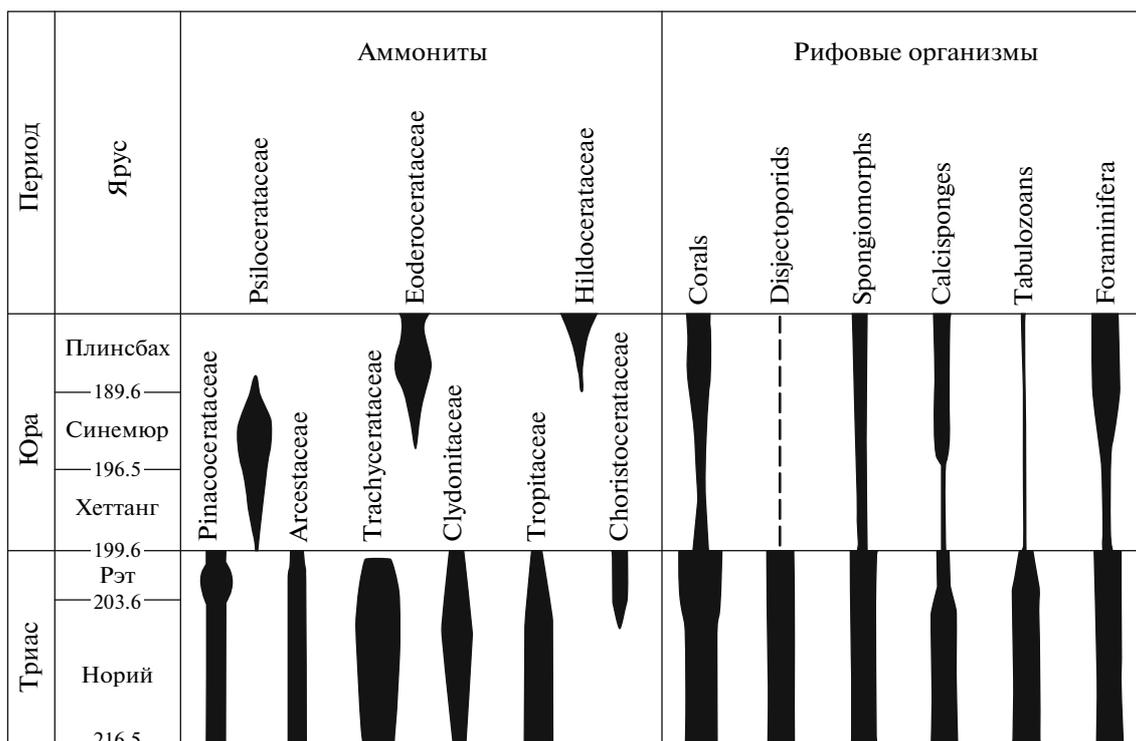


Рис. 2. Вымирание аммонитов и рифовых организмов в конце триаса (по [16], с изменениями; возраст границ ярусов, млн. л. н., по [21]).

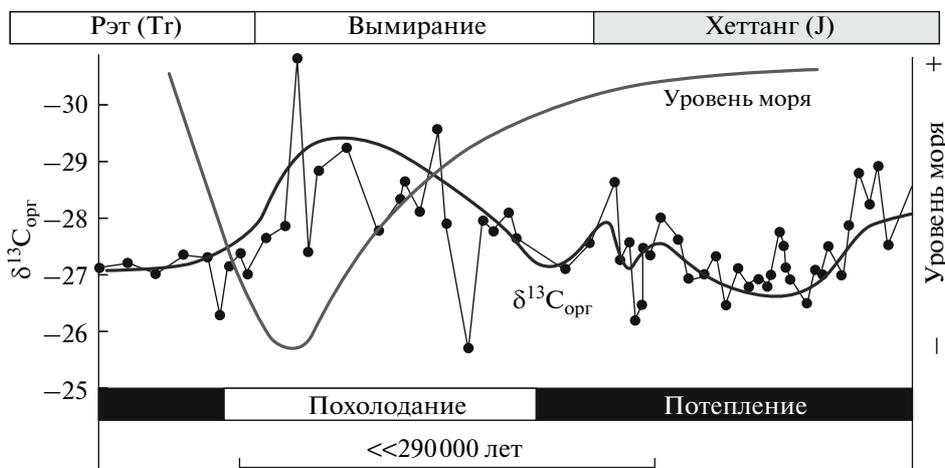


Рис. 3. Колебания уровня моря, климата и $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ в интервале ТЖВ в разрезе каньона Нью-Йорк (Невада, США). Интервал вымирания охватывает 8 м разреза (по [36], упрощено).

изотопов Os и повышения концентраций Re and Os [10]. Все это подтверждает идею, что вулканизм ЦАМП вызвал климатические и другие изменения среды, которые, в свою очередь, отразились в изотопно-углеродных аномалиях и привели к массовому вымиранию.

Резкое изменение условий среды у ТЖВ вдоль окраин пра-океана Тетис отразилось в коренной смене типа седиментации: бедные органическим веществом триасовые осадки в юре сменились бога-

тыми органикой черными сланцами [43]. Биомаркеры в образцах из Германии показали эвксинское состояние фотической зоны и серию положительных и отрицательных изотопно-углеродных отклонений в начале хеттангского века. Меняются комплексы фитопланктона: хромофиты (красные водоросли) замещаются зелеными хлорофилловыми водорослями при возникновении эвксинских условий, вызванных повышением соленостной стратификации и потеплением приповерхностных вод. Длительная анооксия океана объясняется парнико-

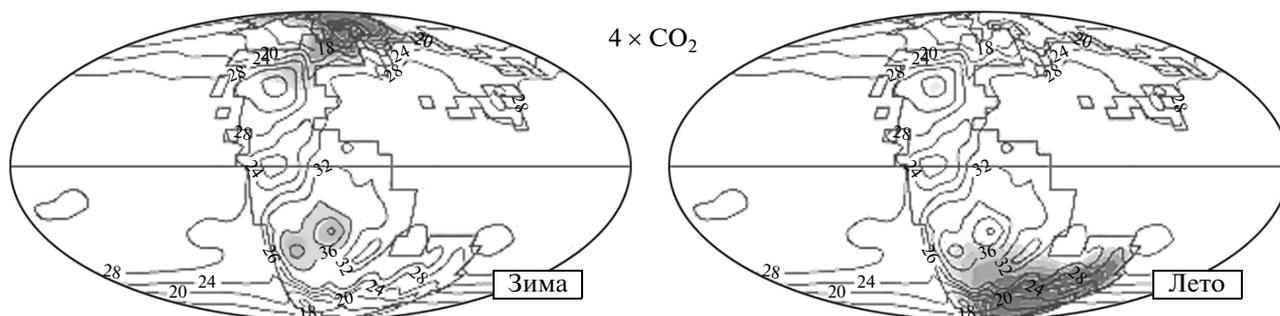


Рис. 4. Зимние и летние температуры поверхности, смоделированные для условий 4-кратного увеличения $p\text{CO}_2$ в атмосфере (по [20], с изменениями).

выми условиями и повышением поступления в океан питательных веществ в результате базальтового вулканизма. Освобождение летучих компонентов при базальтовом вулканизме, их взаимодействие с породами земной коры и выделение в атмосферу были одними из главных причин массового вымирания и аноксии.

Полагают, что как в позднем триасе, так и в ранней юре климат был теплым. В позднем триасе парниковые условия распространились по всей Земле. Гумидные леса достигали полюсов. Это был единственный интервал фанерозоя, для которого нет свидетельств какой-либо ледниковой активности. Некоторыми материалами подтверждаются температурные колебания на границе эпох. По палинологическим данным из разрезов северных Альп в интервале триасово-юрской границы резкое потепление сменяется коротким похолоданием, за которым следует более продолжительное потепление [22].

Существенные колебания соотношения изотопов углерода в карбонатах и органическом веществе подтверждают значительные изменения глобального цикла углерода у границы периодов [42]. Это соотношение в морских известняках северной Италии показало отрицательный пульс, совпадающий с исчезновением бентической фауны, и последовавший положительный сдвиг, начавшийся выше границы. Отрицательный пульс мог быть обусловлен выделением газогидратов [12].

Аномальные колебания $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ у ТЖВ выражены в морских и наземных отложениях в Тетической и Тихоокеанской областях. Максимальный отрицательный сдвиг достигает -9‰ [18]. Совпадение отклонения $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ и палеонтологических свидетельств позволяет проводить межрегиональную и межфаціальную корреляцию ТЖВ и выявить глобальные изменения условий среды на этом стратиграфическом уровне.

Большой отрицательный изотопный сдвиг углерода, определенный по морским карбонатам, органическому веществу и наземной древесине, объясняется тем, что дегазация вулканогенного

CO_2 вызвала возникновение парникового эффекта и выход в атмосферу значительной массы CH_4 из газогидратов морских отложений. Окисление CH_4 должно было дополнительно повысить $p\text{CO}_2$ атмосферы до более 2500 ppmv к началу юры [6]. По расчетам авторов, перестройка карбонатного цикла при эруптивных извержениях в ЦАМП была очень значительной. Выделилось около 8000–9000 Gt углерода в форме CO_2 и ~5000 Gt в форме CH_4 . Согласно их модели, первичный изотопный сдвиг имел место в течение ~70 тыс. л., а полное восстановление системы океан–атмосфера по отношению к CO_2 завершилось через 700–1000 тыс. л.

По палеоботаническим данным, на рубеже триаса и юры произошло четырехкратное увеличение концентрации в атмосфере CO_2 , температура возросла на 3–4°C, возникли парниковые условия. Температуры превысили допустимые пределы существования многих растений, что привело к 95-процентному (на видовом уровне) перевороту состава мегафлоры [28].

Моделирование также показало возможность губительного влияния на морскую и наземную биоту быстрого выделения CO_2 в атмосферу в конце триаса [20]. На суше увеличение концентрации CO_2 до уровня, в 2–8 раз превышающего современные доиндустриальные значения, должно было увеличить продолжительность жарких и сухих сезонов и сезонные контрасты. В субтропических областях максимальные температуры должны были повышаться на 4–12°C, а в некоторых районах превышать 35°C (рис. 4).

В океане должны были понизиться ветровая циркуляция и меридиональный водообмен (в 4 раза) и усилиться стратификация. В связи с повышением температуры уменьшалась растворимость кислорода и его содержание в воде. Развивалась аноксия. Морская фауна лишалась кислорода. Вариации орбитальных параметров Миланковича должны были усиливать стрессовые условия для биоты.

Мощный и быстрый выброс CO_2 в атмосферу при извержениях в ЦАМП должен был вызвать растворение CO_2 в водах океана и образование уголь-

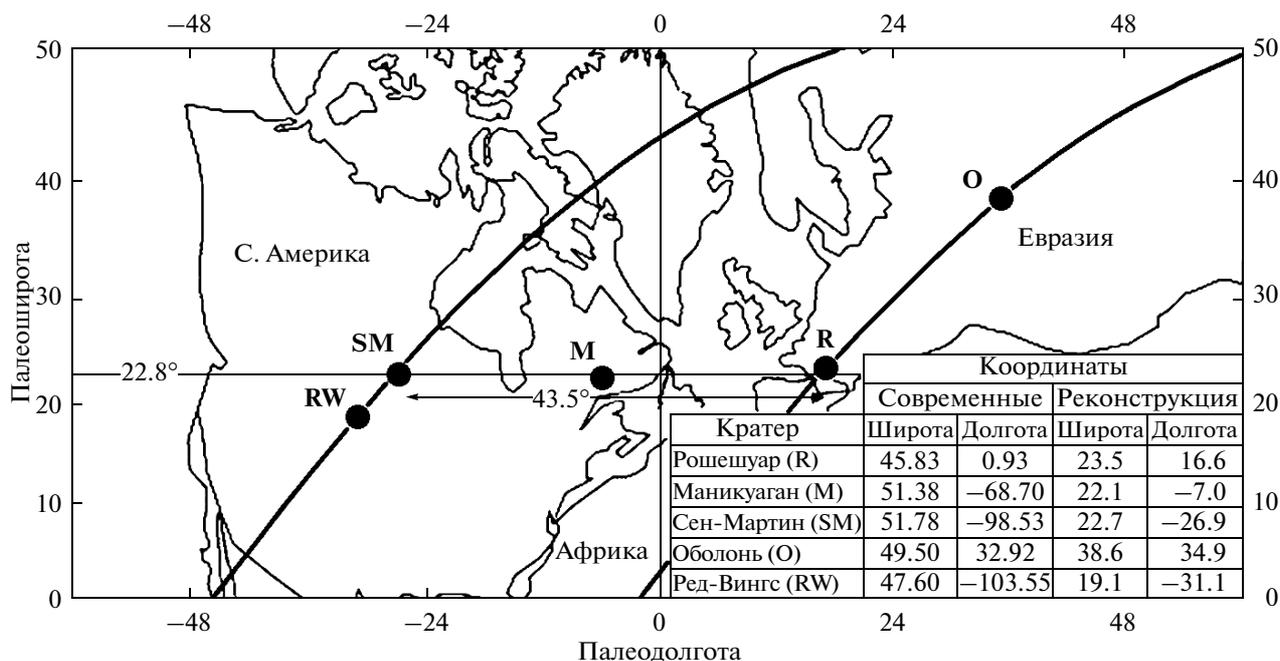


Рис. 5. Положение пяти импакт-структур 214 млн. л. н. (по [40], с изменениями).

ной кислоты H_2CO_3 . Понижение pH и возникновение кислой среды было, вероятно, одной из непосредственных причин массового вымирания в конце триаса [14, 24]. Наиболее губительным оно было для организмов с известковым скелетом, прежде всего для склерактиниевых кораллов, а также известковых водорослей, губок, фораминифер, мшанок, брахиопод, иглокожих. Краткие интервалы сильного подкисления придонной среды в разрезах отложений у границы триаса и юры отразились в виде прослоев мало- или бескарбонатных осадков.

Диоксид серы SO_2 , попадающий при извержениях в атмосферу, также сначала вызывает потепление, но быстро вступает в реакцию с парами воды, образует сульфатные аэрозоли, которые рассеивают и отражают солнечную радиацию. Это может вызвать относительно короткие колебания температуры. Другое следствие – вредные для биоты кислотные дожди.

Стабильные изотопы серы в отложениях ТЛВ в Британской Колумбии (Канада) отразили пертурбацию цикла серы, совпадающую с пертурбацией цикла углерода [45]. $\delta^{34}S$ сдвигается от значений, соответствующих открытой системе бактериальной сульфатредукции (-30‰), до значений 20‰ , соответствующих полной утилизации сульфатов в закрытой системе. Предполагается, что этот изотопный сдвиг был вызван уменьшением концентрации сульфатов в морской воде в связи с накоплением эвапоритов в нарождающейся рифтовой зоне Атлантики и увеличением сноса осадков с материков при массовом вымирании наземных растений во время триасово-юрского кризиса.

Изменения уровня моря в конце триаса хорошо обоснованы геологическими данными по Европе и Северной Америке (рис. 5). В начале юры крупная регрессия быстро сменилась трансгрессией. Так, в отложениях западного Тетиса на Иберийской платформе имел место регрессивно-трансгрессивный цикл продолжительностью около 12 млн. лет, начавшийся в позднем триасе и окончившийся в ранней юре [13]. Падение уровня моря сопровождалось сокращением площади шельфовых морей. Однако колебания уровня моря происходят медленно и не могут объяснить быстрого исчезновения многих групп организмов. Предполагается, что на фоне длительных изменений уровня происходили быстрые короткие колебания, которые приводили к колебаниям первичной продукции и потере мест обитания мелководных организмов, таких как конодонты и аммониты. Трансгрессии мало- или бескислородных вод на шельфы и последующие регрессии разрушали среду обитания двустворок и вызывали их массовое вымирание [15]. Относительно небольшие понижения уровня моря на рубеже триаса и юры определялись, вероятно, тектоническими движениями, т.к. не обнаружено следов материковых оледенений, которые могли бы вызвать эвстатические изменения уровня. Таким образом, колебания уровня моря могли усугубить вредное влияние основных причин.

Базальные слои юры в Европе, Северной и Южной Америке обогащены органикой и не содержат остатков бентоса, либо содержат бедные комплексы, свидетельствующие об условиях стагнации. Хорошо доказанная аноксия океанской среды может объяснить массовую гибель морской биоты, однако

кризис сухопутной фауны и флоры свидетельствует о более универсальных причинах.

Связь вымирания конца триаса с импакт-событиями имеет определенные обоснования. Время удара астероида, образовавшего крупный кратер Маникуаган (Manicouagan) в Квебеке, определяется как 214 ± 1 , другая оценка 210 ± 4 млн. л. н. (здесь и далее возраст импакт-структур дается по [8]). Ударные кратеры этого же возраста обнаружены во Франции (Rochesart) и в Англии около Бристоля. В последнем случае по изотопам хрома доказано участие космического вещества в составе образовавшихся при импакт-событии осадков (импактитов). Их возраст, согласно аргоновому методу, около 214 ± 8 млн. лет. Это время как раз предшествует началу периода ступенчатого вымирания в средней части норийского века [23].

Симмс [39] сообщил о 2–4-метровой толще деформированных отложений (сейсмитах) конца триаса (рэтский ярус), распространенной в Англии на площади в несколько тысяч квадратных километров. Местами они ассоциируются с отложениями, сформированными цунами. Эти отложения являются следствием сейсмического события необычайной магнитуды. Автор полагает, что они могут свидетельствовать об ударе болида диаметром в несколько километров, создавшем кратер в несколько десятков километров и возбудившем сейсмические волны. Положение эпицентра предполагается по морским сейсмическим данным в более чем 500 км к западу или северо-западу от центральной Британии, на шельфе западнее Ирландии, где возможный кратер погребен под 2–3-километровой толщей молодых отложений. Обнаруженные ранее геохимические аномалии в перекрывающих сейсмитах осадках приписывались вулканизму Центрально-Атлантической магматической провинции, однако ближайший вулканический центр расположен не ближе 1000 км. Образование сейсмитах, геохимических аномалий, повышенных концентраций иридия и шокового кварца коррелируется с событием исчезновения биоты в конце триаса.

Известно столкновение фрагментов распадающегося астероида или кометы Шумахера-Леви с Юпитером в 1994 г. Подобное импакт-событие на Земле могло оставить линейную серию кратеров. На поверхности Земли имеется ряд кратеров с возрастом около 214 млн. лет (рис. 5). Это Рошешуар (Rochesart) во Франции, Маникуаган (Manicouagan) и Сен-Мартин (Saint Martin) в Канаде, Оболонь (Obolon) на Украине и Ред-Винг (Red Wing) в США. Если эти кратеры расположить на тектонической реконструкции Северо-Американской и Европейской плит для возраста 214 млн. лет назад, три крупнейших кратера (Рошешуар, Маникуаган и Сен-Мартин) располагаются на одной палеошироте около 22.8° в пределах полосы шириной 1.2° и длиной 43.5° палеодолготы [40]. Эти структуры могут представлять остатки цепи кратеров длиной

до 4462 км. Два других кратера — Оболонь и Ред-Винг — лежат на больших кругах, наклонение которых (37.2°) соответствует положению кратеров Рошешуар и Сен-Мартин. По мнению авторов, эти пять импакт-структур сформировались одновременно при множественном импакт-событии, вызванном столкновением Земли с фрагментированной кометой или астероидом.

Структура Рошешуар во Франции расположена в герцинских породах Центрального массива и не отражена в топографии. Тонкий (менее 10 м) слой ударного расплава перекрыт продуктами выброса мощностью 20–50 м и подстилается автохтонной и аллохтонной базальной брекчией. По литологическим данным диаметр структуры около 25 км. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование дало возраст 214 ± 8 млн. лет.

Структура Маникуаган в восточной Канаде имеет диаметр около 100 км. Удар астероида пришелся на метаморфические породы докембрия, перекрытые ордовикскими карбонатными породами. U-Pb датирование по цирконам из щита ударного расплава мощностью более 200 м дало возраст 214 ± 1 млн. лет. Структура Сен-Мартин в западной Канаде выявлена по гравиметрическим и магнитным данным, и подтверждена бурением. Диаметр структуры около 40 км [27]. Удару подверглись архейские гранито-гнейсы, перекрытые палеозойскими осадочным чехлом. Наиболее поздние предимпактные породы являются девонскими, наиболее ранние послеимпактные — юрские красновцы и эвапориты. Rb/Sr датирование ударного расплава дало возраст 219 ± 32 млн. лет [34].

Структура Оболонь диаметром около 15 км перекрыта постимпактными осадками от среднеюрского до четвертичного возраста мощностью 150–300 м. По геофизическим данным и результатам бурения удару астероида подверглись раннепротерозойские магматические гнейсы и гранитоиды, перекрытые осадками от среднекарбонатового до раннетриасового возраста. По стратиграфическим данным возраст оценивается как 215 ± 25 млн. лет.

Структура Ред-Вингс на западе США имеет диаметр около 9 км. Она перекрыта ~1.5-километровой толщей пост-импактных юрско-неогеновых осадков. Импактная структура сформировалась в силурийско-триасовых отложениях, в основном карбонатных, она является структурной ловушкой для образования нефтяных полей. По стратиграфическим данным возраст 200 ± 25 млн. л. н. В Тенесси ($36^\circ 23'$ с.ш., $87^\circ 40'$ з.д. [41]) обнаружена структура Уэллс-Крик (Wells Creek), диаметром 13.7 км с приблизительным возрастом около 200 млн. л. н.

Массовое вымирание на рубеже триаса и юры в Италии ассоциируется со горизонтами сланцев, содержащих шоковый кварц [7]. Иридиевая аномалия предположительно импактного происхождения обнаружена в осадках интервала триасово-юрской границы в бассейне Ньюарк (Newark Ba-

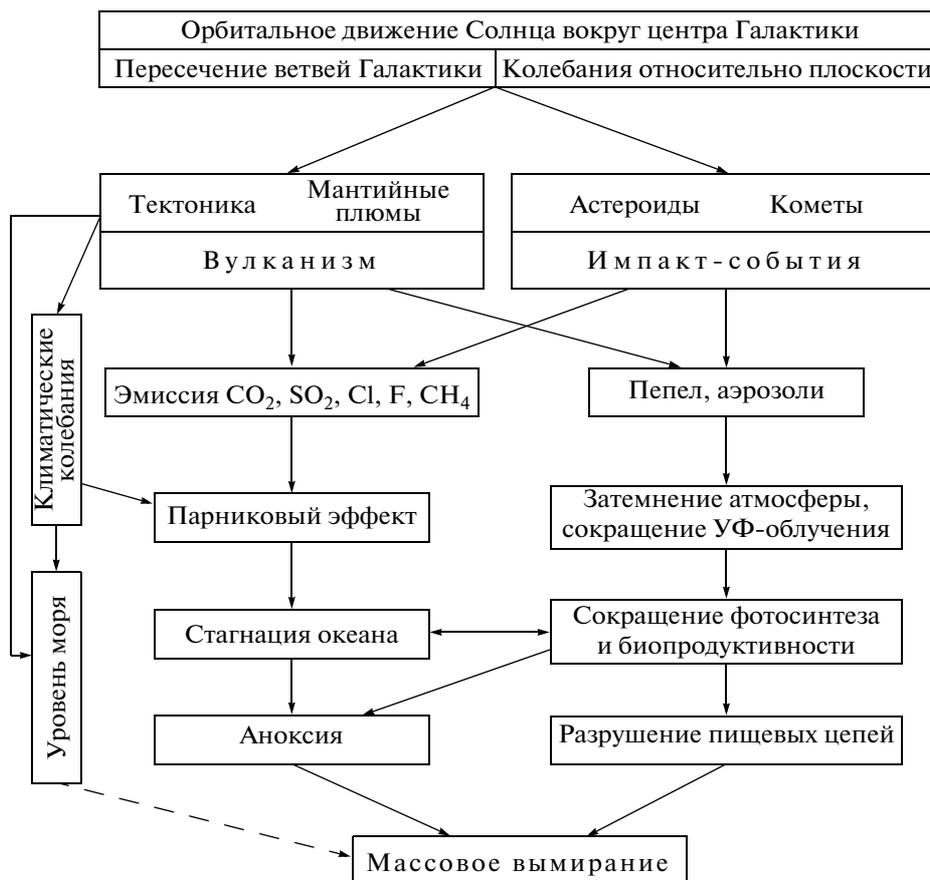


Рис. 6. Процессы, приведшие к массовому вымиранию на рубеже триаса и юры.

sin, восток США) [30]. Концентрация иридия в среднем по десяткам разрезов составляет 141 ppt Ir, достигая максимума 285 ppt Ir. На этом стратиграфическом уровне имели место важнейшие изменения фауны и флоры. Крупные динозавры появились менее чем через 10 тыс. лет после ТЖВ и менее чем через 30 тыс. лет после исчезновения последних триасовых таксонов, синхронного с массовым вымиранием. В последующие 135 млн. лет они завоевали доминирование в наземных сообществах. Пик иридия ассоциируется с возрастанием концентрации спор папоротников.

Свидетельства импакт-события обнаружены также в глубоководных отложениях среднего нория (поздний триас) в Японии: аномалия концентрации элементов платиновой группы, обогащенный никелем магнетит, микросферулы. Осадки содержат аномально высокую концентрацию иридия (до 41.5 ppb) [31]. Это подтверждает распространение выбросов ударных кратеров в глобальном масштабе. По микрофоссилиям авторы оценивают их возраст в 215.5 млн. л. и коррелируют этот слой со временем образования 100-километрового кратера Маникуаган в Канаде. По данным авторов, это событие не нашло отражения в массовом исчезновении радиоларий и других компонен-

тах планктона в одновозрастных осадках, хотя и повлияло на морскую и наземную фауну и флору в Северной Америке, ближе к месту импакта.

Ряд исследователей пришел к выводу, что общим условием для массовых вымираний была комбинация импакт-событий и обширного вулканизма. Анализ вымирания на родовом уровне для 73 стратиграфических подразделений мезозоя и кайнозоя показал, что наибольшие вымирания имели место лишь при одновременном действии вулканизма и ударов астероидов [5]. Вулканизм, изменения климата и уровня моря оказывают давление на экосистемы и изменяют их состав. Импакт-события, как и события морской аноксии, являются внезапными, катастрофическими, и вызывают массовую смертность. Сочетание этих воздействий вызывает наибольшие вымирания.

Однако у некоторых авторов сомнения или полное отрицание таких гипотез вызывает обычное большее или меньшее временное несовпадение вулканизма, импакт-событий и вымираний. На мой взгляд [2, 3], эти несовпадения несущественны, т.к. космические причины вызывают возникновение интервалов неблагоприятных условий длительностью в миллионы лет, что, в частности, определяет ступенчатые вымирания, например, триасово-юр-

ское. Массовые вымирания происходят в пределах этих интервалов, когда сочетание вредных условий среды достигает уровня, делающего дальнейшее существование тех или иных групп организмов невозможным.

Итак, под воздействием причин, вызванных, вероятно, орбитальным движением Солнечной системы вокруг центра Млечного Пути, на Земле развиваются две основные последовательности событий: земные, приводящие к мощному вулканизму, и космические — падение на Землю крупных астероидов или комет (импакт-события) (рис. 6). Они могут действовать в одном, большем или меньшем, временном интервале, как это отмечается почти для всех “великих массовых вымираний”, кроме ордовикского. Но массовая гибель биоты может происходить и при развитии лишь одной последовательности событий, развивающейся вследствие вулканизма, либо крупного импакт-события. В этом случае вымирание, вероятно, имеет меньшие масштабы.

Как видно из схемы, и вулканизм и импакт-события вызывают сходные последствия. В обоих случаях в атмосферу выбрасываются вредные химические элементы и аэрозоли. Возникают парниковый эффект, потепление, затемнение атмосферы, препятствующее проникновению ультрафиолетовых лучей и фотосинтезу, стагнация океана, аноксия. Сокращается биопродуктивность, разрушаются пищевые цепи. В итоге нарушаются все жизненно важные процессы, и происходит вымирание значительной части биоты.

Исследуя массовые вымирания, крупнейшие пертурбации морской или наземной биоты, некоторые авторы считают их причинами отдельные абиотические факторы влияющие на биоту, чаще всего колебания климата и уровня моря. Однако сильнейшее плейстоценовое оледенение и похолодание в средних и высоких широтах, как и сильные (до 100–120 м) колебания уровня моря, не вызвали массовых вымираний. Имели место гибель и появление некоторых таксонов, миграции биоты в соответствии с широтными сдвигами климатических поясов [1, 4].

Работа выполнена в рамках программы № 28 Президиума РАН “Проблемы происхождения жизни и становления биосферы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бараш М.С.* Четвертичная палеоокеанология Атлантического океана. М.: Наука, 1988. 272 с.
2. *Бараш М.С.* Причины и первопричины массовых вымираний биоты в фанерозое // Докл. РАН. 2012. Т. 44. № 4. С. 424–427.
3. *Бараш М.С.* Взаимодействие причин массовых вымираний биоты в фанерозое // Океанология. 2013. Т. 53. № 6. С. 825–837.
4. *Бараш М.С., Блюм Н.С., Бурмистрова И.И. и др.* Неоген-четвертичная палеоокеанология по микропалеонтологическим данным. М.: Наука, 1989. 285 с.
5. *Arens N.C., West I.D.* Press-pulse: a general theory of mass extinction? // *Paleobiology*. 2008. V. 34. № 4. P. 456–471.
6. *Beerling D.J., Berner R.A.* Biogeochemical constraints on the Triassic–Jurassic boundary carbon cycle event // *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. V. 16. P. 101–113.
7. *Bice D.M., Newton C.R., Mccauley S. et al.* Shocked Quartz at the Triassic–Jurassic Boundary in Italy // *Science*. 1992. V. 255. № 5043. P. 443–446.
8. Catalogue of the Earth’s Impact structures. Siberian Center for Global Catastrophes, Russian Academy of Sciences, Siberian division. Retrieved 2009-08-12. <http://omzg.sccc.ru/impact/index1.html>
9. *Clémence M.-E., Gardin S., Bartolini A. et al.* Benthoplanktonic evidence from the Austrian Alps for a decline in sea-surface carbonate production at the end of the Triassic // *Swiss J. Geosci.* 2010. V. 103. P. 293–315.
10. *Cohen A.S., Coe A.L.* New geochemical evidence for the onset of volcanism in the Central Atlantic magmatic province and environmental change at the Triassic–Jurassic boundary // *Geology*. 2002. V. 30. P. 267–270.
11. *Deng Sh., Lu Y., Xu D.* Progress and review of the studies on the end-Triassic mass extinction event // *Science in China. Ser. D. Earth Sciences*. 2005. V. 48. № 12. P. 2049–2060.
12. *Galli M.T., Jadoul F., Bernasconi S.M. et al.* Anomalies in global carbon cycling and extinction at the Triassic/Jurassic boundary: evidence from a marine C-isotope record // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2005. V. 216. № 3–4. P. 203–214.
13. *Gomez J.J., Goy A.* Late Triassic and Early Jurassic palaeogeographic evolution and depositional cycles of the Western Tethys Iberian platform system (Eastern Spain) // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2005. V. 222. № 1–2. P. 77–94.
14. *Greene S.E., Martindale R.C., Ritterbush K.A. et al.* Recognizing ocean acidification in deep time: An evaluation of the evidence for acidification across the Triassic–Jurassic boundary // *Earth-Science Reviews*. 2012. V. 113. P. 72–93.
15. *Hallam A.* The end-Triassic bivalve extinction event // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 1981. V. 35. P. 1–44.
16. *Hallam A.* The end-Triassic mass extinction event // *Geol. Soc. Amer. Special Paper*. 1990. V. 247. P. 577–583.
17. *Hallam A., Wignall P.B.* Mass Extinctions and Their Aftermath. Oxford: Oxford Univ. Press, 1997. 320 p.
18. *Hesselbo S.P., Atuart A.R., Finn S. et al.* Terrestrial and marine extinction at the Triassic–Jurassic boundary synchronized with major carbon-cycle perturbation: A link to initiation of massive volcanism? // *Geology*. 2002. V. 30. № 3. P. 251–254.
19. *Hesselbo S.P., McRoberts C.A., Palfy J.* Triassic–Jurassic boundary events: problems, progress, possibilities // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2007. V. 244. P. 1–10.
20. *Huynh T.T., Poulsen C.J.* Rising atmospheric CO₂ as a possible trigger for the end-Triassic mass extinction // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2005. V. 217. P. 223–242.
21. International Stratigraphic Chart, 2013. <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2013-01.pdf>.

22. *Kuerschner W.M., Bonis N.R., Krystyn L.* Abrupt climate changes at the Triassic-Jurassic boundary inferred from palynological evidence // *Geophys. Res. Abstracts*. 2006. V. 8. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-07075.
23. *Lucas S.G., Tanner L.H.* Stratigraphic resolution and the supposed mass extinction at the end of the Triassic // 32 IGC, 20-28 August 2004. Florence, Italy. 2004. Abstracts. 302-9.
24. *Martindale R.C., Berelson W.M., Corsetti F.A. et al.* Constraining carbonate chemistry at a potential ocean acidification event (the Triassic–Jurassic boundary) using the presence of corals and coral reefs in the fossil record // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2012. V. 350–352. P. 114–123.
25. *Marzoli A., Bertrand H., Knight K. et al.* Synchrony of the Central Atlantic magmatic province and the Triassic–Jurassic boundary climatic and biotic crisis // *Geology*. 2004. V. 32. № 11. P. 973–976.
26. *Marzoli A., Renne P.R., Piccirillo E.M. et al.* Extensive 200-Million-Year-Old Continental Flood Basalts of the Central Atlantic Magmatic Province // *Science*. 1999. V. 284. № 5414. P. 616–618.
27. *McCabe H.R., Bannatyne R.B.* Lake St. Martin cryptoejection crater and geology of the surrounding area // *Geol. Surv. of Manitoba, Geological Paper*. 1970. V. 3. № 70. 79 p.
28. *McElwain J.C., Beerling D.J., Woodward F.I.* Fossil Plants and Global Warming at the Triassic–Jurassic Boundary // *Science*. 1999. V. 285. № 1386. P. 1386–1390.
29. *Olsen P.* Giant Lava Flows, Mass Extinctions, and Mantle Plumes // *Science*. 1999. V. 284. № 5414. P. 604–605.
30. *Olsen P.E., Koeberl C., Hube H. et al.* Continental Triassic–Jurassic boundary in central Pangea: Recent progress and discussion of an Ir anomaly // *Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond* / Eds. Koeberl C., MacLeod K.G. Boulder. Colorado: Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. 2002. V. 356. P. 505–522.
31. *Onoue T., Sato H., Nakamura T. et al.* Deep-sea record of impact apparently unrelated to mass extinction in the Late Triassic // *PNAS*. 2012. V. 109. № 47. P. 19134–19139.
32. *Pálffy J., Mortensen J.K., Carter E.S. et al.* Timing the end-Triassic mass extinction: first on land, then in the sea? // *Geology*. 2000. V. 28. P. 39–42.
33. *Pálffy J., Zajzon N.* Environmental changes across the Triassic–Jurassic boundary and coeval volcanism inferred from elemental geochemistry and mineralogy in the Kendlbachgraben section (Northern Calcareous Alps, Austria) // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2012. V. 335–336. P. 121–134.
34. *Reimold W.U., Barr J.M., Grieve R.A.F., Durrheim R.J.* Geochemistry of the melt and country rocks of the Lake St. Martin impact structure, Manitoba, Canada // *Cosmochim. Acta*. 1990. V. 54. P. 2093–2111.
35. *Schoene B., Crowley J.L., Condon D.C. et al.* Reassessing the uranium decay constants for geochronology using ID-TIMS U–Pb data // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2006. V. 70. P. 426–445.
36. *Schoene B., Guex J., Bartolini A. et al.* Correlating the end-Triassic mass extinction and flood basalt volcanism at the 100 ka level // *Geology*. 2010. V. 38. № 5. P. 387–390.
37. *Sepkoski J.J., Jr.* Mass extinction in the Phanerozoic oceans: A review // *Geol. Amer. Spec. Paper*. 1982. V. 190. P. 283–289.
38. *Sepkoski J.J., Jr.* Global bioevents and the question of periodicity // *Global bio-events* / Ed. Walliser O.H. Berlin: Springer-Verlag, 1986. P. 47–61.
39. *Simms M.J.* Uniquely extensive soft-sediment deformation in the Rhaetian of the UK: Evidence for earthquake or impact? // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2007. V. 244. № 1–4. P. 407–423.
40. *Spray J.G., Kelley S.P., Rowley D.B.* Evidence for a late Triassic multiple impact event on Earth // *Nature*. 1998. V. 392. P. 171–173.
41. *Stearns R.G., Wilson C.W., Tiedemann H.A. et al.* The Wells Creek structure, Tennessee // *Shock Metamorphism of Natural Materials* / Eds. French B.M., Short N.M. Baltimore: Mono Book Corporation, 1968. P. 323–338.
42. *Tanner L.H., Lucas S.G., Chapman M.G.* Assessing the record and causes of Late Triassic extinctions // *Earth-Science Reviews*. 2004. V. 65. № 1–2. P. 103–139.
43. *Van de Schootbrugge B., Bachan A., Suan G. et al.* Microbes, mud and methane: cause and consequence of recurrent early Jurassic anoxia following the end-Triassic mass extinction // *The Palaeontological Association. Palaeontology*. 2013. P. 1–25. doi: 10.1111/pala.12034
44. *Ward P.D., Haggart J.W., Carter E.S. et al.* Sudden productivity collapse associated with the Triassic–Jurassic boundary mass extinction // *Science*. 2001. P. 1148–1151.
45. *Williford K.H., Foriel J., Ward P.D., Steig E.J.* Major perturbation in sulfur cycling at the Triassic–Jurassic boundary // *Geology*. 2009. V. 37. № 9. P. 835–838.

Abiotic Causes of the Great Mass Extinction of Marine Biota at the Triassic–Jurassic Boundary

M. S. Barash

In the interval of Triassic–Jurassic boundary 80% of the marine species became died. The basic hypotheses about the causes of this mass extinction are considered. “Trigger” of the extinction was a powerful outflow of the basalts in the Central Atlantic Magmatic Province. Moreover, a number of impact craters was found. Under the influence of space reasons two basic sequences of events have developed: earthly sequence, leading to a powerful volcanism and space sequence – the impact-events. They have caused similar effects: the emission of harmful chemical compounds and aerosols. Greenhouse effect, darkening of the atmosphere, which prevented photosynthesis, ocean stagnation, and anoxia arose. Biological productivity decreased, food chains collapsed. As a result, all the vital processes were violated, and extinction of the significant part of biota took place.