

На правах рукописи

О.В. Макарьева

МАКАРЬЕВА
Анастасия Михайловна

**Исследование биотических источников
и стоков атмосферного углерода
в океане и на суше**

04.00.23 – Физика атмосферы и гидросферы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2000

Работа выполнена в Отделении теоретической физики
Петербургского института ядерной физики
им. В.П. Константинова Российской Академии наук

**НАУЧНЫЙ
РУКОВОДИТЕЛЬ:**

Доктор физ.-мат. наук,
проф. В.Г. Горшков

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ
ОППОНЕНТЫ:**

Доктор физ.-мат. наук,
проф. Л.С. Ивлев

Доктор технических наук,
кандидат физ.-мат. наук,
проф. Г.В. Менжулин

**ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ:**

Институт океанологии
им. П.П. Ширшова
Российской Академии наук

Защита состоится "23" марта 2000 г. в "15" часов на заседании Диссертационного совета Д 063.57.51 по защите диссертаций на соискание степени доктора физико-математических наук в Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9, ВФА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан "7" февраля 2000 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

С.А.Зайцева

Д 232.15,0

Д 315,0

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время на всех станциях наблюдения зафиксирован рост со временем среднегодовых концентраций CO_2 в воздухе, что указывает на глобальное увеличение со временем концентрации этого газа во всей атмосфере. Двуокись углерода представляет собой важнейший парниковый газ, определяющий величину приземной температуры и климат Земли. Актуальной проблемой является выяснение причин роста концентрации атмосферного CO_2 и возможностей стабилизации концентрации атмосферного CO_2 .

Основной причиной роста содержания CO_2 в атмосфере считается сжигание ископаемого топлива – угля, нефти, природного газа – и сведение лесов на больших территориях суши. До сих пор остается невыясненным вклад биотических источников и стоков атмосферного углерода как на суше, так и в океане. Исследование этих вопросов позволило бы выбрать конкретные меры для стабилизации земного климата.

Цель работы: определить количественную величину чистых потоков углерода между атмосферой и биотическими резервуарами суши и океана; выяснить характер обратных связей взаимодействия глобальной биоты с атмосферным углеродом.

Задачи исследования.

1. Выяснить влияние изменения новой продукции (биотического насоса) океана на концентрацию атмосферного углерода за счет изменения средней глубины разложения органического вещества.

2. Определить неизвестные биотические составляющие бюджета атмосферного углерода путем использования данных по глобальному изменению CO_2 и O_2 в атмосфере и стехеометрических коэффициентов для углерода и кислорода (дыхательного отношения) при синтезе и разложении органических веществ на суше и в океане.

3. Определить коэффициенты релаксации атмосферного углерода к равновесному состоянию за счет функционирования незомущенной биоты суши и океана и характер изменения коэффициентов релаксации в зависимости от степени нарушения естественной биоты человеком.

Научная новизна.

1. Показано, что изменение новой продукции ("биотического насоса") в океане может оказывать существенное влияние

на скорость поглощения атмосферного углерода в неорганическом виде физико-химической системой океан-атмосфера.

2. Найдена скорость поглощения избытков атмосферного углерода биотой океана на основе данных по изменению концентраций CO_2 и O_2 в атмосфере и стехеометрических отношений CO_2/O_2 при синтезе и разложении органического вещества на суше и в океане.

3. Вычислены коэффициенты релаксации атмосферного углерода за счет функционирования биот суши и океана и определено их поведение со временем.

4. На основании полученных данных количественно оценена площадь территории, на которой необходимо восстановить невозмущенную естественную биоту (леса, болота) для того, чтобы остановить глобальные изменения концентрации атмосферного CO_2 при современной скорости сжигания ископаемого топлива.

5. Показано, что данные по распределению изотопов углерода ^{12}C , ^{13}C и ^{14}C в атмосфере и по глубинам океана, а также данные по потоку углерода через поверхность раздела океан-атмосфера, согласуются с независимо полученным результатом поглощения избытков атмосферного углерода биотой океана.

Все перечисленные результаты являются новыми.

Практическая и теоретическая значимость работы.

1. Результаты работы позволяют замкнуть бюджет современного изменения глобального круговорота углерода и добиться равенства суммарных источников суммарным стокам атмосферного углерода, разрешив проблему потеряннного стока атмосферного углерода.

2. Результаты работы позволяют установить экологический предел допустимого нарушения естественных сообществ глобальной биоты, обеспечивающий остановку глобальных изменений атмосферного углерода.

3. По результатам работы можно проследить временную динамику изменений глобального круговорота углерода на протяжении всей индустриальной эры.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертации были вынесены на обсуждение на I-й Международной конференции "Проблемы ноосферы и устойчивого развития" (Саякт-Петербург, 1996); научном семинаре кафедры устойчивого развития Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева (Москва, январь

1997 г.); VI-м Конгрессе Европейского Сообщества по эволюционной биологии (Арнем, Нидерланды, август 1997 г.); XXXII Зимней Школе Петербургского института ядерной физики РАН (Санкт-Петербург, февраль 1998 г.); двух рабочих совещаниях по выработке научных основ Хартии Земли (Москва, март 1998 г. и Нью-Йорк, ноябрь 1998 г.); Международном семинаре "Роль девственной наземной биоты в современных условиях глобальных изменений окружающей среды. Биотическая регуляция окружающей среды" (Петрозаводск, октябрь 1998 г.); Международной конференции "Индексы и индикаторы устойчивого развития: системно-аналитический подход" (Санкт-Петербург, июль 1999 г.); Съезде Экологического Общества Австралии (Фремантл, Австралия, сентябрь 1999); научном семинаре Отделения теоретической физики Петербургского института ядерной физики РАН (Санкт-Петербург, январь 2000 г.). Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения (первой главы), 4-х глав, заключения, приложения и списка литературы (119 наименований, из них 85 на английском языке). Работа изложена на 102 страницах и содержит 8 рисунков.

Содержание работы

ГЛ. 1. Введение. История возникновения проблемы

Углерод представляет собой основной элемент органических веществ. В среднем, углерод составляет около 45% всех химических элементов, образующих сухое органическое вещество, из которого построены все организмы биосферы (Базилевич, Родин, 1967; Degens *et al.*, 1984). Органический углерод биосферы синтезируется растениями из атмосферной двуокиси углерода и двуокиси углерода, растворенной в водной среде океанов, морей и пресноводных водоемов суши.

Глобальные изменения атмосферного CO_2 связаны с перераспределением углерода в глобальных резервуарах, из которых следующие пять резервуаров являются основными: атмосфера (a); ископаемое топливо (f); растворенный неорганический углерод (РНУ) океана (s^-); растворенный органический углерод (РОУ) океана (s^+); органический углерод биоты суши (b) (Будыко и др., 1985; Бютнер, 1986; Борисенков, Кондратьев, 1988).

Изменение массы углерода, m_i , во всех пяти перечислен-

ных основных активных глобальных резервуарах имеет один и тот же порядок величины и определяет бюджет атмосферного углерода (Кондратьев, Москаленко, 1984; Degens *et al.*, 1984; Моисеев и др., 1985; Тарко, 1995).

Наибольшей неопределенностью во всех опубликованных исследованиях (см., например, IPCC, 1996) характеризуются масса $m_{s,+}$ и скорость изменения $\dot{m}_{s,+}$ содержания углерода в растворенном органическом углероде (РОУ) океана и органическом веществе биоты суши, m_b и \dot{m}_b . Исследованию этих величин и посвящена настоящая диссертация.

ГЛ. 2. Поглощение атмосферного углерода океаном в неорганической форме

До начала интенсивного возмущения окружающей среды человеком атмосферная двуокись углерода находилась в физико-химическом равновесии с растворенным неорганическим углеродом (РНУ) океана. После начала выбросов углерода в атмосферу вследствие сжигания ископаемого топлива и сведения лесов это равновесие было нарушено, и начался физический процесс стремления системы океан-атмосфера к установлению физико-химического равновесия.

Возмущающим фактором является прирост массы атмосферной двуокиси углерода, m_a , относительно его доиндустриального равновесного значения M_{a0} . Система атмосфера-океан реагирует на внешние возмущения, когда отношение m_a/M_{a0} начинает превосходить чувствительность системы.

Скорость чистого поглощения $\dot{m}_{s,-}$ физико-химической системой океана избытков массы, m_a , атмосферного CO_2 должна быть функцией отношения m_a/M_{a0} . При относительно малой величине m_a/M_{a0} функция $f(m_a/M_{a0})$ может быть разложена в ряд Тейлора по степеням m_a/M_{a0} . Тогда, принимая во внимание существование равновесного состояния, в котором $f(0) = 0$, и отбрасывая высшие степени разложения, получаем:

$$\dot{m}_{s,-} = k_{s,-} m_a,$$

где величина M_{a0} включена в константу $k_{s,-}$, которая имеет размерность обратного времени и представляет собой коэффициент релаксации слабо-возмущенной физико-химической системы океан-атмосфера к равновесному состоянию.

Величина скорости поглощения углерода физико-химической системой океана $\dot{m}_{s,-}$ определена путем анализа изменения

отношения изотопов углерода $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в поверхностных водах мирового океана (Quay *et al.*, 1992; Heimann, 1996, Heimann, Maier-Reimer, 1996):

$$\dot{m}_{s,-} = (2,0 \pm 0,4) \text{ ГтС/год (среднее за 1970 - 1990 годы)}.$$

Используя этот результат и значение $m_a = (130 \pm 20) \text{ Гт С}$ за тот же период времени (все ошибки равны стандартным отклонениям), для коэффициента физико-химической релаксации системы океан-атмосфера получаем:

$$k_{s,-} = \frac{\dot{m}_{s,-}}{m_a} = \frac{2,0 \text{ ГтС/год}}{130 \text{ ГтС}} = (0,015 \pm 0,003) \text{ год}^{-1}.$$

ГЛ. 3. Реакция биоты океана на рост концентрации атмосферной двуокиси углерода

В отличие от реакции физико-химической системы океан-атмосфера, реакция биоты на изменение концентрации CO_2 в атмосфере определяется генетическими программами видов невозмущенных естественных сообществ. Океанская биота наименее возмущена человеком, поэтому можно считать, что реакция биоты океана определяется естественными генетическими программами видов сообщества и поэтому сохранилась неизменной со времени равновесного состояния атмосферы и океана. Рассмотрим возможные реакции биоты океана на увеличение концентрации атмосферного углерода.

Биотический насос атмосферного углерода.

Для сохранения замкнутости круговорота веществ и стационарного состояния концентраций органических и неорганических веществ поток органического вещества, поступающего в глубь океана, должен компенсироваться обратным потоком неорганического вещества, поступающего в фотическую зону.

Часть первичной продукции, возникающую за счет использования питательных веществ, поступающих в фотическую зону из глубин океана, называют новой продукцией (Dugdale, Goering, 1967). (Полная (валовая) продукция фотосинтеза минус дыхание фитопланктона называется чистой первичной продукцией). Отношение новой продукции к валовой первичной продукции обозначается буквой f .

Поток питательных неорганических веществ (биогенов) из глубин океана в фотическую зону обеспечивается, главным

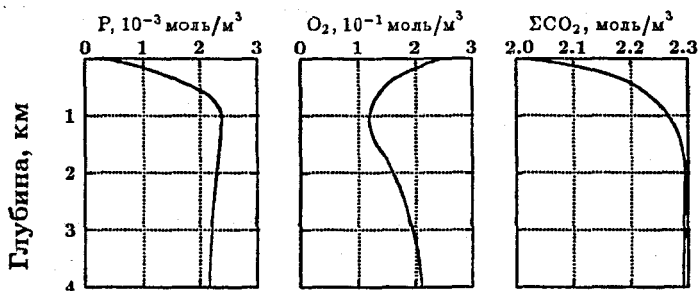


Рис. 1. Глобально усредненные профили океанических концентраций фосфора, кислорода и углерода (Takahashi *et al.*, 1981; Levitus, 1982; Bolin *et al.*, 1983; Sarmiento *et al.*, 1988).

образом, за счет турбулентной диффузии, т.е. возникновения градиентов концентраций всех биогенов, рис. 1.

В отсутствие жизни биогены были бы равномерно распределены во всем объеме океана и их поверхностные и глубинные концентрации практически сравнялись бы. Следовательно, функционирование жизни действует как биотический насос, перекачивающий неорганические биогены с поверхности в глубины океана. Действие насоса связано с наличием "новой продукции", т.е. с величиной $f > 0$. При расположении всего сообщества в хорошо перемешиваемой фотической зоне, т.е. при $f = 0$, действие биотического насоса прекратилось бы.

Растворенный неорганический углерод в океане содержится, главным образом, в виде бикарбонатных (HCO_3^-) и карбонатных (CO_3^{2-}) ионов. Концентрация растворенной двуокиси углерода (или пропорциональное ему парциальное давление молекул CO_2) составляет в поверхностных водах полпроцента концентрации всего неорганического углерода, обозначаемого ΣCO_2 .

Малое относительное изменение $[\Sigma\text{CO}_2]$ в океане пропорционально малому относительному изменению $[\text{CO}_2]$. Коэффициент пропорциональности ζ называется буферным фактором (Килинг, 1976). В приближении постоянного буферного фактора ζ имеем:

$$\frac{d[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2]} = \zeta \frac{d[\Sigma\text{CO}_2]}{[\Sigma\text{CO}_2]}; \quad \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2]_s} = \left(\frac{[\Sigma\text{CO}_2]}{[\Sigma\text{CO}_2]_s} \right)^\zeta,$$

где индексом "s" снабжены значения концентраций в поверхностном слое океана. Согласно измерениям, в среднем для Мирового океана $\zeta = 10$ (Broecker *et al.*, 1979). С ростом глубины наблюдаемая концентрация $[\Sigma\text{CO}_2]$ увеличивается на 15% (рис. 1), и, следовательно, следовательно, при увеличении с глубиной концентрация $[\text{CO}_2]$ увеличивается в $(1,15)^{10} \approx 4,0$ раза. Если бы жизнь в океане прекратилась, то все концентрации в глубинах и у поверхности сравнялись бы. При этом концентрация CO_2 в поверхностном слое и в атмосфере увеличилась бы в четыре раза.

Поверхностная концентрация $[\text{CO}_2]_s$, совпадающая с атмосферной концентрацией $[\text{CO}_2]_a$ (растворимость CO_2 близка к единице), может быть выражена с помощью стехеометрических соотношений через глубинные концентрации $[X]_d$ азота N или фосфора P:

$$[\text{CO}_2]_a = \frac{C}{X} \frac{R_{iC}}{f R_e + R_{iX}} [X]_d,$$

где (C/X) – стехеометрические соотношения биогенов C и X = N, P при синтезе и разложении органического вещества в океане; R_e и $R_{iX} \sim 0,1 f R_e$ – внешнее и внутреннее сопротивления распространения биогенов в океане. При изменении f от $f = 0$ до $f = 1$ атмосферная концентрация $[\text{CO}_2]_a$ изменяется почти в 20 раз, откуда следует, что атмосферная концентрация $[\text{CO}_2]_a$ находится под контролем океанской биоты.

Изменение массы атмосферного углерода может приводить к изменению продукции растворенного органического вещества при неизменной валовой продукции биоты океана.

В океане присутствует огромная масса растворенного органического углерода (РОУ), которая в тысячу раз превышает массы всех живых организмов открытого океана и примерно совпадает с массой углерода в атмосфере (Druffel, Williams, 1990; Martin, Fitzwater, 1992).

Синтез и разложение органического углерода сопровождаются противоположными изменениями масс атмосферного кислорода. Молекулярные стехеометрические отношения O_2/CO_2 (или обратные отношения CO_2/O_2 , называемые дыхательным отношением) хорошо известны для большинства биохимических процессов в биоте и достоверно различаются при

синтезе и разложении органического вещества биоты на суше и в океане. Это различие связано с тем, что основную часть биомассы биоты суши составляет опорная древесина стволов и ветвей деревьев, разложение которой происходит с дыхательным отношением, близким к единице. Биота океана лишена опорных древесных конструкций. Дыхательное отношение для океанской биоты существенно меньше единицы.

Коэффициент релаксации k_s - атмосферного углерода за счет функционирования биотического насоса и физико-химической системы океана, найденный во второй главе, позволяет вычислить скорость изменения РНУ в океане \dot{m}_{s-} за период 1991-1994 гг., исследованный в работе (Keeling *et al.*, 1996), когда средний прирост массы углерода в атмосфере составлял $m_a = (170 \pm 20) \text{ Гт С}$:

$$\dot{m}_{s-} = k_s \cdot m_a = (2,6 \pm 0,5) \text{ Гт С/год (1991 - 1994)}.$$

Таким образом, для трех из пяти перечисленных во второй главе углеродных резервуаров (атмосферы a , ископаемого топлива f и РНУ океана s^-) известны скорости изменения углерода. Скорости изменения двух остающихся резервуаров - растворенного органического углерода (РОУ) океана (s^+) и органического углерода суши (b) - могут быть найдены из двух условий замкнутости бюджетов (законов сохранения) углерода и кислорода. Изменение содержания кислорода измерено в атмосфере (Keeling *et al.*, 1996). Изменение содержания углерода в остальных резервуарах l может быть связано с изменением содержания в них углерода посредством известных стехеометрических соотношений $\alpha_l \equiv \text{O}_2/\text{CO}_2$. В результате условия замкнутости бюджетов углерода и кислорода имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{m}_a + \dot{m}_f + \dot{m}_{s-} + \dot{m}_{s+} + \dot{m}_b &= 0, \\ \alpha_a \dot{m}_a + \alpha_f \dot{m}_f + \alpha_s^+ \dot{m}_{s+} + \alpha_b \dot{m}_b &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\alpha_s^- = 0$, ибо поглощение углерода в неорганическом виде океаном не сопровождается изменением концентрации O_2 . Все источники в этих уравнениях входят с положительным знаком, все стоки - с отрицательным знаком. Изменение изменения концентрации O_2 в атмосфере соответствует измерению коэффициента α_a при известной величине \dot{m}_a .

Используя вычисленную выше величину \dot{m}_{s-} за период 1991-

1994 годов и эмпирические данные:

$$\alpha_f = 1,38 \pm 0,04; \quad \alpha_b = 1,10 \pm 0,05 \quad (\text{Keeling et al., 1996});$$

$$\alpha_{s+} = 1,30 \pm 0,03 \quad (\text{Redfield, 1958; Chen et al., 1996});$$

$$\alpha_a = 2,7 \pm 0,4 \quad (\text{Keeling et al., 1996});$$

$$\dot{m}_f = (-5,9 \pm 0,15) \text{ Гт С год}^{-1} \quad (\text{Keeling et al., 1996});$$

$$\dot{m}_a = (2,2 \pm 0,2) \text{ Гт С год}^{-1} \quad (\text{Keeling et al., 1996}),$$

получаем следующую связь неизвестных изменений резервуаров РОУ, \dot{m}_{s+} , и органического углерода суши, \dot{m}_b , с изменением РНУ, \dot{m}_{s-} :

$$\dot{m}_{s+} = -9,4 \text{ Гт С/год} + 5,5 \dot{m}_{s-}, \quad \dot{m}_b = 13,1 \text{ Гт С/год} - 6,5 \dot{m}_{s-}.$$

Относительные погрешности всех цифр здесь не превосходят 10%. Подставляя в последние равенства значение $\dot{m}_{s-} = (2,6 \pm 0,5) \text{ Гт С/год}$, получаем

$$\dot{m}_{s+} = (4,9 \pm 0,7) \text{ Гт С/год} \quad (1991 - 1994),$$

$$\dot{m}_b = (-3,8 \pm 0,6) \text{ Гт С/год} \quad (1991 - 1994).$$

Историческая динамика глобальных изменений может быть получена в предположении, что океанская биота мало возмущена человеком и продолжит реагировать на рост атмосферной концентрации CO_2 в соответствии с отрицательными обратными связями. Повторяя все, что было написано в изложении второй главы перед выводом формулы $\dot{m}_{s-} = k_{s-} m_a$, можно написать:

$$\dot{m}_{s+} = k_{s+} m_a.$$

Подставляя в эту формулу значения $\dot{m}_{s+} = (4,9 \pm 0,7) \text{ Гт С/год}$ и $m_a = (170 \pm 20) \text{ Гт С}$, соответствующие периоду времени 1991-1994 гг., получаем:

$$k_{s+} = \dot{m}_{s+} / m_a = (0,029 \pm 0,004) \text{ год}^{-1}.$$

Устойчивость стационарного состояния означает, что коэффициенты k_{s+} и k_{s-} положительны: океан должен функционировать в соответствии с отрицательными обратными связями - поглощать избытки атмосферной CO_2 и испускать CO_2 в атмосферу в случае недостаточной концентрации CO_2 в атмосфере.

Скорость поглощения углерода биотой океана в органической форме, $\dot{m}_{s,+} = k_{s,+} m_a$, может быть представлена в масштабно-инвариантной форме. Скорость изменения органической массы $\dot{m}_{s,+}$ равна разности изменений ее продукции ΔP_s^+ и деструкции ΔP_s^- :

$$\dot{m}_s = \Delta P_s^+ - \Delta P_s^-, \quad \Delta P_s^\pm = P_s^\pm - P_{s0}^\pm,$$

где P_{s0}^\pm — стационарные невозмущенные значения, для которых выполнено условие $P_{s0}^+ = P_{s0}^-$. Используя последнее равенство, можно переписать отношение $\dot{m}_{s,+} = k_{s,+} m_a$ для органического углерода в виде связи относительных изменений разности продукции и деструкции и концентрации CO_2 :

$$\frac{\Delta P_s^+ - \Delta P_s^-}{P_{s0}^+} = \beta \frac{\Delta[\text{CO}_2]_a}{[\text{CO}_2]_{a0}}, \quad \frac{\Delta[\text{CO}_2]_a}{[\text{CO}_2]_{a0}} = \frac{m_a}{M_{a0}},$$

$$\beta = k_{s,+} \cdot \tau_{s,+} = 0,40 \pm 0,6, \quad \tau_{s,+} = M_{a0}/P_{s0}^+ = (14 \pm 3) \text{ лет},$$

где $\tau_{s,+}$ — время оборота атмосферного углерода через биоту океана (Whittaker, Likens, 1975). Это выражение отличается от часто используемой аналогичной связи, именуемой "фертилизацией биоты избытком CO_2 " (Kohlmaier *et al.*, 1987), тем, что включает изменение не только продукции (ΔP_s^+), но и деструкции (ΔP_s^-). Отметим, что полученная величина $\beta = 0,40$ совпадает с величиной β , полученной в лабораторных экспериментах для увеличения продуктивности растений при искусственном увеличении концентрации CO_2 в воздухе (Scholes, 1999).

Невозмущенная естественная биота суши должна была бы реагировать на внешнее возмущение окружающей среды аналогично невозмущенному океану при том же безразмерном значении β . Поэтому можно написать

$$\dot{m}_b = k_b m_a,$$

гд коэффициент k_b для невозмущенной биоты характеризуется постоянным положительным значением

$$k_{b0} = k_{b0}^+ = k_{s,+} \tau_{s,+} / \tau_b^+ = 0,041 \text{ год}^{-1},$$

где $\tau_b^+ \equiv M_{a0}/P_{b0}^+ = 9,8$ лет (Whittaker, Likens, 1975). Для возмущенной биоты суши k_{b0} начинает уменьшаться и обращаться в

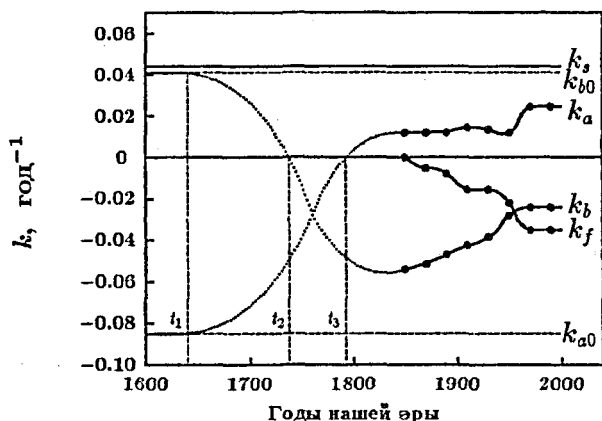


Рис. 2. К-ты устойчивости для глобальных резервуаров углерода.

ноль при нарушении устойчивости биоты. Для анализа исторической динамики изменения состояния окружающей среды под воздействием антропогенного возмущения удобно перейти в уравнение бюджета углерода (1) к переменным k_i :

$$k_a + k_s + k_f + k_b = 0, \quad k_i \equiv \dot{m}_i / m_a, \quad k_s = k_{s+} + k_{s-} \quad (2)$$

где k_i для ископаемого топлива ($i = f$) и атмосферы ($i = a$) представляет величину, определяемую из эмпирических данных для \dot{m}_f и m_a , а для океана ($i = s$) представляет собой скорость релаксации невозмущенной системы.

Поведение k_b для биоты суши находится из уравнения (2) (рис. 2). В принятом определении знаков коэффициентов k_i устойчивость атмосферы соответствует $k_a < 0$, а устойчивость океана и биоты суши соответствует $k_s > 0$, $k_b > 0$. Поэтому условия выполнения отрицательности обратных связей имеют вид:

$$k_s > 0, \quad k_b > 0.$$

Из рис. 2 видно, что, начиная с середины XVIII века ($t > t_1$), устойчивость биоты суши и, соответственно, устойчивость атмосферы начала изменяться ($k_b < k_{b0}$). В середине XVIII века ($t = t_2$) устойчивость суши была полностью нарушена ($k_b = 0$). С этого момента до начала XIX века устойчивость атмосферы поддерживалась только биотой океана. В начале XIX ($t = t_3$) века разрушение биоты суши превысило критическое значение, и коэффициент релаксации окружающей среды за

счет функционирования биоты суши обратился в ноль ($k_a = 0$), после чего биота океана перестала справляться со стабилизацией атмосферы, и начался процесс глобального изменения окружающей среды ($k_a > 0$). По мере разрушения естественной биоты суши относительная скорость выбросов углерода из нее (k_b) начинает уменьшаться, хотя абсолютная скорость \dot{m}_b продолжает возрастать. Очевидно, что при полном разрушении естественной биоты суши и замене ее на культурные комплексы (управляемые человеком агро-, сельва- и аквакультуры) стабилизирующий потенциал биоты суши должен будет обратиться в ноль и скорости k_b и \dot{m}_b будут случайно флуктуировать вокруг нулевого значения. Эта тенденция наблюдается на рис. 2.

Используя полученные количественные результаты, можно получить оценку величины продукции и, соответственно, площади территории суши, которую необходимо сохранить за невозмущенными сообществами наземной биоты для того, чтобы остановить глобальные изменения массы атмосферного углерода при современной скорости сжигания ископаемого топлива.

В настоящее время нарушенная биота составляет 36% глобальной биоты, включая биоту океана. Для остановки глобальных изменений необходимо сократить эту величину с 36% до 29%, т.е. на 7%. При этом оставшаяся нарушенной часть биоты суши начала бы испускать в атмосферу 5,4 Гт С/год. А ненарушенная часть биоты (т.е. биота океана, ненарушенная биота суши и восстановленная вновь биота суши на прежде нарушенных территориях) поглощала бы из атмосферы 8,7 Гт С/год. При этом выбросы углерода в атмосферу прекратились бы.

ГЛ. 4. Исследование данных по распределению концентраций изотопов углерода ^{12}C , ^{13}C и ^{14}C в океане и атмосфере

Показано, что исследование данных по распределению концентраций изотопов углерода ^{12}C , ^{13}C и ^{14}C в океане и атмосфере качественно подтверждает результаты, полученные во второй и третьей главах.

Распределение концентрации РОУ с глубиной для основного изотопа углерода в северо-центральной области акватории Тихого океана изображено на рис. 3 (Williams, Druffel, 1987)

и может быть описано концентрацией РОУ, $C(x, t)$, представляющей собой сумму трех членов. Во-первых, стационарная часть концентрации медленнооборотной фракции $C_1(x)$, включающая более 90% массы РОУ и характеризующаяся временем оборота $T_1 = 8300$ лет и продукцией $P_1 \approx 0,1$ Гт С/год. Эти значения найдены по данным о распределении радиоуглерода ^{14}C в РОУ (Druffel, Williams, 1990). Медленнооборотная фракция имеет концентрацию, практически не зависящую от глубины, т.е. относительно равномерно распределенную по всем глубинам океана. Второй член суммы - это стационарная концентрация быстрооборотной фракции $C_2(x)$, присутствующая только у поверхности и быстро затухающая с нарастанием глубины. Третий член - это нестационарная нарастающая со временем добавка медленнооборотной фракции $c(x, t)$. Продукция этой последней фракции нарастает пропорционально приросту избытка атмосферной концентрации m_a .

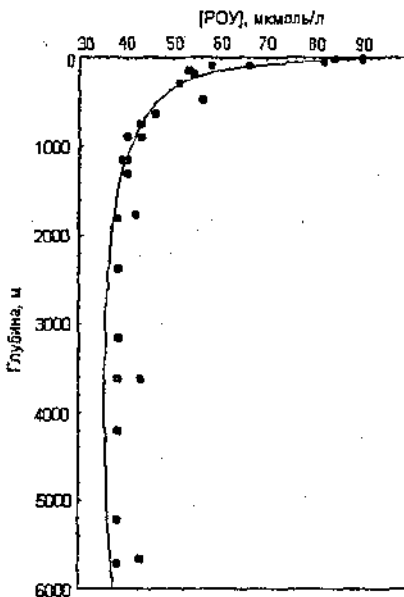


Рис. 3. Глубинный профиль концентрации РОУ по данным (Williams, Druffel, 1987) (северная центральная часть Тихого океана). Представлены эмпирические данные (точки) и аппроксимирующая функция $C(x, t) = C_1(x) + C_2(x) + c(x, t)$ (кривая).

Выбор параметров решения уравнения диффузии статистическим методом достижения наилучшего согласия между теоретическим решением уравнения и эмпирическими данными рис. 3 дает для величины нестационарной продукции медленнооборотной фракции (равной скорости прироста массы РОУ) величину, совпадающую в пределах статистической ошибки с результатом, полученным в третьей главе. Аналогичные ре-

зультаты дает рассмотрение профилей радиоуглерода ^{14}C в РОУ (Druffel, Williams, 1990).

ГЛ. 5. Поток поглощения атмосферного углерода океаном через поверхность раздела вода-воздух

Показано, что без учета биоты океана возникают противоречия между оценками накопления неорганического углерода методом измерения изменения масс ^{13}C в океане и методом измерения разности концентраций в атмосфере и перемешиваемом поверхностном слое, а основные результаты, полученные в третьей главе, не противоречат данным о проникновении атмосферного углерода через поверхность раздела океан-атмосфера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Заключении дано краткое описание всех полученных в диссертации результатов:

1. Показано, что скорость поглощения избытков атмосферного углерода физико-химической системой океан-атмосфера, \dot{m}_{s-} , определяется формулой

$$\dot{m}_{s-} = k_{s-} m_a, \quad m_a = M_a - M_{a0}, \quad k_{s-} = (0,015 \pm 0,003) \text{ год}^{-1},$$

где m_a - накопленная избыточная масса атмосферного углерода относительно равновесной массы атмосферного углерода M_{a0} , M_a - современная масса атмосферного углерода. Погрешности соответствуют стандартным отклонениям.

2. Показано, что биота океана может регулировать атмосферную концентрацию, $[\text{CO}_2]_a$, за счет изменения параметров биотического насоса новой продукции.

3. По данным о скоростях изменения масс атмосферного углерода и кислорода определены скорости поглощения атмосферного углерода биотами суши \dot{m}_b и океана \dot{m}_{s+} за период 1991-1994 гг.:

$$\dot{m}_{s+} = (4,9 \pm 0,7) \text{ Гт С/год}, \quad \dot{m}_b = (-3,8 \pm 0,6) \text{ Гт С/год}.$$

4. Найден коэффициент релаксации атмосферного углерода за счет функционирования биоты океана k_{s+} .

$$\dot{m}_{s+} \approx k_{s+} m_a, \quad k_{s+} = (0,029 \pm 0,004) \text{ год}^{-1}.$$

5. Найден масштабнo-инвариантный фактор, β , связи относительной разности продукции P_s^+ и деструкции P_s^- в океане с

относительным изменением концентрации атмосферного $[\text{CO}_2]$:

$$\frac{P_s^+ - P_s^-}{P_{s0}^+} = \beta \frac{\Delta[\text{CO}_2]_a}{[\text{CO}_2]_{a0}}, \quad \beta = 0,40 \pm 0,06,$$

где $P_{s0}^+ = P_{s0}^-$ и $[\text{CO}_2]_{a0}$ – равновесные значения продукции и деструкции в океане и равновесная (доиндустриальная) концентрация атмосферного CO_2 .

6. В предположении универсальности фактора β для биот океана и суши, основанном на универсальности биохимической организации жизни, найден коэффициент релаксации атмосферного углерода для случая, если бы вся продукция суши производилась ненарушенной биотой суши:

$$k_{b0} = 0,041 \text{ год}^{-1}.$$

7. Найден коэффициент релаксации атмосферного углерода, k_{a0} , в ненарушенной системе атмосфера-океан-биота:

$$k_{a0} = -0,085 \text{ год}^{-1}.$$

При любой величине изменения массы атмосферного углерода, m_a , малой по сравнению с общей массой атмосферного углерода M_{a0} , величина изменения массы m_a релаксирует к равновесному состоянию $m_{a0} = 0$ по закону:

$$\dot{m}_a = +k_{a0} m_a \quad \text{или} \quad m_a = m_{a\text{max}} e^{+k_{a0} t},$$

где $m_{a\text{max}}$ – максимальная величина изменения в момент прекращения возмущения (вулканических выбросов, естественных лесных пожаров и пр.). Время релаксации – уменьшения изменения избыточной массы m_a в $e = 2,718$ раз – равно $|k_{a0}^{-1}| \approx 12$ лет.

8. Показано, что возможна остановка глобальных изменений массы атмосферного углерода при современной скорости сжигания ископаемого топлива путем уменьшения освоенную нарушенной человеком части суши, продукция которой составляет сейчас 36% от продукции биоты всей биосферы, на 7% так, чтобы продукция нарушенной части суши понизилась до 29% от продукции биоты всей биосферы.

9. Показано, что наблюдаемое распределение изотопов углерода ^{12}C , ^{13}C и ^{14}C в растворенном органическом углероде океана, а также наблюдаемые разности концентраций изотопов углерода ^{12}C и ^{13}C в атмосфере и перемещиваемом

квазиоднородном слое океана, не противоречат результатам, перечисленным выше в пунктах 1-8.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Gorshkov V.G., Makar'eva A.M. (1996) Regulation of the environment by natural biota. XXV-летие ПИЯФ. Основные направления научной деятельности. Отделение теоретической физики. Гатчина, ПИЯФ, С. 150-157.
2. Горшков В.Г., Макарьева А.М. (1996) Естественное биологическое управление окружающей средой. В сб.: Мат. I Междунар. конф. "Проблемы ноосферы и устойчивого развития". СПбГУ, С. 137-139.
3. Gorshkov V.G., Makarieva A.M. (1997) Biological regulation of the environment: What is this and does it really exist? Abstracts of the VI-th Congress of the European Society of Evolutionary Biology, Arnhem, The Netherlands, 24-28 August 1997.
4. Gorshkov V.G., Makarieva A.M. (1997) Biological regulation of the environment: Its role today. Abstracts of the VI-th Congress of the European Society of Evolutionary Biology, Arnhem, The Netherlands, 24-28 August 1997.
5. Gorshkov V.G., Makarieva A.M. (1998) Impact of terrestrial and oceanic biota on the modern carbon and oxygen cycles. Экол. химия, Т.7, С.129-137.
6. Горшков В.В, Горшков В.Г., Макарьева А.М. (1998) Воздействие биоты суши и океана на глобальную окружающую среду. Материалы XXXII-ой Зимней Школы ПИЯФ. ПИЯФ, Санкт-Петербург, С. 246-267.
7. Горшков В.Г., Макарьева А.М. (1998) Биотическая регуляция окружающей среды: обоснование необходимости сохранения и восстановления естественной биоты на территориях материковых масштабов. Докл. Межд. сем. "Роль девственной наземной биоты в современных условиях глобальных изменений окружающей среды". Гатчина, ПИЯФ, С. 3-20.
8. Горшков В.Г., Макарьева А.М. (1998) Биотическая регуляция окружающей среды: экологически допустимая доля антропогенного потребления продукции древесины. Там же. С. 33-51.
9. Горшков В.В., Горшков В.Г., Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., Макарьева А.М. (1999) Биотическая регуляция окружающей среды. Экология, 1999 N2, С. 105-113.
10. Горшков В.Г., Макарьева А.М. (1999) Влияние девственной и освоенной человеком биоты на глобальную окружающую среду. Исслед. Земли из космоса, 1999 N5, С. 3-11.