

УДК 550.75

**СОВРЕМЕННЫЕ АНТРОПОГЕННЫЕ МОДИФИКАЦИИ ГЛОБАЛЬНЫХ
БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ**

© 2013 Д.Г. Замолодчиков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Биологический ф-т, г. Москва

Поступила 29.03.2013

Работы В.И. Вернадского сформировали представление о человечестве как геологической силе. Развитие современной техногенной цивилизации многократно усилило степень воздействия этой силы на планетарные биогеохимические циклы. В статье на количественном уровне рассмотрены модификации циклов углерода, азота и фосфора, охарактеризована динамика ключевых антропогенных потоков и сопутствующие изменения биосферных пулов. Обсуждаются проблемы позитивности и негативности изменений биогеохимических циклов.

Ключевые слова: биогеохимические циклы, углерод, углекислый газ, метан, азот, фосфор, антропогенное воздействие, эмиссии, сжигание топлива, производство удобрений, балансовые схемы, потепление климата, эвтрофикация.

Труды академика В.И. Вернадского, созданные им в 20-30-х годах XX века [2, 3], сформировали представление о человечестве как глобальной геологической силе. «И хотя сейчас такое массовое проявление жизни, растительной или микробной, охватывает весь земной шар и строит тропосферу, все таки человек сейчас намеренно или стихийно меняет всю окружающую его природу, является геологической силой, ближайшее будущее которой почти безгранично и человеческий разум и воля способны целиком переработать всю окружающую его природу» [3, с. 285]. В.И. Вернадский полагал, что антропогенное усиление миграции атомов в биосфере является позитивным и закономерным процессом, находящимся в полном соответствии с установленными им биогеохимическими принципами. Согласно первому из этих принципов, «биогенная миграция атомов химических элементов в биосфере всегда стремится к максимальному своему проявлению» [3, с. 280]. В соответствии со вторым принципом, «эволюция видов в ходе геологического времени, приводящая к созданию форм жизни, устойчивых в биосфере, идет в направлении, увеличивающем биогенную миграцию атомов биосферы» [3, с. 283].

В прошедшие с тех времен десятилетия геологическая сила человечества продолжала расти и развиваться, способствуя росту численности и уровня жизни населения планеты и закономерно оказывая все большее воздействие на природные процессы и явления.

Замолодчиков Дмитрий Геннадьевич, доктор биологических наук, профессор, зав. кафедрой общей экологии, dzamolod@cepl.rssi.ru

Это воздействие далеко не всегда можно признать позитивным. Со второй половины XX века в научный обиход прочно входит термин «экологический кризис», применяемый к событиям и явлениям различного пространственного масштаба, от локального до глобального. Примерами глобальных экологических кризисов являются изменения климата и разрушение озонового слоя, а их причины состоят в антропогенной модификации биосферных циклов углерода, в первом случае, азота и хлора – во втором. Цель настоящей статьи состоит в количественной характеристике современной антропогенной модификации ключевых биогеохимических циклов биосферы: углерода (в формах углекислого газа и метана), азота и фосфора. Эта характеристика будет осуществлена с использованием разнообразных источников, включая научные публикации, данные центров научной информации, веб-сайты специализированных научных проектов. Автор полагает, что приведенные в статье сведения и обобщения станут полезным дополнением к дискуссии о перспективах развития геологической силы человечества, интерес к которой возрос в связи со 150-летней годовщиной со дня рождения В.И. Вернадского.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Описание антропогенных модификаций всех рассматриваемых биогеохимических циклов осуществляется по единой схеме. Сначала количественно характеризуются ключевые формы антропогенной деятельности, активизирующие миграции соединений данного элемента, а также сопутствующие изменения некоторых биосферных пулов. Затем производится построение балансовой схемы, в фокусе которой находятся входящие и

исходящие потоки элемента с подразделением биосферы на сухопутную и океаническую части.

Характеристика антропогенных изменений биосферного цикла углекислого газа осуществлена на основе сведений по глобальной динамике эмиссий CO_2 от сжигания ископаемого топлива Центра анализа информации по диоксиду углерода (Оак Ридж, США) [11], исторических данных и результатов мониторинга атмосферной концентрации CO_2 по станции Мауна-Лоа Национального управления океанических и атмосферных исследований (Боулдер, США) [23]. Балансовая схема биосферного цикла базируется на результатах Глобального углеродного проекта [13]. Рассмотрение модификаций цикла метана базируется на оценках его антропогенных эмиссий из работ [8, 21], значений концентраций CH_4 по результатам анализа ледяных кернов и инструментального мониторинга на станциях Восточной Антарктики [17], а также инструментальных измерений атмосферных концентраций метана в различных точках земного шара [10]. При построении схемы метанового цикла использованы результаты работы [7].

Оценка динамики антропогенной фиксации атмосферного азота проведена на основе сведений по эмиссиям CO_2 от сжигания ископаемого топлива [11], данных по мировому потреблению азотных удобрений [22] и урожаю возделываемых культур бобовых растений [12]. Для пересчета этих величин в потоки азота использованы коэффициенты, определенные по результатам работы [25]. Балансовая схема азотного цикла построена с учетом найденных величин фиксации, а также оценок из работ [20] и [24]. Антропогенное усиление миграции фосфора рассчитано по динамике потребления фосфорных удобрений [22], прототипом для построения схемы цикла фосфора послужили результаты работ [9, 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Углекислый газ является ключевым веществом, обеспечивающим углеродный обмен между живым и косным веществом. Зеленые растения и другие автотрофы поглощают углекислый газ из атмосферы либо водной среды и с затратой энергии, в основном, солнечной, создают органическое вещество, то есть валовую первичную продукцию. Приблизительно половина созданного органического вещества используется самими автотрофами, при этом углерод окисляется и возвращается в форму CO_2 . Вторая часть органического вещества (чистая первичная продукция) поступает в распоряжение консументов и редуцентов. В итоге, после ряда

переходов по трофическим цепям и пребывания в различных пулах мертвого органического вещества (подстилка, валеж, гумус почвы и т. д.), углерод опять же окисляется до CO_2 . На протяжении по крайней мере ближайших 800 тыс. лет продукционные и деструкционные потоки углерода в биосфере были тесно сбалансированы. Об этом свидетельствует динамика атмосферной концентрации CO_2 , восстановленная по ледяным кернам Антарктики [16]. В периоды оледенений концентрация CO_2 составляла 180–190 ppm, в межледниковья – 270–290 ppm, то есть сходным температурным условиям биосферы соответствовали одинаковые концентрации атмосферного CO_2 . В предшествующие геологические периоды (например, карбоне) продукционные потоки в биосфере преобладали над деструкционными, что приводило к снижению содержания углекислого газа в атмосфере и переводу углерода в осадочные слои литосферы.

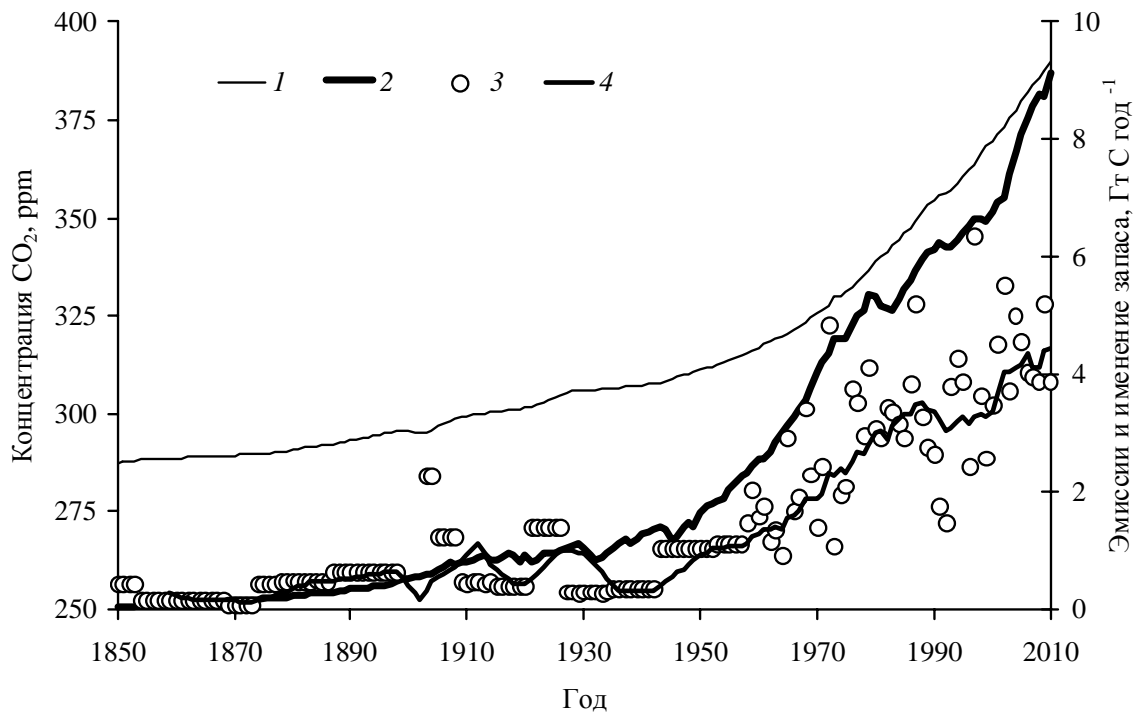
Концентрированные литосферные запасы восстановленного углерода в виде каменного угля, сланцев, нефти, метана являются энергетической основой современной цивилизации. Эмиссии CO_2 при сжигании ископаемого топлива стали главной формой воздействия человечества на углеродный цикл биосферы. С середины XIX века выбросы CO_2 росли с ускоряющимся темпом (рис. 1 А), превысив к 2010 г. уровень 9 Гт С год^{-1} . Суммарный за 1850–2010 гг. антропогенный выброс углекислого газа в атмосферу составил 365 Гт С, и это без учета эмиссий при сведении лесов и пахотной обработке земель. Результатом стало повышение атмосферной концентрации CO_2 от доиндустриальных 290 ppm до современных 390 ppm. Отметим, что суммарный рост запаса CO_2 атмосферы за рассматриваемый период приблизительно равен половине антропогенного выброса данного газа. Следовательно, наземные экосистемы и гидросфера в этот период были стоком атмосферного углерода, увеличив его запасы в различных пулах приблизительно на 200 Гт С.

Рис. 1 Б характеризует состояние углеродного цикла в 2001–2010 гг. Техногенные эмиссии CO_2 составляли в среднем $8.3 \text{ Гт С год}^{-1}$, еще 1.0 добавляли изменения землепользования и сельское хозяйство. В атмосфере оставалось $4.3 \text{ Гт С год}^{-1}$, а $5.1 \text{ Гт С год}^{-1}$ поглощались океаном (49%) и на суше (51%).

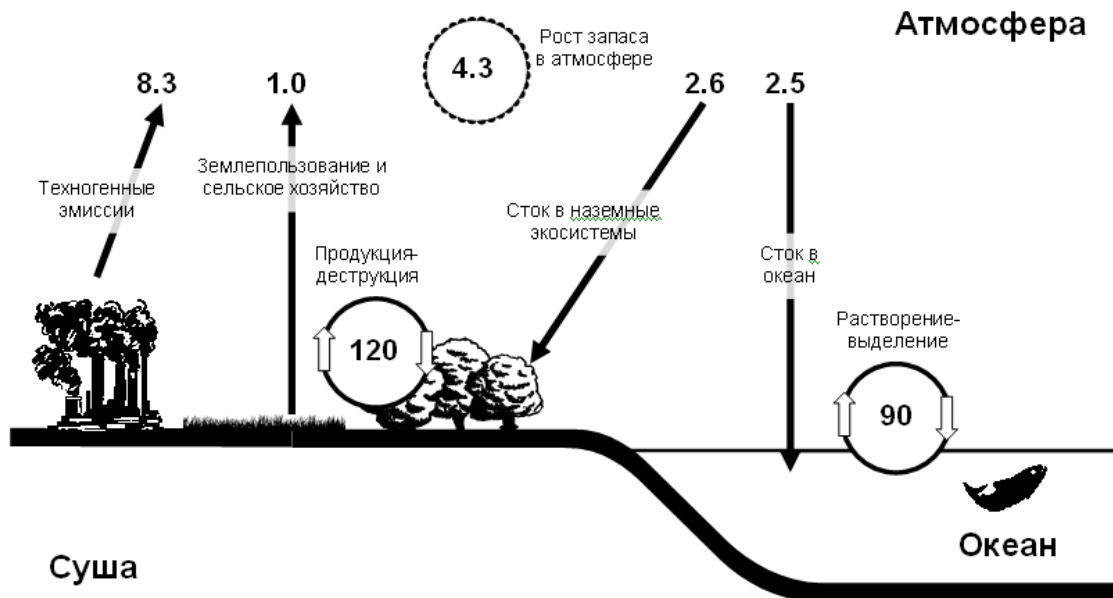
Механизм стока углекислого газа в океан связан с увеличением его растворения при повышении градиента концентраций океан-атмосфера. Причины усиления стока углерода на суше не столь очевидны. Среди объяснений этого эффекта фигурируют активизация фотосинтеза за счет повышения атмосферной концентрации углекислого газа (CO_2 фертилизация) либо атмосферных выпадений связанного азота, изменения землепользования в развитых странах и другие причины. В сравнении с годовым оборотом

углекислого газа в продукционно-деструкционном цикле суши ($120 \text{ Гт С год}^{-1}$) или растворения-выделения на границе атмосферы и океана (90 Гт С год^{-1}) антропогенные выбросы CO_2 ($9.3 \text{ Гт С год}^{-1}$) не

кажутся столь уж высокими. Однако именно они нарушили биосферный баланс углерода и привели к максимальным величинам атмосферных концентраций CO_2 по меньшей мере за 800 тыс. предшествующих лет.



А



Б

Рис. 1. Ключевые антропогенные модификации (А) и современное состояние (Б) биосферного цикла углекислого газа. А: 1 – атмосферная концентрация CO_2 [23]; 2 – техногенные эмиссии CO_2 [11]; 3 и 4 – годовые величины и 10-летнее скользящее среднее изменения запаса CO_2 атмосферы; Б: величины в Гт С год^{-1} .

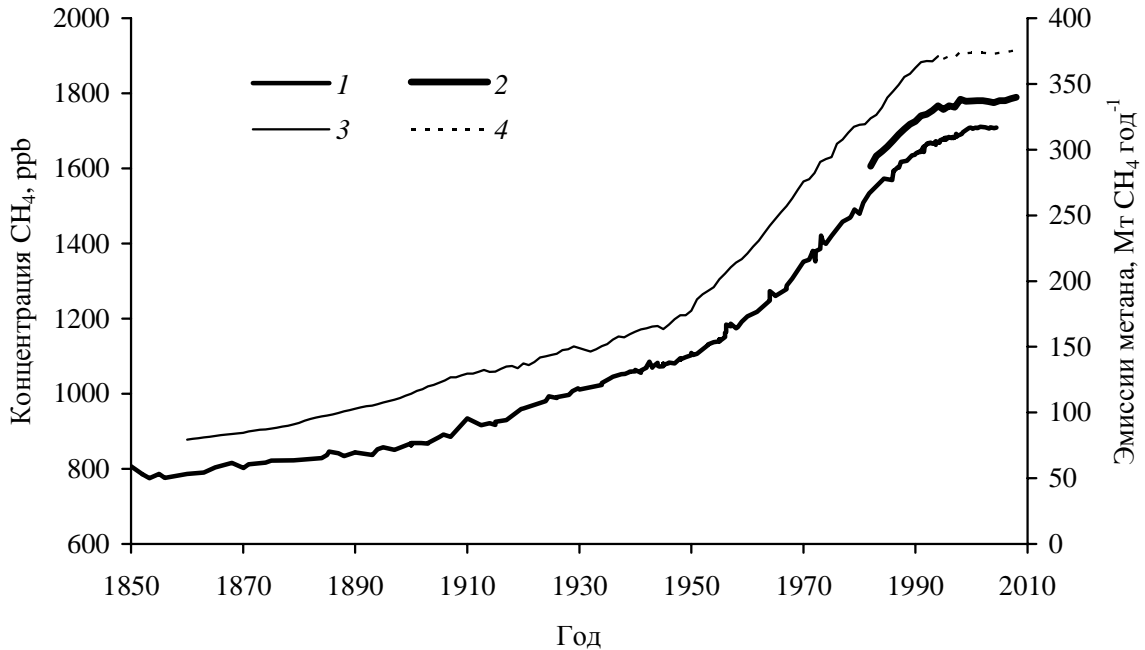
Часть биогенной миграции углерода проходит через метан. Этот газ образуется при микробиологическом преобразовании органических веществ в анаэробных условиях, потому что естественные источники метана

представлены в первую очередь болотами и илами водоемов. CH_4 также поступает в атмосферу в результате ферментационных процессов, идущих в пищеварительном тракте различных животных, например, копытных или

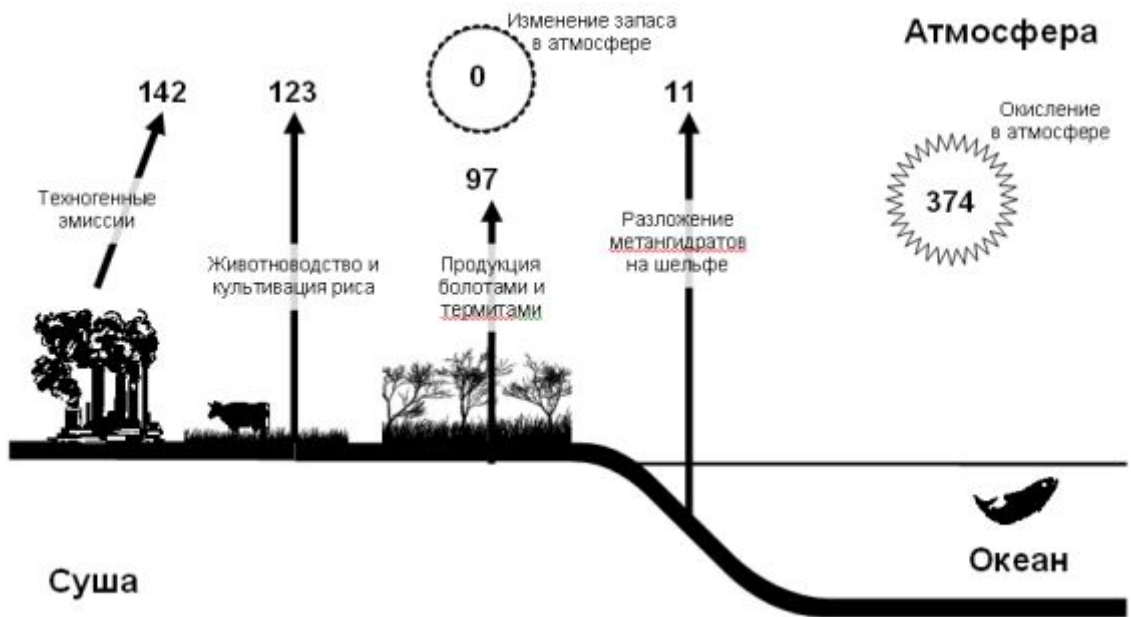
термитов. Кроме того, метан образуется при сжигании различных органических веществ.

Различные виды антропогенной деятельности приводят к активизации эмиссий метана. Это сжигание ископаемого топлива, добыча нефти и угля (в каждой угольной шахте стоят датчики

концентрации метана), добыча и транспортировка природного газа, разведение крупного рогатого скота, культивирование риса. Антропогенные эмиссии метана выросли с 80 Мт CH_4 год⁻¹ в 1860 до 370 Мт CH_4 год⁻¹ в конце 1990-х годов (рис. 2 А).



А



Б

Рис. 2. Ключевые антропогенные модификации (А) и современное состояние (Б) биосферного цикла метана. А: 1 – концентрация CH_4 в Восточной Антарктике [17]; 2 – средняя глобальная концентрация CH_4 [10]; 3 – антропогенные эмиссии CH_4 в 1860–1994 гг. [21] и 4 – вероятные антропогенные эмиссии после 1995 г.; Б: величины в Мт CH_4 год⁻¹.

Атмосферная концентрация метана за XX век увеличилась с 900 до 1800 ppb. Добавим, что в предшествующие 800 тыс. лет максимальные

концентрации CH_4 в атмосфере, приходившиеся на межледниковья, составляли около 700 ppb [15]. В середине 1990-х годов рост атмосферной

концентрации метана замедлился, и в 2000-е годы она находилась на постоянном уровне 1800 ppb. Это явление объясняется современной стабилизацией антропогенных эмиссий метана, связанной с увеличением доли природного газа и нефти и уменьшением вклада каменного угля в мировом энергоснабжении [8]. Фугитивные эмиссии метана при разработке литосферных запасов газа и нефти оказываются заметно меньшими, чем при добыче каменного угля.

Главный планетарный сток метана представлен его окислением гидроксильным радикалом в верхних слоях атмосферы. Чем больше концентрация метана (реагента), тем больше и величина окисления. Стабилизация антропогенных эмиссий CH_4 привела к концу 1990-х годов к выравниванию скоростей поступления и разрушения метана, что обеспечило постоянство его атмосферной концентрации в 2000-е годы (рис. 2 Б). Отметим, что ныне антропогенные эмиссии метана в 2.7 раза превышают его поступление в атмосферу от естественных источников (болота, илы, метангидраты шельфа, термиты).

Биосферный цикл азота выделяется своей удивительной многогранностью. Основной биосферный пул этого элемента представлен молекулярным азотом атмосферы, однако в этой форме азот оказывается недоступен для главных потребителей – зеленых растений. Они усваивают минеральные соединения азота, получая их из почвенных растворов и воды, а также в результате симбиотических взаимоотношений с микоризными грибами и азотфиксирующими бактериями. В деструкционную ветвь азотного цикла вовлечены ряд групп бактерий (аммонифицирующие, нитратные, нитритные), обеспечивающих трансформацию азота органических соединений в доступные для растений минеральные формы. Разнообразны и антропогенные источники минерального азота (рис. 3 А). Во-первых, это производство и потребление азотных удобрений, то есть намеренная активизация биосферной миграции азота. Потребление азотных удобрений возросло за предшествующие 50 лет более чем в 9 раз: с 11 Мт N год⁻¹ до 102 Мт N год⁻¹. Второй мощный антропогенный источник минерального азота связан со сжиганием ископаемого топлива. В процессах горения происходит образование различных оксидов азота. Они попадают в атмосферу, соединяются с водой и выпадают в виде подкисленных осадков. Антропогенные эмиссии оксидов азота возросли с 19 Мт N год⁻¹ в 1960 г. до 68 Мт N год⁻¹ в 2010 г. Кроме того, человечество использует и биогенную по своей природе фиксацию азота, культивируя бобовые

растения, находящиеся в симбиозе с азотфиксирующими бактериями. За 50 лет вклад возделываемых бобовых культур в фиксацию атмосферного азота возрос с 10 до 46 Мт N год⁻¹. В среднем за 2001–2010 гг, суммарный антропогенный вклад в биосферную фиксацию азота составлял 191 Мт N год⁻¹. Эта величина приближается к естественной биосферной фиксации азота, равной 225 Мт N год⁻¹ (рис. 3 Б).

Столь мощное увеличение входящего потока минерального азота приводит к возрастанию первичной продукции в наземных и водных экосистемах (эвтрофикации). Однако изменения пулов минерального азота оказываются не столь уж большими благодаря деятельности денитрифицирующих бактерий. Эти микроорганизмы активизируются при повышении содержания нитратов в почвенных растворах, воде и грунтах водоемов, формируя отрицательную обратную связь в осуществлении биосферного цикла азота. Годовой уровень денитрификации на суше составляет около 240 Мт N год⁻¹, в океане (преимущественно в шельфовой зоне) – 166 Мт N год⁻¹.

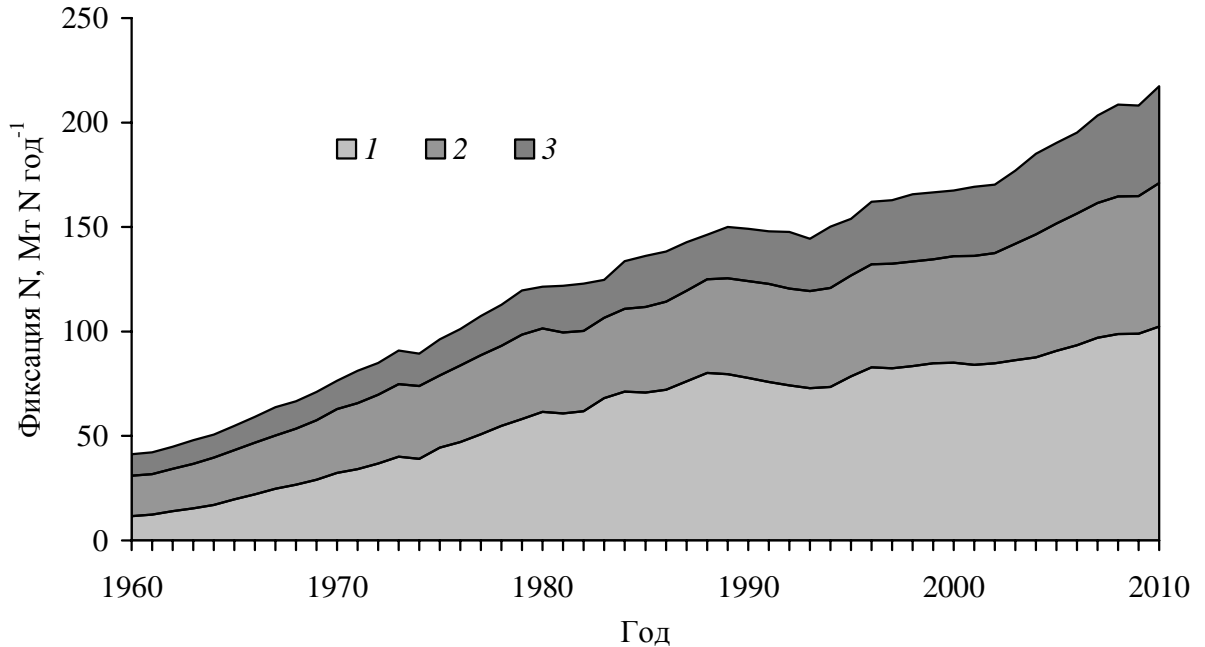
Производство и потребление фосфорных удобрений является основной формой антропогенной активизации миграции данного элемента, некоторые количества фосфора также мобилизуются в промышленных процессах, например, производстве детергентов. Потребление фосфорных удобрений в сельском хозяйстве (рис. 4 А) возросло с 4.6 Мт P год⁻¹ в 1960 г. до 16.9 Мт P год⁻¹ в 2010 г. Обратим внимание на снижение мирового потребления фосфорных удобрений в первой половине 1990-х годов. Здесь сказались социально-экономические реформы в странах бывшего СССР, приведшие к коллапсу сельскохозяйственного производства. Этот же эффект, хотя и в меньшей степени, прослеживается на динамике потребления азотных удобрений (рис. 3 А).

В отличие от азота, газообразные соединения фосфора (фосфины) играют крайне малую роль в осуществлении его биосферного цикла, потому можно ограничиться рассмотрением лишь его миграций в растворах и взвешах (рис. 4 Б). Поступление фосфора в наземные экосистемы в результате естественной эрозии коренных пород ныне составляет около 18 Мт P год⁻¹, то есть чуть больше величины антропогенного вноса с удобрениями. Соединения фосфора обладают меньшей подвижностью и большей устойчивостью по сравнению с минеральным азотом. Потому они накапливаются в возделываемых почвах, а также в пресных водоемах. Суммарное увеличение пула подвижного фосфора на суше ныне близко к 12

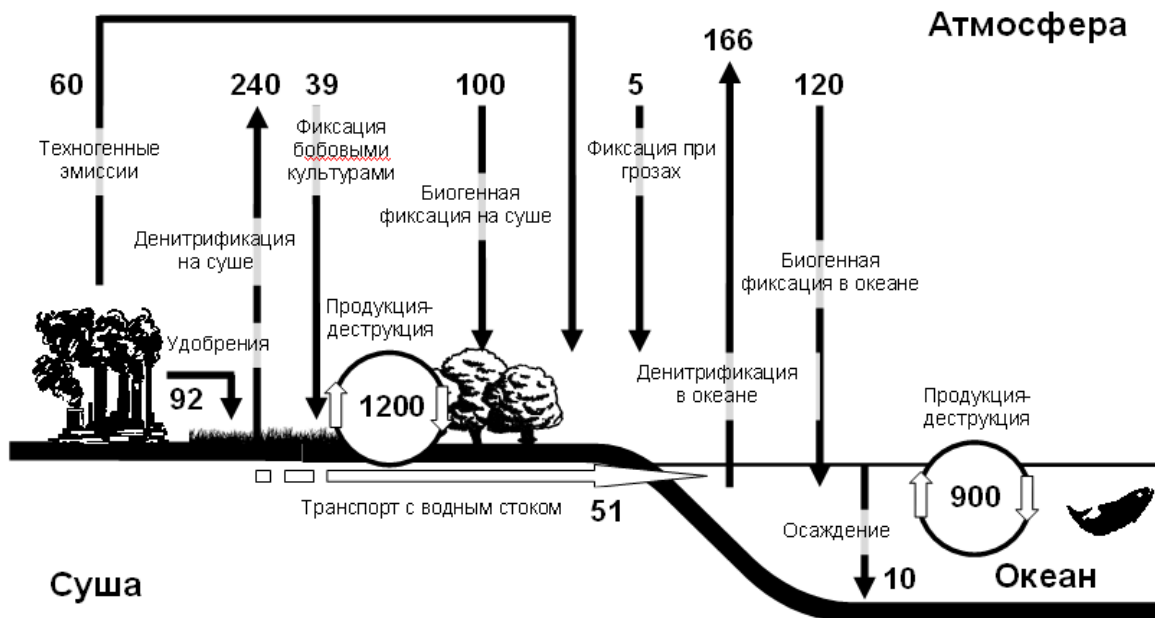
Мт Р год⁻¹. В океан с водным стоком перемещается 22 Мт Р год⁻¹, такое же количество ежегодно осаждается в океане, преимущественно в шельфовой зоне.

Приведенный выше краткий обзор биогеохимических циклов углерода, азота и

фосфора приводит к предварительному выводу, что все они испытывают мощное модифицирующее воздействие со стороны человечества.

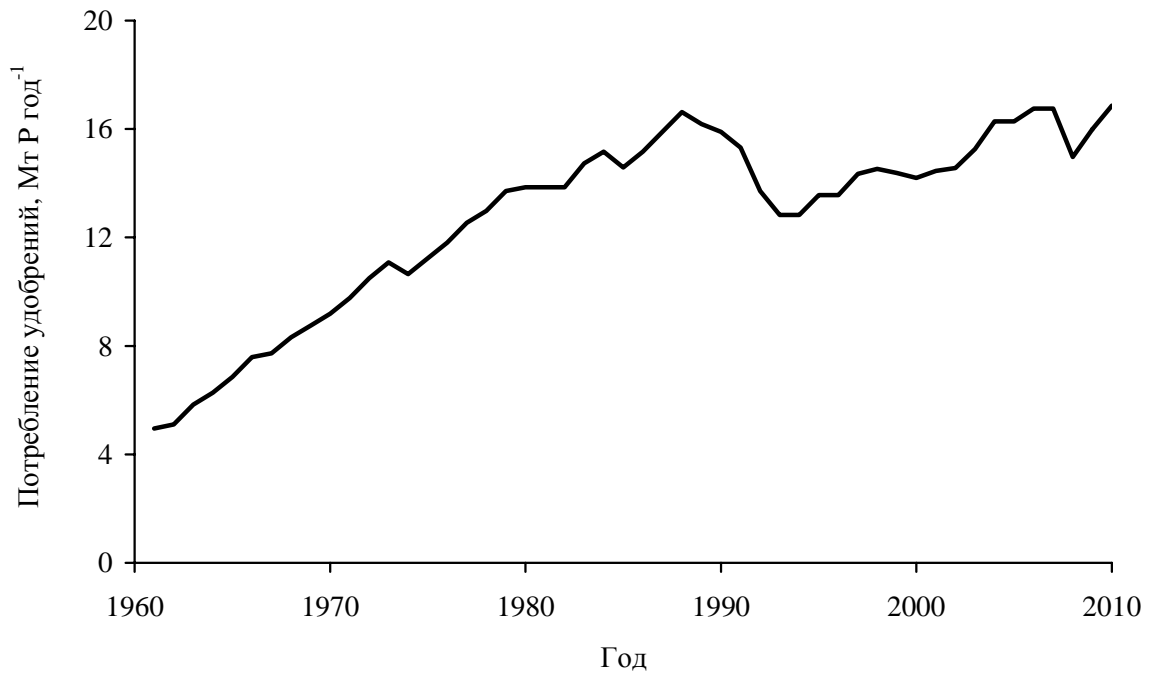


А



Б

Рис. 3. Ключевые антропогенные модификации (А) и современное состояние (Б) биосферного цикла азота. А: 1 – потребление азотных удобрений [22]; 2 – фиксация при сжигании топлива; 3 – фиксация при возделывании бобовых культур; Б: величины в Мт N год⁻¹.



А



Б

Рис. 4. Потребление фосфорных удобрений (А) [22] и современное состояние биосферного цикла фосфора (Б). Б: величины в Мг Р год⁻¹.

Попробуем количественно охарактеризовать степень этой модификации. Для циклов азота и фосфора возможны 2 варианта оценки степени воздействия: 1) в сравнении с общим количеством элемента в продукционно-деструкционном обороте биосферы; 2) в сравнении с количеством элемента в новообразованных природных соединениях, пригодных для усвоения растениями. Для углекислого газа приведем лишь первый вариант оценки, хотя, в принципе, возможен и второй, в сравнении, например, с

потоком CO₂, выделяющимся при вулканической деятельности. Для метана, не участвующем в базовой части продукционно-деструкционного цикла биосферы, возможен лишь второй вариант оценки.

Оценки степени модификации рассмотренных биогеохимических циклов представлены в табл. 1. Степень антропогенной модификации, оцененная в сравнении с продукционно-деструкционным оборотом элемента, оказывается не столь уж высокой: для CO₂ это 4.4%, азота – 9.1%, фосфора – 4.6%. Иная ситуация получается при оценке в

сравнении с новообразованием соединений: для азота это 84.9%, для фосфора – 88.9%, для метана – 245.5%. Таким образом, антропогенное вовлечение элементов в биосферные круговороты оказывается сравнимым или даже превышающим по уровню естественные процессы. Следует полностью разделить мнение В.И. Вернадского, что «человечество закономерным движением ... со все усиливающимся в своем проявлении

темпом, охватывает всю планету, выделяется, отходит от других живых организмов как новая небывалая геологическая сила. Со скоростью, сравнимой с размножением, выражаемой геометрической прогрессией в ходе времени, создается этим путем в биосфере все растущее множество новых для нее косных природных тел и новых больших природных явлений» [2, с. 252].

Таблица 1. Степень антропогенной модификации биогеохимических циклов

Элемент: вещество	Поток, Мт элемента* год ⁻¹			Степень антропогенной модификации, %	
	оборот в биосфере	ново-образование в биосфере	ново-образование человеком	в сравнении с оборотом	в сравнении с ново-образованием
C: CO ₂	210000	-	9300	4.4	-
C: CH ₄	-	108	265	-	245.4
N: минеральный N	2100	225	191	9.1	84.9
P: подвижный P	350	18	16	4.6	88.9

*Для метана – в Мт CH₄ год⁻¹

К сожалению, помимо очевидных благ, выражающихся в обеспечении роста численности и уровня жизни человечества, антропогенная активизация миграции элементов приносит и негативные моменты. Углекислый газ и метан являются парниковыми газами, поскольку спектр их поглощения располагается в инфракрасной области. Задерживая инфракрасное излучение, идущее от поверхности Земли, они создают парниковый эффект. Увеличение атмосферных концентраций CO₂ и CH₄ (рис. 1 А и 2 А) привело к росту глобальной температуры на 0.7 °С за 1905–2005 гг. [6]. Впрочем, далеко не все представители научной общественности разделяют антропогенную концепцию современного потепления, отмечая исключительную роль естественных климатических циклов [1, 4, 14 и др.]. Недавнее исследование автора настоящей статьи привело к формулировке синтетической точки зрения, объединяющей антропогенную и естественную концепции потепления [5].

Негативность глобального потепления в первую очередь связана с ускорением роста уровня океана, а также с нарастанием частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений (наводнений, засух, ураганов). Международным сообществом с начала 1990-х годов предпринимаются меры по сохранению глобального климата путем регулирования эмиссий парниковых газов. Действенность этих мер в глобальном масштабе крайне низка, о чем красноречиво свидетельствует рис. 1 А.

Антропогенная активизация миграции азота и фосфора приводит к прогрессирующей проблеме эвтрофикации пресных и прибрежных морских

вод. Увеличение концентраций растворимых азотных и особенно фосфорных соединений в воде способствует всплеску первичной продукции планктонных водорослей и макрофитов. Эта ситуация вызывает ускоренное зарастание пресных стоячих водоемов и их конверсию в болота. В прибрежных морских водах следующий за размножением водорослей всплеск деструкционных процессов приводит к активизации потребления кислорода бактериями-редуцентами, развитию гипоксии и гибели различных животных, в том числе рыб. Массовые случаи развития гипоксии характерны для побережья США, Западной Европы, Японии [19], то есть стран с наиболее высокой степенью индустриализации сельского хозяйства.

В настоящее время степень экономического ущерба от негативных последствий глобального потепления и эвтрофикации, конечно же, меньше в сравнении с выгодами, получаемыми от использования ископаемого топлива либо удобрений. Однако, в условиях дальнейшего роста цивилизации при сохранении современных технологических принципов негативные эффекты, безусловно, будут нарастать, задерживая и останавливая развитие сначала отдельных регионов, а затем и цивилизации в целом. И в этой связи на первый план выступают задачи сдерживания темпов роста антропогенной миграции элементов. Опыт современных усилий по ограничению роста эмиссий парниковых газов от сжигания ископаемого топлива показывает, что решение таких задач в глобальном масштабе встречает серьезные затруднения. Однако задачи сдерживания антропогенной миграции элементов надо хотя бы обсуждать, делая их понятными и

привычными для широких слоев современного общества.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (соглашение № 8107).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдусаматов Х.И. Солнце диктует климат Земли. СПб.: Logos, 2009. 197 с.
2. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление // Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-Пресс, 2004. С. 242-469.
3. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 2001. 376 с.
4. Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. Что происходит с климатом Земли? // Экологический вестник России. 2012. № 5. С. 34–41.
5. Замолодчиков Д.Г. Естественная и антропогенная концепции современного потепления климата // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83. № 3. С. 227–235, doi: 10.7868/S0869587313020230.
6. Изменение климата, 2007 г.: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы по изменению климата / Ред. Пачаури Р.К., Райзингер А. Женева: МГЭИК, 2007. 104 с.
7. Augenbraun H., Matthews E., Sarma D. The Global Methane Cycle / Goddard Institute for Space Studies. National Aeronautics and Space Administration. [New York], 2012. URL: <http://icp.giss.nasa.gov/education/methane/intro/cycle.htm>
8. Aydin M., Verhulst K.R., Saltzman E.S., Battle M.O., Montzka S.A., Blake D.R., Tang Q., Prather M.J. Recent decreases in fossil-fuel emissions of ethane and methane derived from firn air // Nature. 2011. Vol. 476. P. 198–201, doi:10.1038/nature10352.
9. Bennet E.M., Carpenter S.R., Caraco N.F. Human impact on erodable phosphorus and eutrophication: a global perspective // BioScience. 2001. Vol. 51, No 3. P. 227–234.
10. Blake D. Methane, nonmethane hydrocarbons, alkyl nitrates, and chlorinated carbon compounds including 3 chlorofluorocarbons (CFC-11, CFC-12, and CFC-113) in whole-air samples / Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. [Oak Ridge], 2010. URL: <http://cdiac.ornl.gov/trends/otherat/blake/blake.html>.
11. Boden T.A., Marland G., Andres R.J. Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions / Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. [Oak Ridge], 2012. URL: http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/overview_2009.html.
12. FAOSTAT / Food And Agricultural Organization of United Nations. [Rome], 2013. URL: <http://faostat3.fao.org/home/index.html>.
13. Global Carbon Budget / Global Carbon Project. 2012. URL: <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/index.htm>.
14. Landscheidt T. New little ice age instead of global warming // Energy and Environment. 2003. V. 14. P. 327–350.
15. Loulergue L., Schilt A., Spahni R., Masson-Delmotte V., Blunier T., Lemieux B., Barnola J.-M., Raynaud D., Stocker T.F., Chappellaz J. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years // Nature. 2008. Vol. 453. P. 383–386, doi:10.1038/nature06950.
16. Lüthi D., Le Floch M., Bereiter B., Blunier T., Barnola J.-M., Siegenthaler U., Raynaud D., Jouzel J., Fischer H., Kawamura K., Stocker T.F. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. Nature. 2008. Vol. 453. P. 379–382, doi:10.1038/nature06949.
17. MacFarling Meure C., Etheridge D., Trudinger C., Steele P., Langenfelds R., van Ommen T., Smith A., Elkins J. Law Dome CO₂, CH₄ and N₂O ice core records extended to 2000 years BP // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33, L14810, doi: 10.1029/2006GL026152.
18. Paytan A., McLaughlin K. The oceanic phosphorus cycle // Chem. Rev. 2007. V. 107. P. 563–576.
19. Rabalais N.N., Diaz R.J., Levin L.A., Turner R.E., Gilbert D., Zhang J. Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia // Biogeosciences. 2010. V. . P. 585–619.
20. Seitzinger S.P., Mayorga E., Bouwman A.F., Kroeze C., Beusen A.H.W., Billen G., Van Drecht G., Dumont E., Fekete B.M., Garnier J., Harrison J.A. Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends // Global Biogeochemical Cycles. 2010. Vol. 24, GB0A08, doi:10.1029/2009GB003587.
21. Stern D.I., Kaufmann R.K. Annual Estimates of Global Anthropogenic Methane Emissions: 1860–1994 / Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. [Oak Ridge], 1998. URL: <http://cdiac.ornl.gov/trends/meth/ch4.htm>.
22. Sutton M.A., Bleeker A., Howard C.M. et al. Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology, 2013. 114 p.
23. Tans P., Keeling R. Trends in atmospheric carbon dioxide / Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, NOAA, [Boulder], 2012. URL: http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2_data_mlo.html.
24. The Global Water and Nitrogen Cycles / Introduction to Global Change. University of Michigan. [Michigan], 2002. URL: http://www.globalchange.umich.edu/globalchange1/current/lectures/kling/water_nitro/water_nitro.html
25. Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Schlesinger W.H., Tilman D.G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences // Ecological Applications. 1997. Vol. 7(3). P. 737–750.

**CONTEMPORARY ANTHROPOGENIC MODIFICATIONS
OF GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES**

© 2013 D.G. Zamolodchikov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Moscow

Publications of V.I. Vernadsky formed a representation of mankind as a geological force. Current development of technogenic civilization strongly increased influence of this force on global biogeochemical cycles. Modifications of carbon, nitrogen and phosphorus cycles are considered in this paper on quantitative level, dynamics of key anthropogenic fluxes and correspondent changes of biospheric pools are described. Problems of positivity or negativity of changes of biogeochemical cycles are discussed.

Key words: biogeochemical cycles, carbon, carbon dioxide, methane, nitrogen, phosphorus, anthropogenic influence, emissions, fuel burning, fertilizer production, balance schemes, global warming, eutrophication.

Zamolodchikov Dmitriy Gennadievich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head. Department of General Ecology, dzamolod@cepl.rssi.ru