

УДК 551.583

РОЛЬ КОЛЕБАНИЙ CO₂ В ЭВОЛЮЦИИ КЛИМАТА И БИОТЫ

В. А. Красилов

Колебания CO₂ объясняются главным образом ее перераспределением между литосферным, океаническим, биотическим и атмосферным резервуарами. Отставание колебаний CO₂ от климатических указывает на температуру как ведущий фактор. Наиболее крупные аномалии CO₂ обусловлены нарушениями гидрологического цикла. Концентрация атмосферной CO₂ предположительно стабилизируется на трех уровнях: 0,200—0,280% для холодной, 0,280—0,350 для умеренной и 0,350—0,600% для теплой биосферы с амплитудой колебаний около 25—35%, максимальной в теплой биосфере. По смещениям южной границы зоны широколиственных лесов и их ископаемых аналогов построена климатическая кривая для позднего девона — миоцена, в основных чертах соответствующая крупным эвстатическим циклам. Относительно краткие «азональные» интервалы совпадают с черносланцевыми событиями или непосредственно следуют за ними. Стирание зональных границ может быть связано с более чем двукратным повышением уровня CO₂, уменьшающим зависимость растительности от распределения атмосферных осадков. Колебания CO₂ могли сыграть определенную роль в избирательном вымирании организмов, наиболее чувствительных к рН среды.

Возросший в последнее время интерес к проблемам климатологии связан с предполагаемым изменением глобального климата в результате техногенных выбросов парниковых газов, главным образом CO₂ и CH₄, которые уже в ближайшие десятилетия могут вызвать существенное повышение среднеглобальной температуры. Выдвинутая около 100 лет назад и тогда не привлекавшая большого внимания парниковая гипотеза стала предметом международных соглашений с далеко идущими политическими и экономическими последствиями. К ее изучению были привлечены большие коллективы климатологов. Не осталась в стороне и палеоклиматология, от которой ждали (и как будто получили) подтверждения ведущей роли парникового эффекта в глобальных климатических изменениях. Однако критический анализ данных выявляет возможность иной интерпретации климатических событий современности и геологического прошлого [8].

CO₂ модели

Модели эволюции климата можно подразделить на однофакторные и многофакторные. Первые рассматривают светимость Солнца, орбитальные циклы, вулканизм, альbedo или CO₂ — в качестве решающего фактора, отводя остальным в лучшем случае роль модуляторов. Вторые исходят из системного взаимодействия нескольких или многих факторов с позитивными и негативными обратными связями. В палеоклиматологии от зарождения этой науки и по сей день господствуют однофакторные модели, подкупающие своей простотой и определенностью. Парадокс, отмеченный еще М. Шварцбахом [12], заключается в том, что действием любого фактора, взятого в отдельности, можно в принципе объяснить развитие оледенений и другие глобальные события. Но если мы хотим выбрать между альтернативными моделями путем детального сопоставления с хронологической последовательностью событий, то ни одна из них не выдерживает проверки. Так, в недавнем варианте модели аэрозольных климатических катастроф [1] постули-

руется падение среднеглобальной температуры на 5—10 °С и более в результате взрывных извержений, мощность которых по своеобразной интерпретации статистических закономерностей «будет увеличиваться при возрастании рассматриваемого интервала времени». В качестве возможного примера приводится извержение вулкана Санторин в

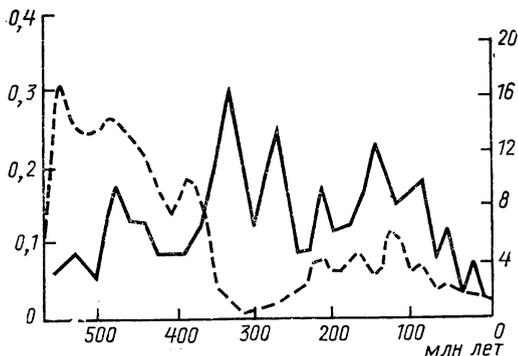


Рис. 1. Сопоставление графиков изменения концентрации CO_2 в фанерозое: сплошная линия — по [2], на оси ординат слева объемная концентрация в процентах, пунктир — по [15], на оси ординат справа доли от современного содержания

XV в. до н. э., якобы вызвавшее гибель крито-микенской цивилизации (в XI в. до н. э.) и «тьму египетскую», упомянутую в Библии (т. е. одну из «казней», поразивших Египет в XII в. до н. э.).

Поскольку извержения сопровождаются выбросами CO_2 , то аэрозольная модель (вулканизм — похолодание) входит в противоречие с CO_2 -моделями, среди которых у нас наиболее известна модель М. И. Будыко, в наиболее разработанном варианте [2] дающая расчетные концентрации атмосферной CO_2 для геологических периодов от кембрия до неогена по объемам карбонатных

пород (рис. 1). В этой модели карбонатакопление — сток CO_2 — компенсируется вулканизмом — приток CO_2 . Установлена прямая корреляция между объемами карбонатных и вулканогенных пород. Четырехкратное сокращение атмосферной CO_2 в современную эпоху по сравнению со средней для фанерозоя объясняется затуханием вулканизма — сквозной тенденцией геологической эволюции, в свою очередь связанной с уменьшением радиоактивности как источника эндогенного тепла.

Отметим, что существует альтернативный источник эндогенного тепла — диссипация кинетической энергии ротационных процессов [7], и что «затухание вулканизма» — скорее всего результат последовательного сокращения объемов морских отложений и связанных с ними подводных вулканитов, сохранившихся на современных континентах. Во всяком случае самые крупные пики наземного вулканизма — гигантской мощности трапповые формации перми-триаса (Восточная Сибирь), раннего мела (Парана) и мел-палеогенового рубежа (Декан) не нашли отражения в модельных расчетах.

При всех ее несомненных достоинствах модель [2] не объясняет колебаний CO_2 : если эффекты карбонатакопления и вулканизма компенсируются, то колебаний не должно быть. Причиной сокращения CO_2 теоретически могло быть не «затухание вулканизма» как таковое, а возрастающая декомпенсация объемов карбонатов и вулканитов, которая, однако, осталась за рамками модельных расчетов.

В хронологическом плане результаты CO_2 -модели для палеозоя и раннего мезозоя прямо противоположны палеоклиматическим: температурный пик в ранней перми соответствует максимальному оледенению, спад в поздней перми и раннем триасе — теплой биосфере с ослабленной широтной зональностью, пик в середине триаса — началу широтной дифференциации мезозойской биоты. Термическая история юрского периода по CO_2 -модели выглядит как неуклонное повышение температуры, по палеоклиматическим данным — как похолодание в середине

периода между температурными пиками ранней и поздней эпох. Расчетная концентрация атмосферной CO_2 одинакова для палеоцена и миоцена (0,076), а в олигоцене ниже современной (0,032 и 0,034% соответственно).

Чаще используемая в последние годы модель Р. А. Бернера [15] относится к числу балансных и представляет собой математически упрощенный вариант модели БЛАГ (Бернера — Ласаги — Гаррелса) для современной ситуации с добавлением ряда переменных, характеризующих тектоническую и биологическую эволюцию: площадь суши, скорость и глубину накопления карбонатов и органического вещества, дегазацию, речной сток, продуктивность биоты и др. По обилию и разнообразию привлеченной информации эта модель представляет собой уникальное явление в палеоклиматологии.

Концентрации CO_2 в атмосфере рассчитаны как обратная функция ее расхода на выветривание силикатных пород, скорость которого соответствует разнице скоростей стока в карбонатах и погребенной органике и притока за счет метаморфической и вулканической дегазации этих пород.

Колебания CO_2 , по модели [15], возникают в результате декомпенсации этих процессов, которая может проявиться лишь в течение сотен миллионов лет. Поэтому, как подчеркивает Бернер, модель пригодна для выявления длительных трендов, а не кратковременных колебаний. Это обстоятельство ограничивает возможность палеоклиматической проверки. Можно отметить лишь совпадение главных минимумов CO_2 с оледенениями в позднем палеозое и кайнозое. Однако анализ модели показывает, что это совпадение не может служить убедительным доводом в пользу зависимости климата от содержания CO_2 в атмосфере. Дело в том, что скорость дегазации рассчитана по скорости спрединга, а эта последняя — по колебаниям уровня моря (связь между ними представляется весьма проблематичной, но это отдельный вопрос). В результате предполагаемые колебания CO_2 повторяют колебания уровня моря, которые сами по себе дают значительный климатический эффект (см. ниже).

Попытки опытной проверки модели основаны на зависимости фотосинтетического фракционирования изотопов углерода наземными растениями и фитопланктоном от содержания CO_2 , позволяющей реконструировать это последнее по изотопному составу углерода морских и почвенных карбонатов [16, 17]. Результаты указывают на высокое содержание CO_2 в атмосфере палеозоя (в частности, ордовика — периода обширных оледенений) и мелового периода, частью укладываясь в очень широкие пределы неопределенности модели Бернера, частью (для юры и кайнозоя) выходя за эти пределы. Устьичный индекс листьев (обратно связанный с содержанием атмосферной CO_2) указывает (вопреки модели) на уровень и амплитуду колебаний CO_2 в миоцене, сопоставимые с современными [23]. Эти результаты едва ли можно считать подтверждением зависимости климата от CO_2 .

Регуляция CO_2

Содержание двуокиси углерода регулируется множественными связями в системе литосфера — океан — биота [9]. Литосферный резервуар содержит больше CO_2 , чем остальные, вместе взятые, океан в 80 раз и биота-гумус в три раза больше, чем атмосфера. При таких соотношениях приток CO_2 в атмосферу из дополнительного источника (вулканического, техногенного) может быть уравновешен перераспре-

делением этого газа между основными резервуарами. Вопрос лишь в том, насколько быстро произойдет компенсация. Основное значение имеют три планетарных цикла CO_2 — геохимический, гидрологический и биологический.

Геохимический цикл имеет на входе химическое выветривание силикатных пород (реакция Юри) с выносом ионов Ca^{++} , Mg^{++} и HCO_3^- в океан, где они осаждаются в виде карбонатов, ежегодно связывая около 100 млн т углерода. Возврат CO_2 в атмосферу происходит при термическом разложении карбонатов, вовлеченных в магматические и метаморфические процессы. Поскольку общая продолжительность цикла измеряется миллионами лет, кратковременные колебания геохимического стока CO_2 не уравниваются ее притоком из недр. Основной фактор, определяющий интенсивность химического выветривания, — температура. Дополнительное значение имеют растительный покров, почвообразование (гуминовые кислоты увеличивают скорость выветривания в несколько раз), общая площадь суши, речной сток и скорость карбонатонакопления. Все эти факторы так или иначе связаны с температурой.

Биологический цикл заключается в потреблении CO_2 фотосинтетиками, накоплении органического вещества в биомассе, мортмассе, гумусе, горных породах и возврате CO_2 в атмосферу с дыханием, биохимическим разложением органического вещества, термическим разложением и выветриванием органогенных пород. Увеличение содержания CO_2 в приземной атмосфере повышает скорость ассимиляции и соответственно биологическую продуктивность, включая механизм негативной обратной связи. Вместе с тем фотосинтез у наземных растений и фитопланктона имеет температурный оптимум, который видоспецифичен, но может совпадать у видов одного сообщества. Регуляторная роль древесной растительности в отношении атмосферной CO_2 зависит от скорости роста, которая у тропических деревьев выше, чем у доминантов умеренной лесной зоны, а также от содержания лигнина, замедляющего разложение растительных тканей (хотя моховой и травянистый покровы по продуктивности не уступают древесному ярусу, они не образуют долговременных резервуаров CO_2). Деструктивные процессы также зависят от температуры, которая, таким образом, играет решающую роль и в биохимическом цикле.

Гидрологический цикл можно схематически представить как систему даунвеллингов и апвеллингов, где в современном психросферном варианте циркулирует около 50 млрд т CO_2 . Холодные глубинные воды, формирующиеся в Северной Атлантике и у берегов Антарктиды, поглощают CO_2 и возвращают ее атмосфере в низкоширотных апвеллингах. Наряду с этим в эвапоритовых бассейнах с лагунным режимом (приток поверхностных — отток глубинных вод) формируются глубинные водные массы высокой солености, роль которых в безледниковые эпохи могла быть более значительной.

Эффективность гидрологического цикла как регулятора атмосферной CO_2 определяется соотношением циркуляционных режимов и скоростью распространения глубинных вод, в свою очередь зависящих от температуры поверхностных вод, их опреснения речным стоком или таянием льдов, экваториально-полярного температурного градиента, уровня моря и других факторов.

Характер регуляции с преобладанием негативных обратных связей позволяет предположить, что уровень CO_2 стабилизирован в пределах автономных колебаний системы. Аномалии, возникающие при нарушении одного из циклов, снимаются серией затухающих колебаний. Гид-

рологический цикл, по-видимому, наименее устойчив из-за слабого развития обратных связей между уровнем CO_2 и циркулирующей водных масс.

Поскольку температурный фактор играет ведущую роль во всех трех циклах, наиболее значительные аномалии CO_2 могут быть вызваны температурными воздействиями. Иначе говоря, не CO_2 изменяет температуру, а температура изменяет уровень стабилизации CO_2 , который в свою очередь формирует температурные колебания по схеме: температура — CO_2 — температура. Сейчас уже накоплено достаточно данных для проверки этих предположений.

Современная ситуация

Менее половины техногенной CO_2 остается в атмосфере, что свидетельствует об эффективности стабилизирующих механизмов. Линейный рост объема техногенных выбросов с 90-х годов прошлого века не вызвал адекватного изменения температуры. Между сопоставимыми по амплитуде температурными пиками 40-х и 80-х годов произошло значительное похолодание. Нет серьезных оснований говорить о наблюдаемом уже сейчас форсировании температурных изменений вследствие парникового эффекта, поскольку амплитуда температурных колебаний не выше, чем в доиндустриальный период.

Выявлена достоверная корреляция между содержанием атмосферной CO_2 и Эль-Ниньо — распространением аномально теплых поверхностных вод в Тихом океане, происходящем с периодичностью в четыре-пять лет и оказывающем заметное воздействие на глобальный климат. В начале Эль-Ниньо концентрация CO_2 в атмосфере уменьшается, затем возрастает. Амплитуда этих колебаний превышает суммарный объем техногенных выбросов [22]. Показано, что колебания CO_2 запаздывают по отношению к изменениям температуры поверхностных вод и воздуха [19]. Значение этих данных состоит в том, что они проясняют характер причинно-следственных связей в системе CO_2 — температура, указывая на температурное форсирование колебаний CO_2 (а не наоборот, как принято думать). Далее, они подтверждают роль гидрологического цикла как основного регулятора и в то же время (при нарушениях) источника аномалий атмосферной CO_2 .

Волновые колебания CO_2 в связи с Эль-Ниньо, вероятно, объясняются подавлением низкоширотных апвеллингов уже на первой стадии (минимум CO_2) с последующим широким распространением теплых поверхностных вод (максимум CO_2). Аналогичные явления, несомненно, происходили и в геологическом прошлом.

Холодная биосфера

Полученные в последние годы данные о составе атмосферы прошлого по пузырькам воздуха из раздавленных в вакууме кернов гренландских и антарктических льдов охватывают период в 160 тыс. лет. Основные результаты этих исследований [21] сводятся к тому, что разница в концентрации атмосферной CO_2 для последнего оледенения и голоцена составляет 25—30% (около 200 и 280 частей на миллион соответственно). Для предшествующих оледенений и межледниковий определены колебания того же порядка. Они обнаруживают достоверную корреляцию с орбитальными циклами порядка 20 000 лет и соответствующими им температурными колебаниями. В то же время изменения CO_2 систематически отстают от температурных на сотни и даже тысячи лет.

Эти данные хорошо согласуются с выводами, сделанными на основании динамики CO_2 во время Эль-Ниньо, хотя механизм колебаний мог быть иным. Соотношение скоростей изменения изотопного состава углерода и кислорода косвенно свидетельствует о том, что атмосферные события опережали гляциостатические колебания уровня моря. Это, однако, не исключает форсирования колебаний CO_2 при опреснении поверхностных вод.

Характерно, что амплитуда колебаний CO_2 в плейстоцене того же порядка или несколько выше, чем в современную эпоху (около 25% между доиндустриальным и современным уровнями, 280 и 355 частей на миллион соответственно). В позднем миоцене амплитуда колебаний CO_2 , рассчитанная по устьичному индексу [23], совпадает с плейстоценовой, а нижний и верхний уровни — с доиндустриальным и современным соответственно.

Таким образом, мы имеем два уровня стабилизации CO_2 (с аналогичными колебаниями): для «холодной» биосферы с обширными оледенениями и для «умеренной» биосферы с ограниченным развитием полярных оледенений.

Теплая биосфера

Состояние биосферы в меловом периоде обычно рассматривается как наиболее типичное для безледникового климата. Климатическая кривая с температурными пиками в берриасе, апте, позднем сеномане — раннем туроне и кампане (рис. 2), построенная автором по палеоботаническим данным [5, 18], в значительной мере совпадает с реконструкциями исследователей [3, 13, 25], использующих другие методы (расхождения относятся главным образом к интерпретации событий на рубеже мела и палеогена).

Примечательно, что наземным температурным пикам соответствуют черносланцевые интервалы в разрезах морских отложений, наиболее отчетливые в берриасе, апте и сеноман-туроне, менее постоянно, но все же широко представленные в кампане [6].

Эти хронологические совпадения недвусмысленно указывают на связь между океаническими событиями и эволюцией климата. Черносланцевые события в чистом виде — это бескарбонатные кремнистые интервалы в преимущественно карбонатных разрезах. Меловые карбонаты содержат меньше магния, чем юрские, что свидетельствует о нейтральной среде со значениями рН около 6,8—7. Черносланце-

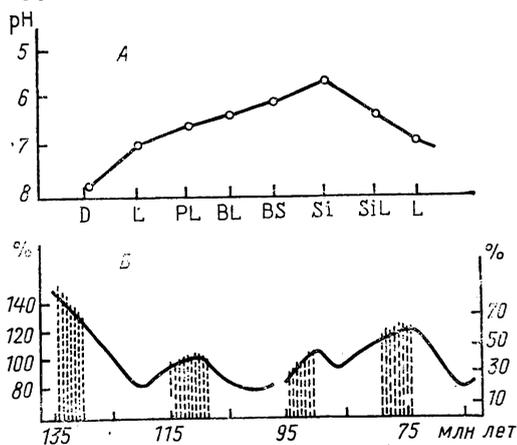


Рис. 2. Черносланцевые эпизоды и климатические изменения в меловом периоде: А — предполагаемое изменение концентрации CO_2 (рН среды осадконакопления и диагенеза) в ряду доломиты (D), известняки (L), фосфоритовый мел (PL), черные битуминозные известняки (BL), черные сланцы (BS), кремнистые сланцы (Si), кремнистые известняки (SiL), известняки (L); Б — температурные колебания по палеоботаническим показателям — цикадофитовому индексу (слева) и содержанию целнокрайних листьев (справа), по [5, 18]. Точками показаны главные черносланцевые эпизоды

вые фации формировались в более кислой среде. Окремнение в ряде случаев происходило в результате снижения рН под воздействием гидротерм. Промежуточные варианты представлены черными битуминозными известняками и мергелями, кремнистыми известняками, фосфоритовым мелом. Изменение концентрации CO_2 в этом фациальном ряду (рис. 2) приблизительно соответствует колебаниям рН, которые, по-видимому, имели катастрофические последствия для чувствительных к подкислению организмов. Вымирание доминировавших в поздней юре и начале мела инфузориевых (кальционелловых) и бухиевых сообществ, замещение зеленых водорослей красными, возможно, объясняется этим фактором.

Ассоциация черносланцевых фаций с фосфоритами в ряде случаев свидетельствует о развитии апвеллингов. Вместе с тем широкое распространение аноксии в меловых океанах хронологически соответствует трансгрессиям и увеличению речного стока с наземным органическим веществом [6], что позволяет предположить подавление психросферной циркуляции притоком соленых глубинных вод из эпиконтинентальных морей и опреснением поверхностных вод. Эти явления, по существу, аналогичны Эль-Ниньо, но в иных масштабах времени: черносланцевые циклы по продолжительности сопоставимы с орбитальными циклами в 20 000 лет [20].

Действительно, есть косвенные свидетельства колебаний атмосферной CO_2 соответствующих временных масштабов. В частности, изучение озерных отложений Забайкалья, содержащих пресноводные черносланцевые горизонты, показало периодические колебания численности наиболее чувствительных к подкислению насекомых, особенно хирономид и веснянок, вплоть до полного выпадения последних из озерной фауны. Аналогичные явления в современных озерах связаны с «кислотными дождями», понизившими рН приблизительно на единицу (в результате кислотообразующих выпадений были утрачены рыбные запасы озер Скандинавии и Британских островов, резко сократилась численность водных насекомых и питающихся ими птиц).

Вымирание в середине мела, в отличие от терминального мелового и всех последующих вымираний того же масштаба, затронуло в первую очередь пресноводные организмы и фауну насекомых в целом [4], что недвусмысленно указывает на рН-катастрофу.

По почвенным карбонатам определено шестикратное превышение уровня CO_2 в атмосфере мелового периода над современным [16]. Однако большой массив кутикулярно-эпидермальных данных показывает, что растения адаптировались к изменениям уровня CO_2 изменением частоты устьиц, эффективным в пределах 200—400 частей на миллион, и лишь в берриасе установлено изменение размеров устьиц беннетитов [24] — весьма консервативного признака, возможно, свидетельствующее о превышении этих пределов [23].

Колебания в фанерозе

О климатических изменениях в масштабах геологических эр и периодов трудно судить по палеоэкологическим или геофизическим показателям мгновенных значений температуры. Правильнее, по-видимому, использовать показатели, скорость изменения которых сопоставима с климатической эволюцией в масштабах геологического времени. Одним из таких показателей может быть положение границ крупных фитогеографических подразделений, в частности южной границы зоны летне-

зеленых широколиственных лесов и их ископаемых аналогов (феникопсисовых лесов в мезозое, войновскиевых в позднем палеозое, археоптериевых в девоне). На рис. 3 показано смещение этой границы по данным из ряда источников [6, 10, 11], символизирующее долговременные колебания среднеглобальной температуры (можно перейти на температурную шкалу, принимая смещение границы на 200—300 км адекватным изменению температуры на 1°C). Эта кривая практически совпадает с долговременными колебаниями уровня моря (рис. 3), причинная связь которых с изменениями климата подтверждается и другими показателями. Обширные трансгрессии, сокращая площадь суши, уменьшают геохимический сток атмосферной CO₂ — выветривание силикатных пород. Однако более существенное значение имеет уменьшение альbedo земной поверхности. По данным Н. А. Ясаманова [14], средние значения альbedo изменялись в течение фанерозоя от 0,21 до 0,33, что приблизительно соответствует амплитуде колебаний среднеглобальной температуры около 6°C.

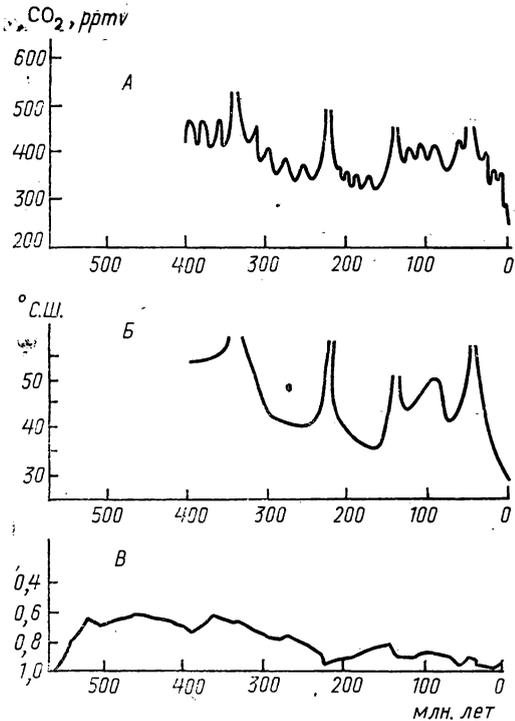
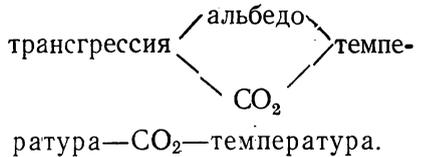


Рис. 3. Гипотетическая кривая колебаний CO₂ в сопоставлении с климатическими и эвстатическими событиями: А — три уровня стабилизации атмосферной CO₂ (в частях на миллион, ppmv) с колебаниями в пределах 30% и отдельными пиками, соответствующими «азональным» эпизодам на следующем рисунке; Б — смещение южной границы широколиственных лесов и их ископаемых аналогов в градусах северной широты. Кривая прервана «азональными» эпизодами; В — изменение площади суши относительно современной, по [15]

палеоцене, в течение которых широтная зональность была ослаблена вплоть до практической неразличимости границ. Эти ситуации невозможно объяснить одними колебаниями температуры, так как фитогеографическая зональность определяется также количеством и сезонным распределением атмосферных осадков. Поскольку этот фактор действовал постоянно, остается предположить меньшую чувствительность к нему растительности «азональных» периодов. Известно, что повышение уровня CO₂ сокращает потребление воды растениями, дает относительную независимость от условий увлажнения. Для достижения азонального эффекта уровень атмосферной CO₂ должен быть по крайней мере в два раза выше современного.

Мы можем теперь записать:



На фоне относительной стабильности фитогеографических границ выделяются интервалы — в раннем карбоне, раннем триасе, позднем

Рис. 3 суммирует в полуколичественной форме изложенные в этом и предыдущих разделах представления о колебаниях CO_2 в течение геологического времени. Показаны три уровня стабилизации — для «холодной», «умеренной» и «теплой» биосферы с наибольшей амплитудой кратковременных колебаний в последней, а также всплески в «зональные» периоды, которым обычно предшествует широкое распространение фосфоритовых и черносланцевых фаций.

Значение колебаний CO_2 для биологической эволюции, по-видимому, не сводится к их вкладу в температурные условия, поскольку для многих организмов более существенны изменения рН среды обитания. Избирательный характер массовых вымираний в начале и середине мела, на рубеже девона и карбона, венда и кембрия, возможно, указывает на рН-катастрофы в водной среде, которым соответствуют или за которыми непосредственно следуют более или менее отчетливые колебания наземного климата. Более детальный анализ этой проблемы требует привлечения всей совокупности данных по соответствующим интервалам геологического времени.

В настоящей статье изложены некоторые результаты разработок по проектам 6.5.4 ГНТП «Глобальные изменения природной среды и климата» и «Теплая биосфера» Российского фонда фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М. И., Голицын Г. Р., Израэль Ю. А. Глобальные климатические катастрофы. М., 1986. 159 с.
2. Будыко М. И., Ронов А. Б., Яншин А. Л. История атмосферы. Л., 1985. 209 с.
3. Вахрамеев В. А. Климаты Северного полушария в меловом периоде и данные палеоботаники//Палеонтол. журн. 1978. № 2. С. 3—17.
4. Жерихин В. В. Развитие и смена меловых и кайнозойских фаунистических комплексов. М., 1978. 198 с.
5. Красилов В. А. Альб-сеноманская флора междуречья Качи и Бодрака (Крым)//Бюл. МОИП. Отд. геол. 1984. Т. 59, вып. 4. С. 104—112.
6. Красилов В. А. Меловой период. Эволюция земной коры и биосферы. М., 1985. 240 с.
7. Красилов В. А. Очерк ротационной геодинамики//Тихоокеан. геол. 1991. № 1. С. 89—95.
8. Красилов В. А. Климатические изменения: предотвратить или приспособиться?//Природа. 1992. № 5. С. 66—70.
9. Красилов В. А. Охрана природы. Принципы, проблемы, приоритеты. Казань, 1992. 173 с.
10. Красилов В. А., Шорохова С. А. Триасовые геофлоры и некоторые общие принципы палеофитогеографии//Ископ. флоры Дальнего Востока. Владивосток, 1975. С. 7—16.
11. Палеозойские и мезозойские флоры Евразии и фитогеография этого времени//Вахрамеев В. А., Добрускина И. А., Заклинская Е. Д. и др. М., 1970. 424 с.
12. Шварцбах М. Климаты прошлого. М., 1955. 281 с.
13. Ясаманов Н. А. Палеотермометрия юрского, мелового и палеогенового периодов некоторых районов СССР//Бюл. МОИП. Отд. геол. 1980. Т. 55, вып. 3. С. 117—125.
14. Ясаманов Н. А. Принципы климатических колебаний в фанерозое//Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1991. № 1. С. 20—35.
15. Berner R. A. Atmospheric carbon dioxide levels over Phanerozoic time//Science. 1990. Vol. 249. P. 1382—1392.
16. Cerling T. Carbon dioxide in the atmosphere: evidence from Cenozoic and Mesozoic paleosols//Am. J. Sci. 1991. Vol. 291. P. 377.
17. Freeman K. H., Hayes J. H. Fractionation of carbon isotopes by phytoplankton and estimates of ancient CO_2 levels//Global Biochemical Cycles. 1992. Vol. 6. P. 185.
18. Krassilov V. A. Climatic changes in eastern Asia as indicated by fossil floras. 1. Early Cretaceous. 2. Late Cretaceous and Danian//Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 1973. Vol. 13. P. 261—273; 1975. Vol. 17. P. 157—172.

19. Marston J. B., Oppenheimer M., Fajita R. H. et al. Carbon dioxide and temperature//*Nature*. 1991. Vol. 348. P. 573—574.
20. McCave J. Depositional features of organic carbon-rich black and green mudstones at DSDP sites 386 and 387//Initial reports of the DSDP. Washington, 1974. Vol. 43. P. 411—416.
21. Raynaud D., Jourzel J., Barnola J. M. et al. The ice record of greenhouse gases//*Science*. 1993. Vol. 259. P. 926—934.
22. Siegenthaler U. El Niño and atmospheric CO₂//*Nature*. 1990. Vol. 345. P. 295—296.
23. Van Der Burgh J., Visscher H., Dilcher D. L. et al. Paleatmospheric signatures in Neogene fossil leaves//*Science*. 1993. Vol. 260. P. 1788—1790.
24. Watson J., Sincock C. A. Bennetites of the English Wealden//*Palaeontographical. Soc. Publ.* 1991. N 558. 228 p.
25. Wolfe J. A., Upchurch G. R. Jr. North American nonmarine climates and vegetation during the Late Cretaceous//*Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1987. Vol. 61. P. 33—77.

Палеонтологический ин-т РАН
Москва

Поступила в редакцию
06.04.94

ROLE OF CO₂ FLUCTUATION IN EVOLUTION OF CLIMATE AND BIOTA

V. A. Krassilov

Atmospheric CO₂ fluctuations seem to have been caused by redistribution between the lithospheric, oceanic, biotic and atmospheric reservoirs. A lag in the CO₂ signal relative to climatic change points to temperature as a leading factor. Large CO₂ anomalies could be related to abrupt disturbances of oceanic circulation systems. Three standard CO₂ levels are postulated for the «cold» (200—280 ppmv), «moderate» (280—350 ppmv) and «warm» (350—600 ppmv) biosphere-states with short-term fluctuations of about 25—30%. Long-periodical climatic changes are symbolized by the shifts of the broadleaf deciduous forest zone which correspond to the major eustatic cycles. Short intervals of «azonal» vegetation patterns tend to coincide or immediately follow oceanic anoxic events. Azonality suggests high CO₂ levels decreasing plant dependence on precipitation. Major CO₂ fluctuations might contribute to selective extinction of the most pH-sensitive organisms.