БИОФИЗИКА, 2001, том 46, вып.6, с.1138-1149

ДИСКУСИИ

УДК 577.3

РОЛЬ БИОСФЕРЫ В ФОРМИРОВАНИИ КЛИМАТА ЗЕМЛИ. ПАРНИКОВАЯ КАТАСТРОФА

2001 г. А.В. Карнаухов

Институт биофизики клетки РАН, 142290 Пущино Московской области e-mail: akarn@icb.psn.ru

Поступила в редакцию 27.04.01 г.

Проанализирована роль процессов в живой и неживой природе, определяющих формирование химического состава атмосферы и температурного баланса Земли. Сделан вывод о недостаточности биосферных механизмов изъятия CO_2 из атмосферы при современной техногенной ситуации и существовании потенциально опасных источников CO_2 в неживой природе, которые могут быть активизированы при повышении среднепланетарной температуры Земли. Показано, что устойчивость природных систем поддержания стабильности химического состава атмосферы нарушена вследствие разрушения человеком климатообразующих биоценозов, что может привести к необратимому изменению климата Земли, результатом которого станет повышение среднепланетарной температуры до 100-150^{0}С и выше. Это сделает невозможным существование жизни на нашей планете (по крайней мере, в её нынешней форме). Построена радиационно-адиабатическая модель парникового эффекта, в рамках которой получены асимптотические оценки повышения среднепланетарной температуры для широкого диапазона изменения концентрации парниковых газов. На базе этой модели построена интегральная модель изменения климата Земли, включающая учет тепловой инерции океана и аэрозольного загрязнения верхних слоев атмосферы. Показано, что необратимое (катастрофическое) изменение климата Земли (парниковая катастрофа) может произойти в относительно недалеком будущем, через 200-300 лет.

Ключевые слова: биоразнообразие, климатообразующие биоценозы, климат, моделирование, парниковый эффект, парниковая катастрофа, устойчивое развитие.

Климатическая система Земли включает в себя огромное число одновременно протекающих процессов. Эти процессы, идущие одновременно в живой и в неживой природе, имеют самую разную физическую природу и сильно отличаются как по энергетическим и пространственно-временным характеристикам, так и по степени их изученности. Казалось бы, задача моделирования климата, а тем более задача управления климатом, практически неразрешима. В нашей работе мы отказались от традиционного метода моделирования, когда исследователи с самого начала пытаются строить максимально подробные математические (численные) модели.

Предварительный анализ причинно-следственной структуры изучаемого явления оказался удивительно плодотворным применительно к задаче моделирования климата, поскольку позволил выстроить своеобразную "иерархию процессов" и обратных связей в системе, что, в свою очередь, позволило существенно упростить задачу уже на этапе собственно математического моделирования.

Переходя к изложению основных результатов, следует отметить, что подобный метод предварительного анализа причинно-следственной структуры явления может оказаться полезным не только на этапе моделирования, но и на этапе поиска путей оптимального управления сложными явлениями, включающими в себя большое число параллельно протекающих процессов.

РОЛЬ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ И ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЗЕМЛИ

Круговорот углерода. Недостаточность биологических механизмов удаления CO_2. На рис.1 показано количество углерода (в пересчете на см^2 земной поверхности) в различных геосферах Земли и интенсивность (скорость) его перехода между основными областями локализации, выраженная в единицах $= 10^{-6}$ г/см^2 в год [1].

Отметим факт значительной (на несколько порядков) недостаточности биологических механизмов изъятия CO_2 из атмосферы по отношению к его техногенному выбросу. Несмотря

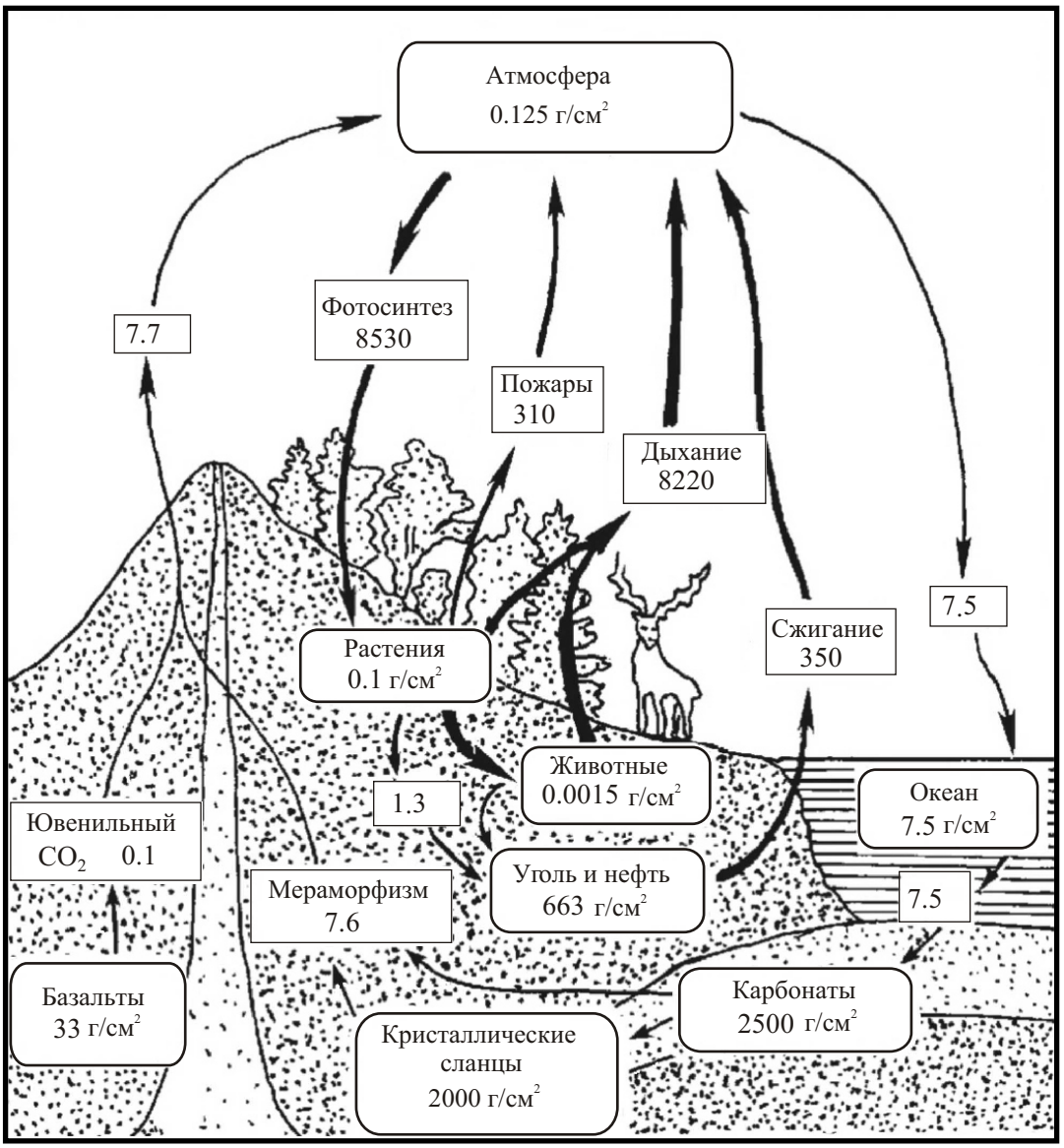

Рис. 1. Круговорот углерода ($= 10^{-6}$ г/см^2 в год).

на то, что общая продукция органических веществ в результате фотосинтеза 8530 (в пересчете на углерод) значительно выше уровня техногенного выброса CO_2 350 , большая часть органического углерода, благодаря процессам дыхания, гниения, пожарам и т. д., снова возвращается в атмосферу в виде CO_2. Разница между биогенным связыванием (фотосинтез + образование карбонатов) CO_2 и выделением связанного в результате фотосинтеза CO_2 (дыхание, пожары и т.п.) невелика и составляет всего 8.8 , что почти в 50 раз меньше уровня техногенного выброса CO_2 в атмосферу. К сожалению, во многих публикациях (особенно в научно-популярных) сравниваются величины общей продукции органических веществ в результате фотосинтеза и техногенного выброса CO_2, что создает иллюзию тривиальной обратимости современных изменений в атмосфере Земли.

Была проанализирована роль различных биоценозов в долговременном извлечении CO_2 из атмосферы. Вопреки достаточно распространенному мнению, что "лес - легкие планеты", оказалось, что роль биоценозов лесов в долговременном связывании CO_2 крайне мала, поскольку практически весь связанный благодаря

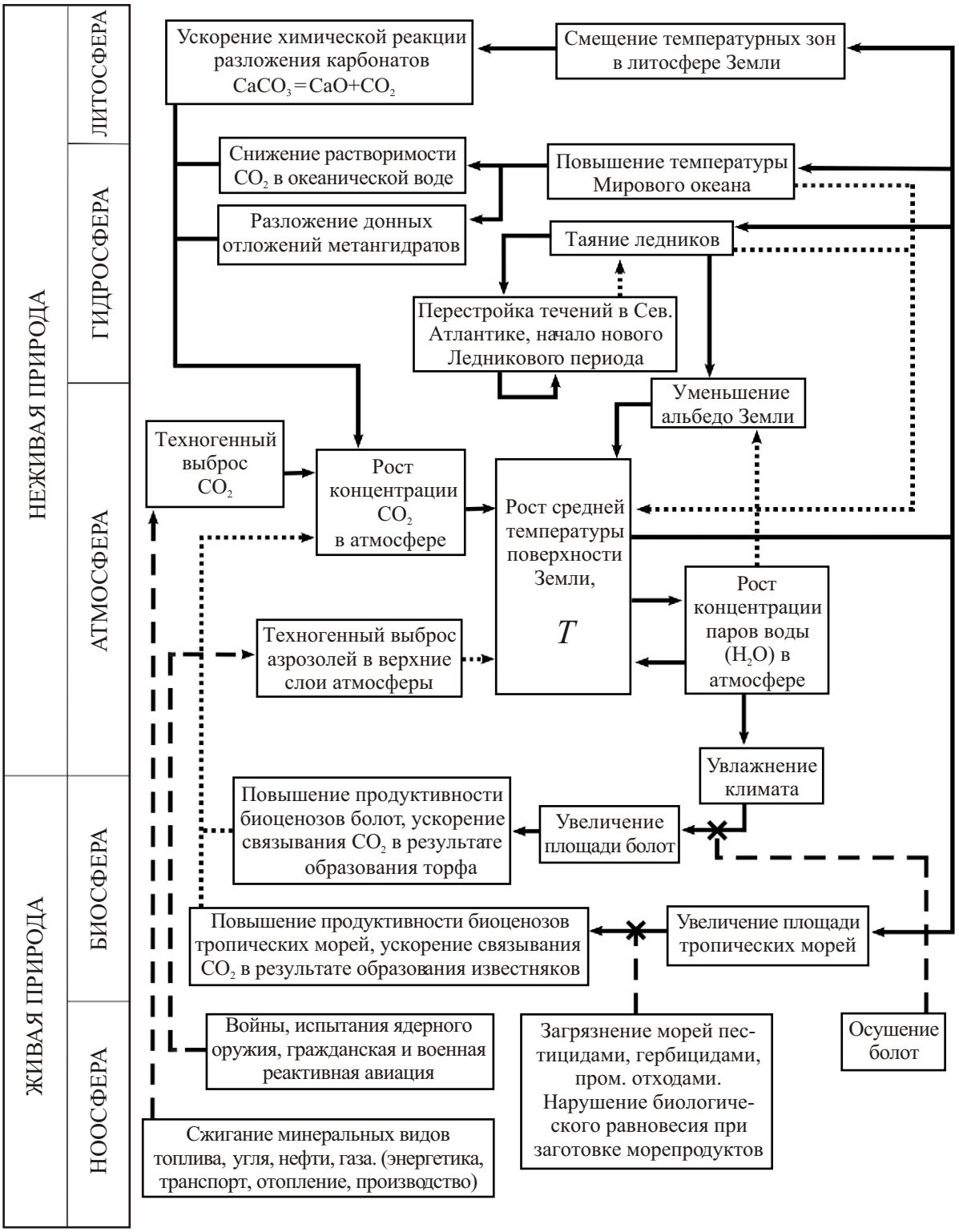

Рис. 2. Причинно-следственная диаграмма основных климатообразующих процессов.

фотосинтезу углерод возвращается в атмосферу в виде CO_2 вследствие процессов дыхания, гниения отмирающих листьев и древесины, а также лесных пожаров.

Для долговременного извлечения CO_2 из атмосферы необходимо, чтобы значительная часть связанного в результате процессов фотосинтеза углерода оказывалась недоступна для процессов окисления. Такие условия существу-

ют только в биоценозах болот и биоценозах тропических морей (см. рис. 2).

В биоценозах болот отмирающая растительность попадает в стоячую воду с крайне низким содержанием растворенного кислорода и накапливается там, практически не разлагаясь (частичное анаэробное разложение с образованием метана не меняет общей картины). Накапливающиеся в болотах частично разложившиеся остатки растительности образуют торфяные пласты, из которых впоследствии формируются месторождения бурого и каменного угля.

За последние 100 лет общая площадь болот на Земле сократилась почти в два раза и продолжает сокращаться в результате их осушения. Соответственно уменьшается количество извлекаемого из атмосферы CO_2. Следует отметить, что зачастую осушение болот сопровождается вымиранием эндемичных видов, приспособленных к существованию в определенных условиях конкретных болот, расположенных в конкретной климатической зоне. Поэтому восстановление площади болот связано сегодня не только с трудностью изъятия земель из сельскохозяйственного оборота, но и невозможностью восстановления в ряде случаев полноценных биоценотических сообществ.

В биоценозах тропических морей изъятие CO_2 из океанической воды, куда он попадает из атмосферы, происходит несколько иным образом. Углекислый газ используется в качестве "строительного материала" гетеротрофными организмами при образовании известковых раковин и чехлов. Практически все карбонаты земной коры (известняки, доломиты, мрамор, мел и т.д.) имеют биогенное происхождение. Среди наиболее важных климатообразующих видов отметим коралловые полипы и фораминиферовый планктон (всего около 80 видов).

К сожалению, состояние климатообразующих биоценозов тропических морей изучено слабо. Имеются разрозненные сведения о гибели коралловых рифов [2]. Систематический мониторинг состояния фораминиферового микропланктона не проводится, хотя можно предположить, что в результате сброса гербицидов и пестицидов в Мировой океан одним из наиболее уязвимых компонентов биоценоза тропических морей окажется именно фораминиферовый планктон.

Поскольку представляется маловероятным, что скорость биологических механизмов удаления CO_2 из атмосферы может увеличиться более чем в 50 раз (чтобы компенсировать техногенный выброс CO_2), был проведен анализ процессов в неживой природе, влияющих на концентрацию углекислого газа, с целью поиска механизмов, обеспечивающих устойчивость химического состава атмосферы, а значит, и устойчивость всей климатической системы нашей планеты.

Парниковая катастрофа. Роль природных (неантропогенных) источников CO_2. На рис. 2 изображена причинно-следственная диаграмма основных климатообразующих процессов. Стрелками обозначены причинно-следственные связи между процессами (черными - прямое действие; точками - обратное (тормозящее)). Стрелка, перечеркнутая крестом, обозначает причинно-следственную связь, существовавшую в прошлом, но разрушенную (или ослабленную) в результате антропогенного воздействия (пунктирные линии).

Анализ процессов в неживой природе не обнаружил там механизмов поддержания устойчивости химического состава атмосферы Земли (прежде всего, в отношении CO_2). Выявленные отрицательные обратные связи в системе "концентрация CO_2 - среднепланетарная температура" либо носили характер простого демпфирования, как, например, в случае растворения в водах Мирового океана дополнительного количества CO_2 при увеличении его концентрации в атмосфере или тепловой инерции Мирового океана, либо были относительно слабы, как в случае обратной связи "температура - влажность - альбедо". Необычная отрицательная обратная связь, связанная с перестройкой течений в Северной Атлантике, даже может привести к временному похолоданию на севере Евразии и в Америке (своеобразному микроледниковому периоду) [3-5], но на роль глобального стабилизирующего фактора ни одна из выявленных отрицательных обратных связей не подходила.

Зато оказалось, что в неживой природе существует немало процессов, реализующих сильную положительную обратную связь "концентрация CO_2 - среднепланетарная температура". По существу, эти процессы связаны с природными (неантропогенными) источниками поступления CO_2 в атмосферу, которые активизируются при повышении среднепланетарной температуры Земли (рис. 2). Среди таких источников особо следует выделить следующие:

1. Повышение температуры вод Мирового океана вслед за изменением среднепланетарной температуры Земли будет приводить к понижению растворимости углекислого газа (CO_2) в океанической воде. Излишек углекислого газа будет поступать в атмосферу. Поскольку в Мировом океане содержится примерно в 60 раз больше CO_2, чем в современной атмосфере, то

потенциально этот источник CO_2 представляет собой большую опасность.

2. Еще большее количество связанного CO_2 содержится в земной коре (почти в 50 000 раз больше, чем в атмосфере Земли и примерно столько же, сколько в атмосфере Венеры) в виде карбонатосодержащих пород (известняки, доломиты, мрамор, мел и т. д.). Разложение карбонатов как в результате смещения температурных зон из-за повышения температуры поверхности Земли, так и в результате воздействия человека на земную кору (подземные испытания ядерного оружия, бурение скважин и т. д.) может привести к выделению огромных количеств CO_2 в атмосферу.

3. Другим потенциально опасным природным источником CO_2 являются метан-гидратные комплексы на дне Мирового океана. Такие комплексы устойчивы только при высоком давлении и низких температурах. Повышение температуры придонных вод Мирового океана может привести к их разложению и поступлению в атмосферу значительных количеств метана и CO_2 (в результате окисления метана метанокисляющими бактериями и непосредственного окисления в верхних слоях атмосферы). Оценка количества углерода, находящегося в океанических метан-гидратах, составляет не менее 10 тыс. Гт , что более чем в 10 раз превышает количество атмосферного углерода.

4. Очень сильная положительная связь обусловлена ростом концентрации водяных паров (H_2O) в атмосфере в результате повышения среднепланетарной температуры Земли. Поскольку пары воды являются парниковым газом, рост их концентрации приводит к дальнейшему разогреву поверхности нашей планеты.

Как уже отмечалось, общим свойством вышеперечисленных потенциальных природных источников CO_2 является наличие сильной положительной обратной связи "температура - концентрация CO_2", что может привести к лавинообразному росту концентрации CO_2 в атмосфере даже при условии полного отказа от сжигания углеродсодержащего минерального топлива (уголь, нефть, газ). В условиях разрушения природных биосистем, участвующих в извлечении CO_2 из атмосферы, это может вызвать *необратимое* изменение химического состава атмосферы, а следовательно, и климата Земли. Для обозначения сценария необратимых изменений климата в результате роста концентрации CO_2 нами был введен термин "Парниковая катастрофа" [6-10].

Подводя некоторый итог, можно сделать вывод об отсутствии в настоящий момент эф-фективных механизмов ограничения роста кон-центрации CO_2 в атмосфере. Относительная ста-бильность климатических параметров сегодня в основном связана с инерцией климатической системы (тепловая инерция океана, существо-вание значительных по объему резервуаров для парниковых газов - атмосфера, океан, биосфера).

В этой связи особый интерес представляет оценка конкретной величины возможных изменений основных климатических параметров и, прежде всего, среднепланетарной температуры.

РАДИАЦИОННО-АДИАБАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА

Исходя из вышеизложенного, рост концентрации CO_2, по-видимому, продолжится как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе. Это с неизбежностью будет приводить к росту среднепланетарной температуры Земли.

Несмотря на то, что со времени первых сообщений о возможной роли парниковых газов в формировании температурного баланса Земли и других планет [11] прошло уже почти 150 лет, до сих пор оценки зависимости парникового эффекта, получаемые разными авторами, отличаются почти в десять раз (!!!), от T (при удвоении CO_2) 1^0C [12] и до T (при удвоении CO_2) 5^0C (IPCC). В значительной степени это определяется необходимостью дополнительных допущений в рамках традиционных радиационно-конвективных моделей [13].

Недостатком ранних радиационных и более поздних радиационно-конвективных моделей [13, 14] является необходимость подробного рассчета радиационных и конвективных потоков тепла как собственно в атмосфере, так и в системе атмосфера-суша-океан. Вычислительные сложности, связанные с численным решением 3-мерной сильнонелинейной задачи, заключаются не только в ограниченной памяти и быстродействии современных вычислительных машин, но и в существовании принципиальных (неалгоритмических) неустойчивостей в изучаемой системе. Неизбежное для подобных систем упрощение задачи зачастую приводит к неконтролируемой потере точности в окончательных результатах.

Целью наших исследований было построение *аналитической модели* парникового эффекта, позволяющей получать надежные оценки в пределах по крайней мере 50% процентной точности в широком диапазоне изменения концен-

трации парниковых газов и среднепланетарной температуры поверхности. Такую модель мы назвали "Радиационно-адиабатической моделью парникового эффекта".

Основное отличие данной модели от традиционных радиационно-конвективных моделей парникового эффекта заключается в том, что роль конвективных явлений теплопереноса ограничивается формированием так называемого адиабатического температурного градиента $T(z)$ в нижней радиационно-активной части атмосферы (тропосфера).

$$T(z) \quad T_0 \quad {}_A z, \tag{1}$$

где T_0 - температура поверхности планеты (Земли), z - высота над уровнем поверхности.

Это предположение можно считать оправданным, поскольку адиабатический температурный градиент, формирование которого происходит в результате вертикальных перемещений воздушных масс, слабо зависит от конкретных динамических параметров такого перемещения и в широком диапазоне их изменения определяется физико-химическим составом атмосферы и ускорением свободного падения вблизи поверхности планеты.

$${}_A \quad \frac{g}{C_p} \quad (9.8 \;\; 10^{\;3}) \; К/м \quad 10 \; К/км \;, \tag{2}$$

где g - ускорение свободного падения (для Земли g = 9,8 м/с^2); C_p - изобарная теплоемкость газового состава атмосферы (для Земли C_p = 1,005·10^3 Дж/(кг·К)); - коэффициент, определяемый влажностью воздуха и содержанием в нем водяных аэрозолей. Для сухого воздуха коэффициент = 1 . В общем случае всегда меньше 1 (тропические пустыни) и, как правило, больше 0.6 (экваториальный пояс). Адиабатический градиент существует на всех планетах Солнечной системы, имеющих атмосферу, и достаточно точно описывается формулами (1),(2).

Считая распределение газов в атмосфере планеты известным ${}_i(z)$, а также считая известными спектральные свойства каждого из парниковых газов ($a_i(\;)$ - спектральный коэффициент поглощения (излучения)), нетрудно записать выражение для спектральной мощности теплового (длинноволнового) излучения элемента атмосферы, расположенного на некоторой высоте z, в окружающее пространство:

$$W^{изл}(\;,z) \quad \widetilde{W}^{изл}(\;,z) A^{погл}(\;,z), \tag{3}$$

где

$$\widetilde{W}^{изл}(\;,z) \quad (\;\; {}_i \; a_i(\;) \; {}_i(z)) \frac{2 \;\; h^{\;3}}{c \exp(h \;\; / kT(z))}, \tag{4}$$

- спектральная мощность "первичного" излучения элемента атмосферы, расположенного на высоте z , а

$$A^{погл}(\;,z) \quad \exp \quad {}_i \; a_i(\;) \; {}_z \; {}_i(\;)d \tag{5}$$

- коэффициент поглощения вышележащих слоев атмосферы. Величина $a_i(\;)$ характеризует как излучательную, так и поглотительную способность i-го парникового газа (в соответствии с законом излучения Кирхгофа); - коэффициент, зависящий от размерности модели (в 3-мерном сферически симметричном (квазиодномерном) случае необходимо дополнительно выполнить интегрирование по телесному углу в пределах верхней полусферы). Функция ${}_i(z)$ характеризует изменение плотности i - го парникового газа с высотой. Плотность большинства парниковых газов меняется с высотой (z) в соответствии с барометрической формулой:

$${}_i(z) \quad {}_i^0 \exp \quad \frac{{}_{возд} m_H g}{kT_{eff}} \; z \tag{6}$$

(в приближении изотермической атмосферы), где ${}_{возд}$ 29 - средняя молярная масса воздуха; m_H 1.67 10 ^{27} *кг* - масса атома водорода; k - постоянная Больцмана, ${}_i^0$ - плотность i-го парникового газа на уровне моря (поверхности планеты), T_{eff} - так называемая эффективная температура атмосферы.

Существует ряд парниковых газов, для которых барометрическая формула (6) принципиально неприменима. Концентрация одних, например озона, зависит от протекающих в атмосфере химических реакций и имеет сложный характер зависимости от высоты. Концентрация других, и среди них такой важный парниковый газ как пары воды, определяется процессами конденсации и испарения. Изменение концентрации паров воды в атмосфере определяется в основном температурой окружающего воздуха, которая, в свою очередь (в рамках радиационно-адиабатической модели), линейно зависит от высоты z:

$${}^{H_2O}(z) \quad {}^{H_2O}(T(z)) \quad {}^{H_2O}(T_0 \quad {}_A z). \tag{7}$$

В соответствии с имеющимися оценками [4], наибольший вклад в тепловое излучение Земли вносит атмосфера (95%), причем основную роль играют два парниковых газа - углекислый газ

CO_2 и пары воды H_2O. Поэтому, практически без потери общности, на основе (1)-(7) мы можем записать выражение для суммарной мощности теплового излучения Земли в окружающее пространство в следующем виде:

$$W^{изл}(\ {}^{CO_2}_{0}, T_0) \quad dzd \quad W^{изл}(\ {}^{CO_2}_{0}, T_0, \ , z)$$

$$dzd \quad \frac{2\ h^{\ 3}}{c\exp(h\ /kT(z))}\ a^{CO_2}(\ )\ {}^{CO_2}_{0}\exp\ \frac{{}_{возд}m_H g}{kT_{eff}}z \quad a^{H_2O}(\ )\ {}^{H_2O}(T_0 \quad {}_A z) \tag{8}$$

$$\exp\ \ a^{CO_2}(\ )\ {}^{CO_2}_{0}\ \frac{kT_{eff}}{{}_{возд}m_H g}\exp\ \frac{{}_{возд}m_H g}{kT_{eff}}z \quad a^{H_2O}(\ )\ {}_z d\ \ {}^{H_2O}(T_0 \quad {}_A\ ) \ .$$

Условие радиационного баланса для состояния термодинамического равновесия требует равенства падающей и излучаемой планетой энергии:

$$W^{пад} \quad (1 \quad)S/4 \quad W^{изл}(\ {}^{CO_2}_{0}, T_0) \quad const, \tag{9}$$

где S - солнечная постоянная и - альбедо планеты считаются константами.

Таким образом, требование постоянства излучаемой планетой в окружающее пространство мощности теплового излучения позволяет получить формальное аналитическое решение задачи о связи малых приращений концентрации CO_2 и среднепланетарной температуры Земли:

$$dW^{изл} \quad \frac{W^{изл}(\ {}^{CO_2}_{0}, T_0)}{{}^{CO_2}_{0}}d\ {}^{CO_2}_{0} \quad \frac{W^{изл}(\ {}^{CO_2}_{0}, T_0)}{T_0}dT_0 \tag{10}$$

$$0 \quad dT_0 \quad \frac{W^{изл}(\ {}^{CO_2}_{0}, T_0)}{{}^{CO_2}_{0}} \Big/ \frac{W^{изл}(\ {}^{CO_2}_{0}, T_0)}{T_0}\ d\ {}^{CO_2}_{0} \ .$$

На первый взгляд кажется, что на пути получения окончательного аналитического выражения для $T_0(\ {}^{CO_2}_{0})$ предстоит преодолеть немалые вычислительные трудности, однако, на самом деле, наличие специальной трансляционно-дилатационной группы преобразований параметров T_0, ${}^{CO_2}_{0}$, оставляющих инвариантной функцию $W^{изл}(\ {}^{CO_2}_{0}, T_0)$

$$\tilde{T}_0 \quad T_0 \quad {}_A H_0 \ \ln(\ ), \quad \tilde{}\ {}^{CO_2}_{0} \quad {}^{CO_2}_{0}, \tag{11}$$

где ${}_A \quad \frac{g}{C_p} \quad 8\ K/км$ - средний (для Земли) адиабатический градиент, $H_0 \quad \frac{kT}{{}_{возд}m_H g}$ 7,4 км - высота, на которой плотность воздуха уменьшается в e раз, позволяет практически сразу получить аналитическое выражение для величины дифференциального парникового эффекта (причем сразу в интегральной форме для произвольно больших изменений концентрации углекислого газа ${}^{CO_2}_{0}$):

$$T \quad H_0 \ln \frac{{}^{CO_2}_{0} \quad {}^{CO_2}_{0}}{{}^{CO_2}_{0}} \tag{12}$$

$$(59K)\ln \frac{{}^{CO_2}_{0} \quad {}^{CO_2}_{0}}{{}^{CO_2}_{0}} \ .$$

Полученный результат допускает простую и наглядную интерпретацию, демонстрирующую физический смысл трансляционно-дилатационной симметрии (11) для функции мощности теплового излучения планеты $W^{изл}(\ {}^{CO_2}_{0}, T_0)$ (8). Действительно, нетрудно видеть, что преобразования (11), по существу, эквивалентны замене переменных интегрирования в выражении (8):

$$z \quad z \quad H_0 \ln \ , \quad H_0 \ln \ , \tag{13}$$

что может быть интерпретировано как сдвиг основных характеристик атмосферы вдоль шкалы высот на величину

$$H_0 \ln \quad H_0 \ln \frac{{}^{CO_2}_{0} \quad {}^{CO_2}_{0}}{{}^{CO_2}_{0}} \ . \tag{14}$$

Для проверки работоспособности полученных соотношений радиационно-адиабатическая модель была использована для оценки величины парникового эффекта, существующего на Венере, поскольку никаких дополнительных предположений, ограничивающих применимость данной модели только случаем земной атмосферы, сделано не было. Действительно, известно, что плотность CO_2 у поверхности Венеры более чем на 5 порядков превышает плотность углекислого газа у поверхности Земли ($_{0B}^{CO_2} / {}_{0B}^{CO_2}$ $1.2 \ 10^5$). Исходя из этого, нетрудно рассчитать высоту H_{0B}, на которой плотность CO_2 в атмосфере Венеры соответствует плотности CO_2 в радиационной сфере Земли H_{0B} $75 км$ (для неизотермической атмосферы). Зная величину адиабатического градиента для атмосферы Венеры $_{AB}$ $8{,}9 K/км$, получаем оценку для абсолютной величины парникового эффекта

$$T_{0B} \quad {}_{AB} H_{0B} \quad 670 \ K \tag{15}$$

Реально наблюдаемый парниковый эффект на Венере составляет T $500 \ K$, что всего на 25% ниже рассчитанного значения. Такую точность можно считать успехом, учитывая столь большие различия в концентрации CO_2 (10^5), альбедо и других физико-химических параметров атмосферы Земли и Венеры.

Более того, в рамках радиационно-адиабатической модели оказалось возможным провести анализ величины погрешности основного результата (12), наличие которой является неизбежным следствием сделанных упрощений. Несложно показать, что для Земли максимальная оценка погрешности результата не будет превосходить 37% от величины дифференциального парникового эффекта.

$$T \quad (59 \quad 22) K \ln \frac{{}_0^{CO_2} \quad {}_0^{CO_2}}{{}_0^{CO_2}} . \tag{16}$$

Данная погрешность возникает в результате пренебрежения вкладом земной поверхности в общее тепловое излучение Земли, зависимостью альбедо Земли от среднепланетарной температуры, отличия реально наблюдаемого в атмосфере Земли адиабатического градиента от его среднего значения, исключения из рассмотрения "малых парниковых газов". Можно показать, что учет неизотермичности атмосферы Земли, а также широтного распределения температуры и влажности в широком диапазоне значений лишь незначительно влияет на окончательный результат.

Вместе с тем, применение радиационно-адиабатической модели для оценки дифференциального парникового эффекта в результате антропогенного увеличения концентрации CO_2 в атмосфере Земли, которое составило уже около 30% за весь период техногенной стадии развития нашей цивилизации, в рамках радиационно-адиабатической модели дает величину:

$$T(30\% \ CO_2) \quad (15.5 \quad 6) K, \tag{17}$$

что не только превышает оценки, полученные в других работах, но и почти в 10 раз превышает реально наблюдаемое повышение среднепланетарной температуры Земли за последние 300-400 лет. На самом деле здесь нет никакого противоречия. Полученные в рамках радиационно-адиабатической модели оценки являются асимптотическими, т.е. не учитывающими тепловую инерцию климатческой системы и, прежде всего, Мирового океана, которая снижает скорость изменения среднепланетарной температуры. Ниже мы покажем, что учет тепловой инерции Мирового океана позволяет не только получить соответствие теоретических и наблюдаемых значений результирующего повышения среднепланетарной температуры, но и детально воспроизвести реальный ход температуры в XX веке.

МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОЙ ИНЕРЦИИ МИРОВОГО ОКЕАНА И АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ.

Интегральную модель, описывающую динамику изменения среднепланетарной температуры Земли с учетом результатов радиационно-адиабатической модели парникового эффекта, можно записать в следующем виде:

$$\frac{dT(t)}{dt} \quad \frac{1}{{}_{ин}} \ T_0 \quad 37 K \ln \frac{{}_0^{CO_2}(t)}{{}_0^{CO_2}} \quad T_A(t) \quad T(t) , \tag{18}$$

где $T(t)$ - изменение во времени среднепланетарной температуры Земли; $_{ин}$ - время релаксации климатической системы, определяемое суммарной тепловой инерцией Мирового океана, ледников, атмосферы и суши; T_0, $_0^{CO_2}$ - начальные (доиндустриальные) значения среднепланетарной температуры и плотности CO_2 у поверхности Земли; $_0^{CO_2}(t)$ - изменение во времени концентрации CO_2, $T_A(t)$ - изменение

во времени температурного форсинга, связанного с аэрозольным загрязнением верхних слоев атмосферы (стратосфера).

Отметим, что в (18) для оценки температурного форсинга, связанного с парниковым эффектом:

$$T(\ {}_0^{CO_2}(t)) \quad 37K \ln \frac{{}_0^{CO_2}(t)}{{}_0^{CO_2}}, \qquad (19)$$

выбран коэффициент, соответствующий нижней границе доверительного интервала (16).

Изменение средней концентрации углекислого газа ${}_0^{CO_2}(t)$ с начала индустриальной эпохи до наших дней хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью от времени:

$${}_0^{CO_2}(t) \quad {}_0^{CO_2} \ 1 \ 0.3 \exp \frac{t \ t_н}{{}_{CO_2}}, \qquad (20)$$

где $t_н$ - соответствует 2000 году, а ${}_{CO_2}$ 45 лет, что соответствует ежегодному росту выброса CO_2 на 2,25%. Возможное принятие мер по ограничению выброса CO_2 в атмосферу приведет к замене экспоненциального роста концентрации CO_2 на линейный. Нами рассмотрено три сценария роста концентрации CO_2 в атмосфере Земли:

1) сохранение экспоненциальных темпов роста CO_2 (20);

2) ограничения выброса (линеаризация роста) CO_2 в 2000 году (на уровне 2000 года)

3) ограничение выброса CO_2 в 2100 году (на уровне 2100 года).

Важность учета аэрозольного загрязнения верхних слоев атмосферы (стратосферы) для оценки изменения среднепланетарной температуры поверхности Земли отмечалась еще в работе Будыко 1974г. [15]. Позже интерес к этой проблеме значительно возрос в связи с изучением феномена "ядерной зимы" [16].

Для описания антропогенного аэрозольного загрязнения верхних слоев атмосферы $T_A(t)$ выбрана следующая зависимость от времени:

$$T_A(t) \quad \begin{matrix} 0, & t \quad 1939г. \\ T_A, & t \quad 1939г. \end{matrix} \qquad (21)$$

Т.е. предполагается, что до 1939 г. антропогенное аэрозольное загрязнение верхних слоев атмосферы отсутствовало, а после 1939 г., резко увеличившись, осталось неизменным до настоящего времени.

Это допущение обосновывается тем фактом, что сажевые (наиболее оптически активные) аэрозоли могут попасть в стратосферу только в результате образования тропосферного канала - мощного восходящего потока воздуха, доставляющего аэрозольные частицы непосредственно в стратосферу. (При поступлении сажевых аэрозолей в нижние слои тропосферы они, являясь центрами конденсации, довольно быстро "вымываются" дождями из атмосферы).

До 1939 года сажевые и пылевые частицы попадали в стратосферу практически исключительно в результате естественных процессов, таких, как извержения вулканов. После 1939 г. ситуация изменилась. В годы второй мировой войны, во время крупных пожаров городов, нефтехранилищ создавались условия для образования тропосферных каналов и поступления сажевых аэрозолей в атмосферу. После окончания второй мировой войны основным источником аэрозольного загрязнения стратосферы стали испытания ядерного оружия в атмосфере, а после их запрета - полеты гражданских самолетов в тропопаузе. Действительно, образующиеся при работе реактивных двигателей самолетов сажевые частицы непосредственно попадают в стратосферу.

Таким образом, форма ступенчатой зависимости от времени функции $T_A(t)$ представляется достаточно обоснованной. При этом для оценки конкретной величины T_A данных, к сожалению, недостаточно, как, впрочем, и для непосредственного расчета времени релаксации климатической системы ${}_{ин}$, поскольку для этого требуется, по существу, полная реконструкция 3-х мерной картины течений в Мировом океане.

Таким образом, в модели имеются два свободных параметра: ${}_{ин}$, T_A, значения которых выбираются путем сопоставления результатов моделирования с реальным трендом температур $T_{эксп}(t)$ за время инструментальных наблюдений (1900-2000 гг.). Требование минимизации квадратичного отклонения экспериментальных [17] и теоретических значений температур:

$$\sum_{t_i \ 1900}^{2000} (T^{эксп}(t_i) \quad T(t_i))^2 \quad \min \qquad (24)$$

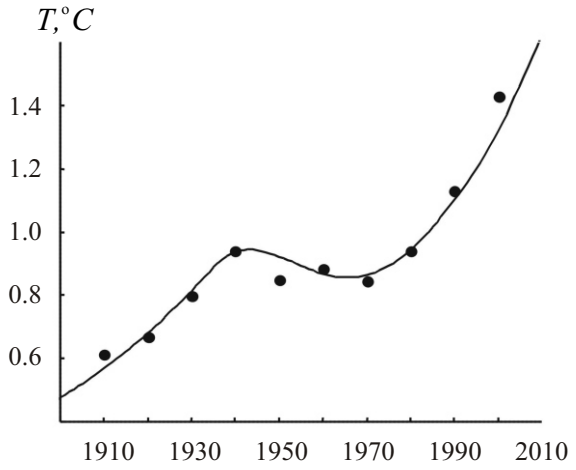

Рис. 3. Результаты моделирования роста среднепланетарной температуры Земли для периода с 1900 по 2010 гг. Точками обозначены данные наблюдений. Отметим неплохое соответствие данных наблюдения и результатов моделирования. (Здесь и в дальнейшем по оси ординат отложен прирост среднепланетарной температуры Земли по сравнению с доиндустриальной эпохой (1600 г.). По оси абсцисс - время.)

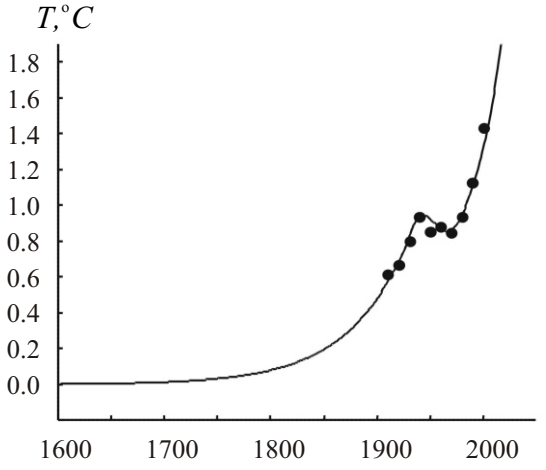

Рис. 4. Результаты моделирования для периода с 1600 по 2050 годы. Общее повышение среднепланетарной температуры по сравнению с доиндустриальной эпохой (1600-1700 гг.) в соответствии с моделью составляет 1,3 К, что находится в хорошем соответствии с палеоклиматическими данными, полученными на основе анализа динамики горного оледенения и некоторыми другими методами.

позволяет получить численные оценки параметров, характеризующих инерцию климатической системы $_{ин}$ $200 лет$ и величину температурного форсинга для аэрозольного загрязнения стратосферы T_A $5^0 K$. Следует отметить, что время релаксации - $_{ин}$ 200 лет является здесь "перенормированной" величиной, учитывающей двухкомпонентность парникового эффекта ($CO_2 + H_2O$).

Результаты моделирования приведены на рис. 3-6.

Нетрудно видеть, что результирующее повышение среднепланетарной температуры Земли может составить десятки и сотни градусов (даже в случае ограничения техногенного выброса CO_2). Следует отметить, что на рис. 6. представлен "оптимистический" вариант изменения среднепланетарной температуры Земли, поскольку, во-первых, для моделирования использована асимптотическая оценка парникового эффекта, соответствующая нижней границе доверительного интервала (16), (19), а, во-вторых, модель пока не учитывает положительные обратные связи "температура - концентрация CO_2 в атмосфере", которые могут привести к лавинообразному увеличению концентрации

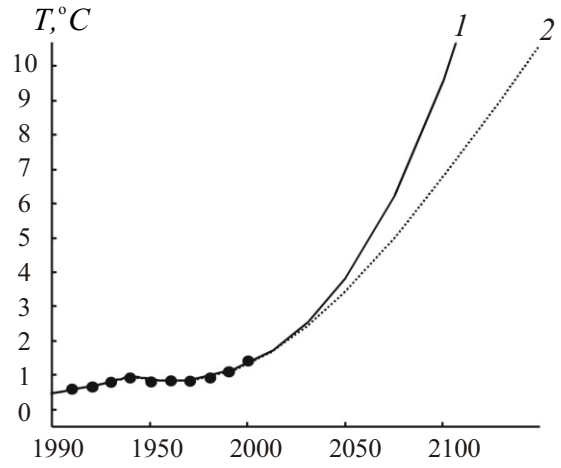

Рис. 5. Прогноз повышения среднепланетарной температуры Земли на период до 2100 года.: 1 - график повышения температуры при сохранении современных темпов роста концентрации CO_2 в атмосфере; 2 - вариант развития климатических изменений (T) в случае, если вступит в силу международная конвенция о фиксации уровней техногенного выброса CO_2 в атмосферу на уровне 2000 г. Результаты моделирования (повышение температуры к 2100 г. на 5-8 К по сравнению с современным уровнем) находятся в удовлетворительном согласии с результатами, получаемыми другими авторами.

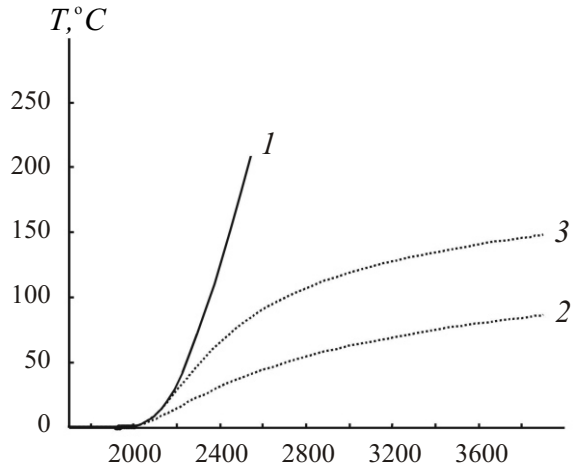

Рис. 6. Результаты моделирования изменения среднепланетарной температуры Земли на период до 4000 г. График повышения температуры при сохранении современных темпов роста концентрации CO_2 в атмосфере (1); варианты развития климатических изменений (Т) в случае, если техногенный выброс CO_2 будет зафиксирован на уровне 2000 г. (2) или на уровне 2100 г.(3).

CO_2 в атмосфере и еще сильнее сузить временные рамки существования на Земле условий, приемлемых для существования жизни и человеческой цивилизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, изложенные в настоящей работе, заставляют сделать вывод о существовании беспрецедентной опасности, связанной с ростом среднепланетарной температуры Земли вследствие парникового эффекта.

Возможность предотвращения необратимых изменений климата Земли обусловлена реализацией целого комплекса мероприятий, включающих следующие направления:

- комплекс природоохранных мер и, прежде всего, контроль за состоянием и сохранение климатообразующих биоценозов (в том числе и методами криоконсервации);

- ограничение, а в перспективе и полный отказ от добычи и сжигания минеральных видов топлива (уголь, нефть, газ);

- "конверсия энергетики" - постепенный переход к использованию возобновляемых видов энергии (гидро-, ветро- и солнечная энергетика), в том числе, к использованию древесины в качестве энергетического сырья и сырья для производства органического топлива;

- комплекс мер по увеличению площади (и биомассы) лесов, что позволит (на какое-то время) связать излишек атмосферного CO_2 и увеличить сырьевую базу лесной энергетики;

- искусственное изъятие CO_2 из атмосферы, например, путем захоронения углеродсодержащих отходов и бытового мусора;

- регулирование количества падающей на Землю солнечной радиации путем реализации проектов создания в околоземном космическом пространстве экранов, задерживающих часть солнечного излучения.

Конечно, перечисленные меры далеко не равноценны, как по степени влияния на климат, так и по необходимым для их осуществления средствам, однако только их одновременная реализация, на наш взгляд, позволит избежать драматических последствий изменения климата Земли.

Выбор оптимальной стратегии в условиях неполноты информации, необходимость параллельного проведения широкого спектра исследований, ограниченность временных и материальных ресурсов - все это крайне усложняет задачу планирования необходимых для стабилизации климата Земли мероприятий.

Вместе с тем, учитывая крайнюю степень опасности происходящих изменений климата Земли, человечество и, прежде всего, промышленно развитые страны должны в самое ближайшее время договориться о проведении согласованной политики в данной области и о выделении необходимых средств, как для проведения полномасштабных исследований, так и для осуществления комплекса мер по стабилизации климата Земли.

В заключение хотелось бы выразить огромную благодарность С.И. Розанову, Г.Н. Берестовскому, Н.Г. Есиповой, Д.В. Рундквисту, В.М. Липунову, С.П. Капице, А.В. Бялко, В.В. Бурдюже Г.С. Голицину, В.И. Морозу, Л.В. Ксанфомалити, В.В. Смолянинову, а также В.Н. и Е.В. Карнауховым за плодотворное обсуждение результатов и помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. БСЭ. Круговорот веществ. М.: Сов. энциклопедия, Изд. 3-е. 1973.
2. *Pocley P.* // Nature. 1999. V. 400, P. 98.
3. *Карнаухов А.В.* // Биофизика. 1994. Т. 39, вып. 6. С. 1094-1098.
4. *Карнаухов А.В., Карнаухов В.Н.* // Природа. 1997. № 1. С. 46-55.
5. *Карнаухов А.В., Карнаухов В.Н.* // Биофизика. 1999. Т. 44, вып. 4. С. 750-761.
6. *Карнаухов А.В.* // Биофизика. 1994. Т. 39, вып. 1. С. 148-152.
7. *Карнаухов А.В* // Биофизика живой клетки. 1994. Т. 6. С. 14-16.
8. *Карнаухов А.В.* // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 2. С. 523-526.
9. *Карнаухов А.В., Карнаухов В.Н* .// Биофизика, 1998, Т. 43, вып. 6. С. 1106-1121.
10. *Карнаухов В.Н., Карнаухов А.В* // Биофизика, 1999. Т. 44, вып. 1. С. 147-148.
11. *Tundall J.* // Phil. Mag. 22 (sec.4). 1861. P. 169-194.
12. *Климченко В.В. и др.* Энергия, природа и климат. М.: Издательство МЭИ. 1997. 215 с.
13. *Кендел Р.* Углекислый газ в атмосфере / Под. ред. Г.С. Голицина. М.: Мир, 1987. 532 с.
14. *Augustsson T., Ramanatan V.* // J. Atm. Sci. 1977. V. 34. P. 448-451.
15. *Будыко М.И.* Изменение климата, Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 280 с.
16. *Будыко М.И., Голицин Г.С., Израэль Ю.А.* Глобальные климатические катастрофы. М.: Гидрометеоиздат, 1986. 160 с.
17. *Simon F.B. Tett, Peter A. Stott, Myles R. Allen, William J. Irgram, John F.B.* // Nature, 1999. V. 399. P. 569-572,

The Role of Biosphere in the Formation of Earth Climate. A Greenhouse Catastrophe

A.V. Karnaukhov

Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia

The role of processes in organic and inorganic nature that determine the formation of the atmosphere chemical composition and Earth temperature balance was analyzed. It was concluded that the biological mechanisms of CO_2 removal from the atmosphere are insufficient, and there exist potentially hazardous CO_2 sources in inorganic nature that can be activated upon elevation of the mean Earth temperature. It was shown that the stability of natural systems of maintaining the constant chemical composition of the atmosphere is destroyed due to the disturbance by man of climate-forming biocenoses, which may lead to irreversible changes in Earth's climate with the result that the mean planetary temperature would be elevated to 100-150°C and above. This would make impossible the existence of life on our planet, at least in its present form. A radiative-adiabatic model of the greenhouse effect was constructed in the framework of which asymptotic estimates of the increase in mean planet temperatures for a wide range of changes in the concentration of greenhouse gases were obtained. On the basis of the model, an integral model of changes in Earth's climate was constructed, which takes into account the heat inertia of the ocean and aerosol contaminations of the upper layers of the atmosphere. It was shown that irreversible (catastrophic) changes in Earth's climate (greenhouse catastrophe) may occur in a relatively near future (200-300 years).

Key words: biological variety, climate-forming biocenoses, climate, modelling, greenhouse effect, green-house catastrophe, stable development