

**Роль  
наземных экосистем  
в регуляции климата  
и место России  
в посткиотском  
процессе**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова

---

Программа фундаментальных исследований Президиума РАН  
«Биологическое разнообразие»

Букварева Е.Н.

**Роль наземных экосистем в регуляции климата  
и место России в посткиотском процессе**

Научные редакторы  
Д.С. Павлов  
Ю.А. Курбатова

Товарищество научных изданий КМК  
Москва ♦ 2010

**Букварева Е.Н.** Роль наземных экосистем в регуляции климата и место России в посткиотском процессе. Товарищество научных изданий КМК. 2010. 97 с.

Научные редакторы: Д.С. Павлов, Ю.А. Курбатова

Рецензенты: А.Б. Савинецкий, д.б.н., ИПЭЭ РАН; П.Н. Варгин, к.ф.-м.н., Росгидромет.

В обзоре освещена роль наземных экосистем в регуляции климата, обобщены современные представления об основных климаторегулирующих функциях биоты, а также о современных антропогенных нарушениях системы биосферной регуляции климата. Подняты вопросы о ключевой роли природных экосистем России в глобальной климатической регуляции.

Работа призвана привлечь внимание широкого научного сообщества к определяющей роли живой природы в климатических сценариях будущего.

Обзор может быть полезен в качестве обобщающего материала по климаторегулирующим экосистемным функциям для специалистов в области климата, для лиц, принимающих решения в области природопользования, мониторинга и охраны окружающей среды, а также для широкого круга людей, интересующихся проблемами охраны природы

**ISBN**

© Е.Н. Букварева, 2010

© ИПЭЭ РАН, 2010

© Товарищество научных изданий КМК, издание, 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1. Биота – ключевой регулятор климата</b>	
1.1. Климаторегулирующие функции экосистем	1
1.2. Функции регуляции углеродного цикла	3
1.3. Биогеофизические климаторегулирующие функции	10
1.4. Экосистемные функции по смягчению последствий экстремальных природных явлений	16
1.5. Обратные связи и формирование нескольких устойчивых состояний	19
<b>2. Антропогенные нарушения системы биосферной регуляции климата</b>	
2.1. Антропогенная эмиссия парниковых газов	25
2.2. Сокращение площади природных экосистем	26
2.3. Антропогенные нарушения экосистемных функций по регуляции углеродного цикла	28
2.4. Антропогенные нарушения биогеофизических климаторегулирующих функций экосистем	36
2.5. Выход климатической системы за границы природной динамики	44
<b>3. Воздействие изменений климата на экосистемные функции</b>	
3.1. Изменения площади и границ природных зон	49
3.2. Изменения функций регуляции углеродного цикла	56
3.3. Прогноз изменения биогеофизических функций	65
<b>4. Стратегия в отношении экосистем в условиях неполного знания</b>	
4.1. «Ключевые неопределенности» в знаниях о климатической системе и принцип предосторожности	67
4.2. Оценка значения экосистемных функций для будущей климатической стратегии	70
4.3. Основные направления изменения политики с учетом климаторегулирующих функций экосистем	73
<b>5. Глобальные функции российских экосистем и место России в посткиотском процессе</b>	79
<b>Литература</b>	84

Главная задача данного обзора – привлечь внимание научного сообщества к роли живой природы в определении будущего климатического сценария. Представленные материалы подготовлены не специалистом по климату, а биологом, и ни в коей мере не претендуют на полноту и точность. Однако они могут послужить поводом и дать некоторую основу для продолжения дискуссии о роли экосистем в регуляции глобального и регионального климата, а также о роли России, как страны обладающей крупнейшими массивами природных экосистем, в процессе выработки посткиотских соглашений.

## **1. БИОТА – КЛЮЧЕВОЙ РЕГУЛЯТОР КЛИМАТА**

### **1.1. Климаторегулирующие функции экосистем**

Климатические изменения и меры по их смягчению – одна из основных тем нынешней глобальной политики. Внимание привлечено прежде всего к задаче сокращения антропогенных выбросов парниковых газов. При этом в тени жарких споров об ответственности разных стран за сокращение выбросов остается судьба ключевого регулятора климата Земли – природных экосистем.

Современные условия жизни на Земле, в которых может существовать человек, сформированы жизнедеятельностью биоты в течение миллиардов лет. Достаточно вспомнить, что кислородная атмосфера появилась и сохраняется благодаря деятельности фотосинтезирующих организмов.

Основой представлений о механизмах природной регуляции среды, как необходимого условия существования человечества, являются, с одной стороны, концепции биосферы В.И. Вернадского, Геи Дж. Лавлока, биотической регуляции среды (Горшков, 1995; Горшков и др., 1999), а с другой – опыт огромного числа экологических исследований регуляторных механизмов внутри популяций, видов, экологических сообществ и экосистем, позволивших конкретизировать понятия средообразующих функций<sup>1</sup>, поддерживающих и регулирующих экосистемных услуг, а также роль биологического разнообразия в их осуществлении.

Важнейший блок средообразующих функций экосистем – функции по регуляции климата. Их можно разделить на две взаимосвязанные группы (рис. 1):

---

<sup>1</sup> В Национальной стратегии сохранения биологического разнообразия России (2001) в числе основных жизненно важных для человека функций биоразнообразия выделена средообразующая функция, которая заключается в поддержании биосферных процессов на Земле и формировании благоприятных для жизни человека условий. Основные средообразующие функции природных биосистем: поддержание биогеохимических циклов вещества, газового баланса и влажности атмосферы; стабилизация климатических показателей; формирование устойчивого гидрологического режима территорий и самоочищение природных вод; формирование биопродуктивности почв и защита их от эрозии; уменьшение интенсивности экстремальных природных явлений (наводнений, засух, жары, ураганов и др.) и ущерба от них; биологическая переработка и обезвреживание отходов.

- **биогеохимические**, связанные с процессами фотосинтеза, автотрофного и гетеротрофного дыхания (дыхания растений, животных, грибов и микроорганизмов) в экосистемах, определяющие потоки основных парниковых газов (прежде всего  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) между экосистемами и атмосферой;
- **биогеофизические**, включающие регуляцию тепловых и радиационных потоков между поверхностью Земли и атмосферой (альbedo<sup>2</sup> и тепловые характеристики поверхности), а также регуляцию водного баланса суши (эвапотранспирация<sup>3</sup>, влияние на режим осадков и сток рек).

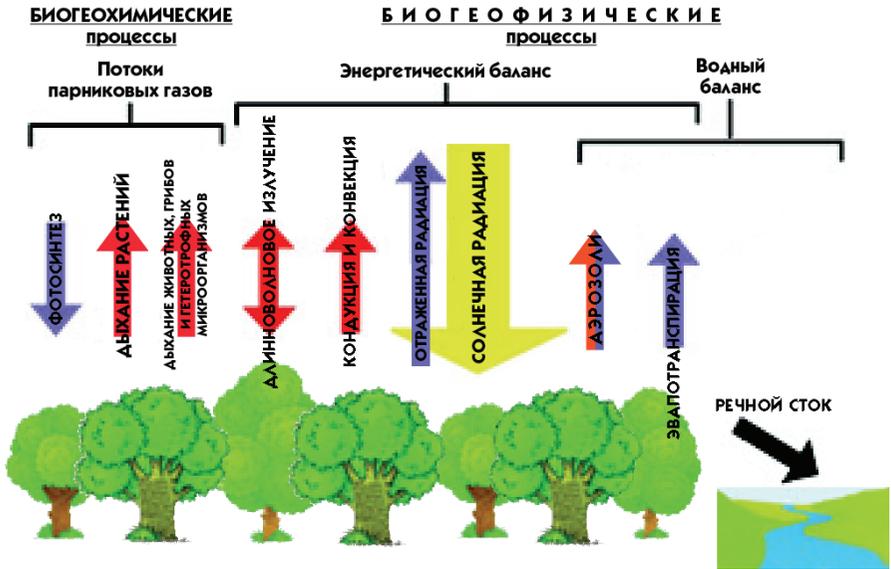


Рис.1. Основные климаторегулирующие функции экосистем. Синие стрелки показывают «охлаждающий» эффект, красные – «нагревающий» (по Chapin et al., 2008, с изменениями).

Влияние экосистем на концентрацию парниковых газов имеет глобальный эффект, а биогеофизические воздействия ощущаются прежде всего на региональном уровне, но при больших масштабах изменений экосистем они также переходят на глобальный уровень.

Кроме того экосистемы выполняют **функции снижения разрушительной силы экстремальных природных явлений и ущерба от них**, тесно связанные с проблемой климатической устойчивости и чрезвычайно важные для обеспечения безопасности людей и устойчивого развития экономики.

<sup>2</sup> Альbedo - (лат. albedo белизна) способность поверхностей или отдельных тел отражать солнечную радиацию. Определяется в долях (%) отраженной радиации от поступающей на поверхность (Словарь терминов по физической географии; <http://www.igras.ru/>).

<sup>3</sup> Эвапотранспирация – суммарное испарение воды растениями и поверхностью почвы.

## 1.2. Экосистемные функции регуляции углеродного цикла

Основное внимание сегодня привлечено к росту парниковых газов в атмосфере, поэтому в последние годы усилия в области исследования климаторегулирующих функций экосистем направлялись прежде всего на изучение углеродного цикла и потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  между экосистемами и атмосферой.

Несмотря на активные исследования, точные значения запасов углерода в основных природных хранилищах и его потоков между экосистемами и атмосферой пока неизвестны. Однако порядок величин можно считать установленным (рис. 2). Запасы углерода в биомассе, почве, торфе и верхнем слое мерзлоты **в тысячи раз превышают мощность антропогенных потоков**, а природные потоки углерода **в десятки раз больше антропогенных**.

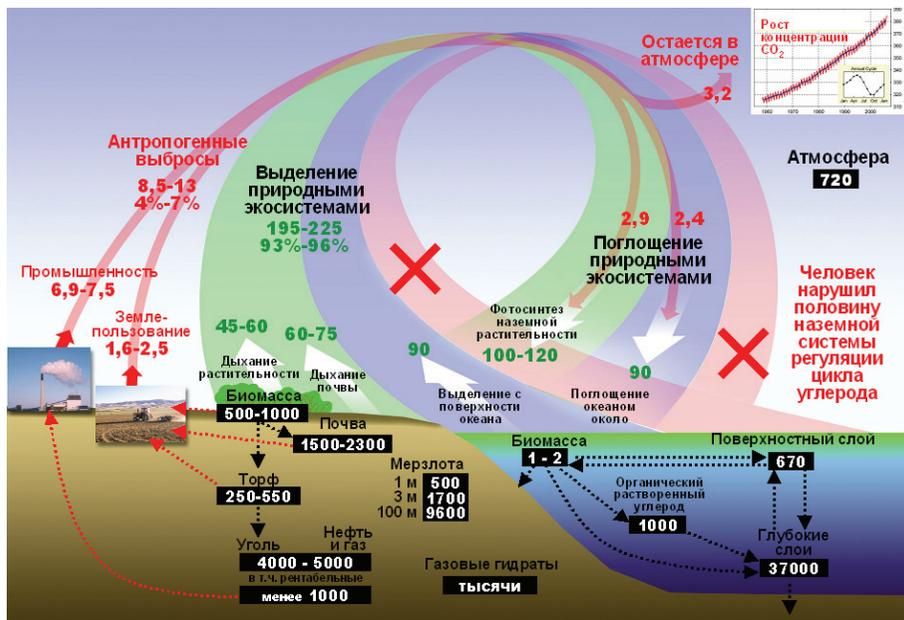


Рис. 2. Основные хранилища ( $\text{ГтC}^5$ ) и потоки ( $\text{ГтC}$  в год) углерода. Значения запасов в разных хранилищах могут перекрываться, например, часть запасов углерода в мерзлоте, может быть учтена в запасах почвы и т.п. (по данным: Заварзин, Кудеяров, 2006; МГЭИК, 2000, 2007; Семилетов, 1995; Falkowski et al., 2000; House et al., 2002; Jobbagy, Jackson, 2000; Kvenvolden, 1999; Meinshausen et al., 2009; Parish et al., 2008; Schuur et al., 2008; Tarnocai et al., 2009).

<sup>4</sup> Кроме этих основных парниковых газов экосистемы участвуют в формировании потоков множества других парниковых газов –  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$  и других, а также различных органических соединений (Arneeth et al., 2009).

<sup>5</sup> Гт (гигатонна) – миллиард тонн; Мт (мегатонна) – миллион тонн; ГтС, МтС – гигатонна и мегатонна углерода.

Антропогенные выбросы из-за сжигания ископаемого топлива и землепользования составляют лишь несколько процентов от мощности потоков углерода между природными экосистемами и атмосферой (3,4% по данным МГЭИК, 2007, подавляющее большинство других оценок также находится существенно ниже 10%). Например, микробное разложение органики в почве – основной путь возврата углерода из наземных экосистем в атмосферу – в 7 раз больше его промышленной эмиссии (Заварзин, Кудяров, 2006).

Очевидно, что даже небольшое, относительно их общей мощности, изменение природных потоков углерода окажет столь сильное влияние на концентрацию парниковых газов в атмосфере, что может свести на нет все усилия по сокращению их промышленных выбросов.

### 1.2.1. ПОТОКИ ОСНОВНЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ МЕЖДУ ЭКОСИСТЕМАМИ И АТМОСФЕРОЙ

Основные процессы регуляции потоков CO<sub>2</sub> наземными экосистемами – его поглощение растительностью в ходе фотосинтеза и выделение при дыхании биоценозов (растений, почвенной биоты и других живых организмов)<sup>6</sup>. Дыхание почвы и растительности составляет 30% и 24% суммарной глобальной эмиссии CO<sub>2</sub> соответственно (рис. 3)

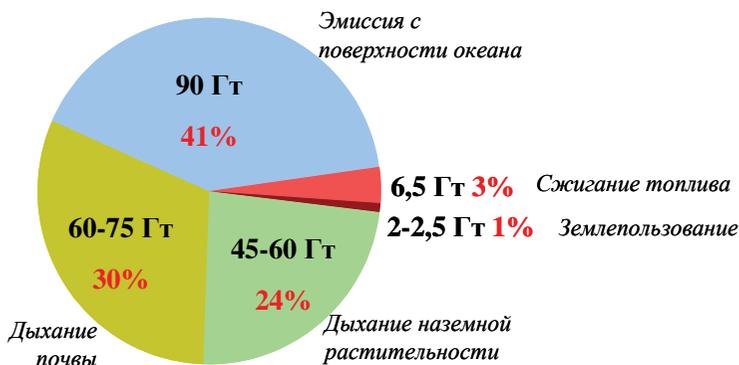


Рис.3. Суммарная годовая эмиссия CO<sub>2</sub>, ГтС в год (по данным: Заварзин, Кудяров, 2006).

Метан поступает в атмосферу из природных и антропогенных источников, находящихся в основном на суше (рис. 4), и выводится при физико-химическом окислении в атмосфере (небольшая часть окисляется также метанотрофными бактериями). В отличие от потоков CO<sub>2</sub>, определяющихся в основном природ-

<sup>6</sup> Существуют и другие потоки CO<sub>2</sub> между атмосферой и экосистемами. Например, исследования в Китае и США показали, что щелочные почвы пустынь могут поглощать существенное количество CO<sub>2</sub> в силу чисто химических процессов (Stone, 2008).

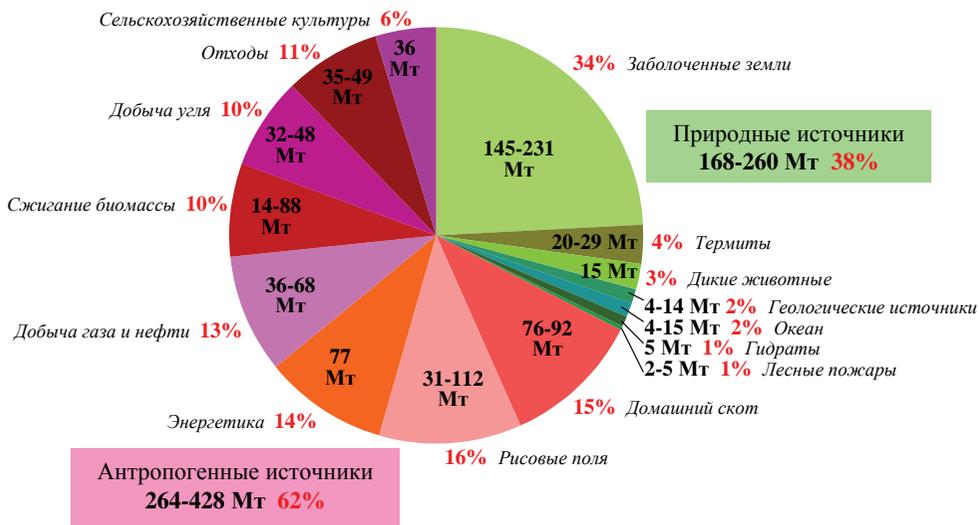


Рис. 4. Основные источники метана (Оценочный доклад, 2008).

ными источниками, от 1/2 до 2/3 современной эмиссии метана имеет антропогенное происхождение<sup>7</sup> (рис.4, Оценочный доклад, 2008; МГЭИК, 2007).

Метан сильнее влияет на парниковый эффект, чем CO<sub>2</sub>, но время его жизни в атмосфере меньше. Для оценки действия на климат разных парниковых газов используется методика сравнения их радиационного воздействия<sup>8</sup> и потенциала глобального потепления ПГП<sup>9</sup>. ПГП метана для временного горизонта в 20 лет в 72 раза выше, чем у CO<sub>2</sub>, для 100 лет (временной горизонт, принятый Киотским протоколом) – в 25 раз выше, для 500 лет – в 7,6 раз выше (Solomon et al., 2007).

То, какую функцию играет природная экосистема – стока или источника углерода - определяется соотношением скоростей его аккумуляции в ходе фотосинтеза и выделения при дыхании сообщества. Чрезвычайно важную роль играет почва. В наземных экосистемах дыхание почвы составляет больше половины их

<sup>7</sup> В России на фоне общей тенденции снижения антропогенных выбросов парниковых газов с 1990 по 2004 гг., выбросы метана в секторе «отходы» нарастают за счет выделения со свалок (полигонов ТБО). Выделение метана со свалок за этот период увеличилось более чем в 1,5 раза (Национальный доклад о кадастре...2006). Это связано с увеличением вывоза отходов на свалки, несмотря на сокращение численности населения и промышленного производства. Сегодня свалки занимают в России около 1 млн. га земель (Заседание Госсовета РФ по вопросам экологии 27.05.2010, <http://eco.rian.ru/danger/20100527/239219525.html>).

<sup>8</sup> Радиационное воздействие - мера влияния того или иного фактора на баланс энергии в системе «Земля-атмосфера», показатель его важности для изменений климата (МГЭИК, 2007).

<sup>9</sup> Потенциал глобального потепления ПГП (Global Warming Potential GWP) – воздействие единицы массы данного газа в атмосфере (как смеси идеально перемешанных газов), интегрированное по выбранному временному горизонту. ПГП учитывает разное время жизни газов в атмосфере и их разную эффективность поглощения инфракрасного излучения. Киотский протокол основан на ПГП однократных выбросов газов за столетний интервал времени (МГЭИК, 2007; IPCC 2001 b).

суммарного дыхания, а запасы углерода в почвах, как сказано выше, в 3-7 раз больше его запасов в фитомассе. Если учесть, что дыхание экосистем во много раз превосходит объемы всей антропогенной эмиссии, то процессы, происходящие в почве, следует считать ключевым регулятором углеродного цикла (Заварзин, Кудеяров, 2006).

Поглощение углерода происходит, когда наблюдается прирост биомассы, почвообразование, торфообразование или отложение других углеродсодержащих осадков. И наоборот, усиление процессов разложения органического углерода в почве, торфе, мерзлоте, ведет к переключению функции экосистемы с поглощения углерода на его выделение. Как будет показано ниже, этому способствуют антропогенные нарушения экосистем.

Сегодня основной механизм долговременного захоронения углерода наземными экосистемами – образование торфа в болотах<sup>10</sup>. Эта функция определяется замедлением разложения органики в анаэробных условиях ниже уровня воды. Но этот же фактор усложняет оценку климатической роли болот, так как в результате анаэробного бактериального разложения органики выделяется метан (над водой в аэробных условиях, в болотах, так же как в других наземных экосистемах, в результате разложения органики образуется CO<sub>2</sub>). Величина эмиссии метана болотами определяется уровнем воды и соотношением мощности аэробной и анаэробной зон. Аналогичные процессы происходят при оттаивании мерзлоты – в аэробных условиях образуется CO<sub>2</sub>, в анаэробных – CH<sub>4</sub>.

Болота являются крупнейшим природным источником метана (рис. 4), выделяя от 100 до 231 Мт CH<sub>4</sub> в год (МГЭИК, 2007; Ecosystems..., 2005). Вклад тропических болот составляет 52-58% этого объема (рис.5; Bloom et al., 2010). Северные болота выпускают от 15 до 65 Мт метана в год<sup>11</sup> (Anisimov, Reneva, 2006; Frohking et al., 2006; Frohking, Roulet, 2007; NEESPI, 2004 b).

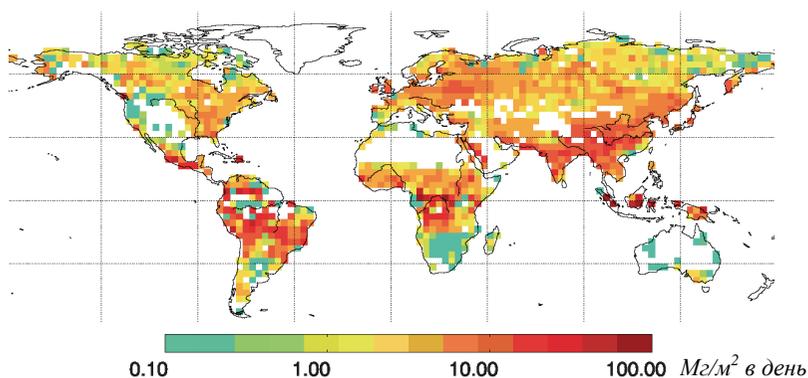


Рис.5. Эмиссия метана из болот 2003-2005 гг. (Bloom et al., 2010).

<sup>10</sup> В морских экосистемах важную роль играют формирование карбонатов кораллами и отложения известковых скелетов планктонных организмов (Ecosystems..., 2005).

## 1.2.2. ЭКОСИСТЕМНЫЕ ФУНКЦИИ ХРАНЕНИЯ УГЛЕРОДА

Киотский протокол направлен прежде всего на учет антропогенных выбросов парниковых газов и частично учитывает только экосистемные **функции поглощения и выделения парниковых газов**, а точнее – их изменение в результате действий человека. Однако **необходимо также учитывать функцию хранения углерода**, что, как будет показано ниже, особенно важно для России.

Масштаб и значение экосистемных функций хранения углерода для биосферной регуляции можно оценить по его запасам (рис.2). Крупнейшими резервуарами долговременного хранения углерода в наземных экосистемах являются почвы, торф и вечная мерзлота<sup>12</sup>. Запасы углерода в почвах мира составляют более 2000 Гт<sup>13</sup> (МГЭИК, 2000; Jobbagy, Jackson, 2000). Запасы в нескольких верхних метрах многолетней мерзлоты северных экосистем составляют 1672 Гт<sup>14</sup> и это явная недооценка, так как запасы в глубоких слоях учтены только частично<sup>15</sup> (рис. 6; Schuur et al., 2008; Tarnocai et al., 2009). Важнейшими хранилищами углерода являются болота и другие экосистемы, накапливающие торф. Торфяные экосистемы, занимая только около 3% поверхности суши, сохраняют 30% глобального запаса углерода в почвах. Болота сохраняют 550 Гт C<sup>16</sup>, что соответствует четверти его глобальных запасов в почвах (Parish et al., 2008).

На суше ключевую роль в хранении углерода играют северные экосистемы. Именно в холодном и влажном климате создаются условия, при которых скорость аккумуляции углерода растениями может превышать скорость его разложения при дыхании сообщества, включая почву. Северные экосистемы сохраняют в почвах и торфе 700 Гт углерода, что составляет около трети его глобальных запасов в этих хранилищах. Подавляющая часть глобального запаса углеро-

---

<sup>11</sup> По одной из оценок, из 63 Мт CH<sub>4</sub> на долю Европы приходится – 10,5 Мт, России - 28,5 МТ, Америки – 24 Мт (Anisimov, Reneva, 2006).

<sup>12</sup> Приведенные ниже значения запасов углерода в разных хранилищах могут перекрывать друг друга, например, часть углерода, находящегося в мерзлоте, может быть учтена в запасах почвы и т.п.

<sup>13</sup> По оценкам МГЭИК (2000), почвы мира содержат 2011 Гт углерода; по другим оценкам только минеральные почвы мира (то есть без торфов и торфяных почв) содержат 2344 Гт в 3-метровом слое (1-й метр – 1502; 2-й – 491; 3-й – 351 Гт) (Jobbagy et al., 2000).

<sup>14</sup> Из которых 1024 Гт находится во всех почвах в зоне мерзлоты в 3-х верхних метрах, включая 227 Гт в болотах на всю толщину торфа без минеральной подосновы. К 1024 Гт следует прибавить 407 Гт в глубоких лессовых осадках ниже 3 м в Сибири (т.н. едома) и 241 Гт в глубоких аллювиальных осадках ниже 3 м в дельтах семи крупнейших арктических рек (Schuur et al., 2008; Tarnocai et al., 2009). В 100-метровом слое мерзлоты может находиться 9600 Гт углерода (Семилетов, 1995).

<sup>15</sup> Кроме того, мерзлота является «крышкой» для восходящих потоков метана из разрушающихся гидратов метана, крупнейшие скопления которых находятся на арктическом шельфе. Мировые запасы углерода в газогидратах измеряются тысячами Гт. Быстрый выход всех этих запасов в атмосферу - малореальное событие (Kvenvolden, 1999). Однако именно арктический шельф является регионом, где вероятность выхода метана растет. Российские исследователи показали, что подводная мерзлота неоднородна и в ней возможно образование сквозных таликов как путей для восходящих потоков метана (Шахова, Семилетов, 2008). В целом возможный выход метана из газогидратов в течение этого века оценивается как сопоставимый по мощности с потоками из наземных экосистем, то есть как существенный, но не катастрофический (Archer, 2007).

<sup>16</sup> По другим оценкам, только в северных болотах накоплено 450-700 Гт углерода (McGuire et al., 2008).

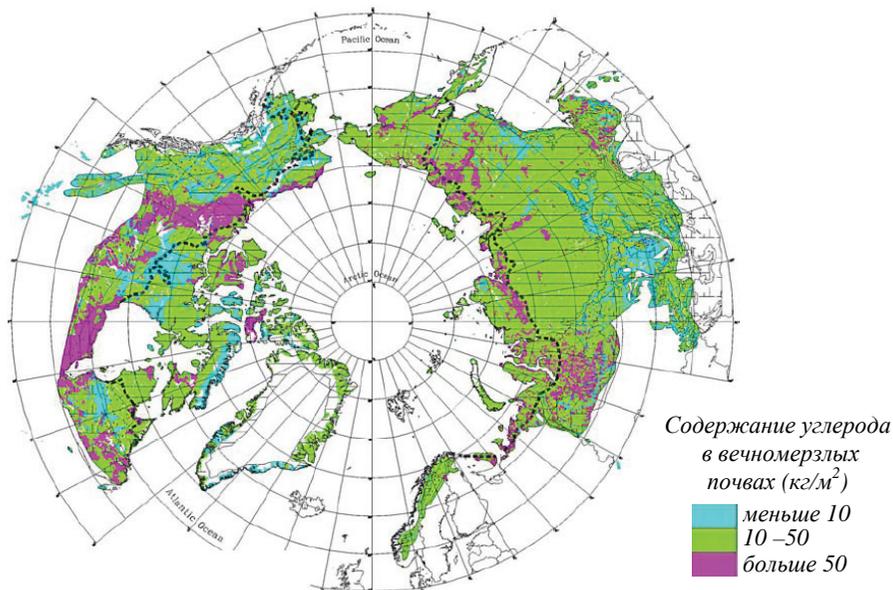


Рис. 6. Содержание углерода в вечномерзлых почвах (Tarnocai et al., 2009).

да в болотах (455 из 550 Гт) находится в бореальной зоне (NEESPI, 2004 b; Parish et al., 2008). В северных экосистемах, по сравнению с тропиками и умеренной зоной, наиболее велики запасы углерода в почвах (табл. 1). Наконец, северные экосистемы содержат крупнейшие запасы углерода в многолетней мерзлоте.

Суммарные запасы углерода в почве, торфе и мерзлоте (2000 – 3000 Гт) в несколько раз превосходят его количество в атмосфере и в наземной живой биомассе (750 и 500 Гт, соответственно, по данным МГЭИК, 2001, 2000). Наземные экосистемы накапливали эти запасы в течение многих тысячелетий.

Табл. 1. Запасы углерода в лесах разных климатических поясов (NEESPI, 2004 а, с изменениями).

Тип леса	Площадь, млн. га	Запас С в почве, Гт	Запас С в растительности, Гт	Общий запас С, Гт	Общий запас С, Гт (МГЭИК, 2000)
Бореальные	1509	624	51	675	559
Умеренные	1040	100	21	121	159
Тропические	1756	216	159	375	428

Мировое сообщество чрезвычайно озабочено тем, что деятельность человека приводит к освобождению углерода из ископаемого топлива. По длительности хранения углерода почвы, торф и мерзлота занимают промежуточное положение между живой биомассой, где время его пребывания определяется временем жизни организмов, и ископаемым топливом, в котором углерод пребывает от сотен тысяч лет до сотен миллионов лет. Древнейшие слои торфа имеют тот же воз-

раст, что и некоторые месторождения бурого угля. При этом оценки запасов углерода в месторождениях угля, нефти и газа сопоставимы с его запасами в почве, торфе и мерзлоте<sup>17</sup>. В результате изменений климата и антропогенных нарушений экосистем, углерод, законсервированный в них, может быть достаточно быстро включен в биогеохимический цикл. Только в отличие от сжигания топлива, из этого процесса человек не сможет извлечь никакой пользы.

Важность учета функции хранения углерода при оценке интегральной климатической функции экосистем можно проиллюстрировать на примере болот. Как сказано выше, они, с одной стороны, поглощают  $\text{CO}_2$  и являются крупнейшими хранилищами углерода, а с другой – выделяют большое количество метана. Поскольку метан сильнее воздействует на парниковый эффект, оценка интегрального влияния болот на климат с использованием стандартной ПГП-методики показывает, что они оказывают «нагревающее» действие на климат. Однако при этом оценивается лишь однократное выделение газов, а болота влияли на их содержание в атмосфере в течение тысяч лет<sup>18</sup>. Например, после 4 тысяч лет существования болота только 0,3% выделенного им метана остается в атмосфере, в то время как 20% поглощенного  $\text{CO}_2$  продолжает храниться в торфе. Поэтому, когда болото достигает определенного возраста, его функция переключается с «нагревания» на «охлаждение». С учетом постоянного функционирования болот изменение их функции в ходе истории выглядит следующим образом: вначале они являются «нагревателями» с пиком этой функции в возрасте около 50 лет; затем в течение следующих нескольких сотен лет происходит ослабление «нагревающего» эффекта, переключение на «охлаждающий» эффект и его нарастание в течение дальнейшего времени существования болота (Frolking et al., 2006)..

Время «переключения» определяется соотношения объемов выпущенного  $\text{CH}_4$  и поглощенного  $\text{CO}_2$ . Чем больше болото выпускает метана, тем позже это происходит (рис.7). На временном горизонте в 20 лет все болота являются «нагревателями». В 100 лет болота тропического и умеренного пояса становятся «охлаждителями», но бореальные болота еще остаются «нагревателями». Старше 500-1000 лет все болота являются «охлаждителями» (Frolking et al., 2006; Whiting, Chanton, 2001). Сходные оценки получены для природных болот Финляндии – при 100-летнем временном горизонте они увеличивают парниковый эффект, на 500-летнем – в среднем понижают<sup>19</sup> (Wise use..., 2002).

Возраст большинства северных болот измеряется тысячами лет. Поэтому северные болота являются охладителями<sup>20</sup> (Frolking, Roulet, 2007).

---

<sup>17</sup> Мировые запасы угля, нефти и газа содержат в сумме около 4000 Гт углерода (Falkowski et al., 2000), но детально разведанные экономически рентабельные на сегодняшний день месторождения – менее 1000 Гт (Meinshausen et al., 2000).

<sup>18</sup> Существует гипотеза, что снижение концентрации  $\text{CO}_2$  в межледниковые периоды из-за его поглощения болотами было одной из причин наступления очередной фазы оледенения в общей картине циклических оледенений (Parish et al., 2008; Wise use..., 2002)

<sup>19</sup> При этом, как отмечают авторы, верховые ombrotрофные болота становятся «охлаждителями», а низинные минеротрофные продолжают работать как «нагреватели», но их воздействие меньше.

<sup>20</sup> Это подтверждается результатами моделирования: при высыхании Западно-Сибирских болот в течение следующих 500 лет будет происходить ежегодная эмиссия  $\text{CO}_2$  в объеме 140 Мт С и ослаб-

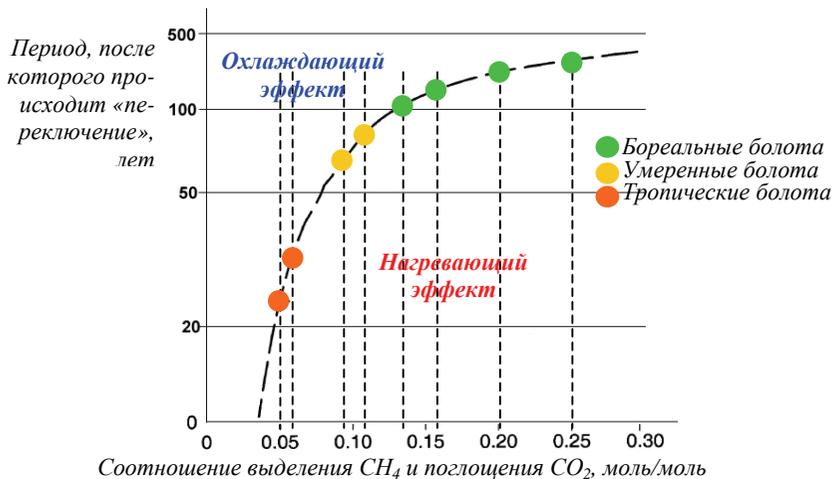


Рис. 7. Время переключения функции болот с источника на сток при разных соотношениях  $CH_4/CO_2$  (no Whiting, Chanton, 2001 с дополнением из Corradi et al., 2005).

Климаторегулирующая функция болот определяется соотношением углерода, накопленного за все это время, и метана, выделенного за последние десятилетия. (Frolking et al., 2006; Parish et al., 2008). Очевидно, что это справедливо по отношению ко всем экосистемами, имеющим существенные долговременные хранилища углерода в почвах, мерзлоте или углерод-содержащих осадках.

Таким образом, оценка климаторегулирующей функции экосистем, имеющих существенные долговременные запасы углерода, должна включать их функцию по хранению углерода, а не только функции по регуляции современных потоков парниковых газов.

### 1.3. Биогеофизические климаторегулирующие функции экосистем

Если «углеродная» функция экосистем влияет на концентрацию парниковых газов в атмосфере и глобальные характеристики климата, то действие биогеофизических функций ощущается прежде всего на региональном уровне. Влияние экосистем на региональные и локальные показатели температуры, количества осадков и речного стока часто имеет более важные социальные последствия, чем повышение средней глобальной температуры. При больших масштабах изменений экосистем биогеофизические эффекты переходят на глобальный уровень.

Свойства пограничного слоя атмосферы<sup>21</sup>, прилегающего к поверхности Зем-

ление выделения  $CH_4$ , при этом полное прекращение эмиссии метана снизит нагревающий эффект от эмиссии  $CO_2$  лишь на 20% (Smith et al., 2004).

<sup>21</sup> Пограничный слой атмосферы (планетарный пограничный слой) имеет высоту над поверхностью от 300 м до 2 км - тем больше, чем больше шероховатость подстилающей поверхности и чем интенсивнее развита турбулентность.

ли, определяются характеристиками подстилающей поверхности – ее отражательной способностью (альbedo), испарением воды, степенью шероховатости, влиянием на содержание в воздухе различных аэрозолей (пыль, сажа, соль и др.).

Снег, голая сухая почва и грунт отражают существенную часть солнечного излучения (имеют высокое альbedo). Растительность «стремится» улавливать как можно больше солнечной энергии, которая идет на образование новой биомассы. Наиболее эффективно поглощают солнечную энергию леса за счет многократного отражения света внутри полога. Еще больше энергии могут поглощать влажная почва и пашня (они темнее растительности), но эта энергия идет только на нагревание<sup>22</sup>.

Моделирование показывает, что изменение альbedo при масштабных преобразованиях поверхности Земли может оказывать существенное влияние на климат. Например, один из гипотетических сценариев выглядит следующим образом: полное исчезновение лесов → увеличение глобального альbedo на 2,6% → снижение средней глобальной температуры с 15,2°C до 14,1°C → увеличение площади морского льда → увеличение альbedo еще на 1,6% → дальнейшее охлаждение и рост площади морского льда → ослабление термогалинной циркуляции → постоянный ледовый покров в северных морях → похолодание до 12,3°C → распространение постоянных ледников на континентах → наступление нового ледникового периода (рис. 8, Renssen et al., 2003).

Хорошо развитая растительность, прежде всего леса, благодаря огромной листовой поверхности при достаточном количестве влаги испаряет ее больше, чем открытая водная поверхность. Испарение воды днем охлаждает поверхность

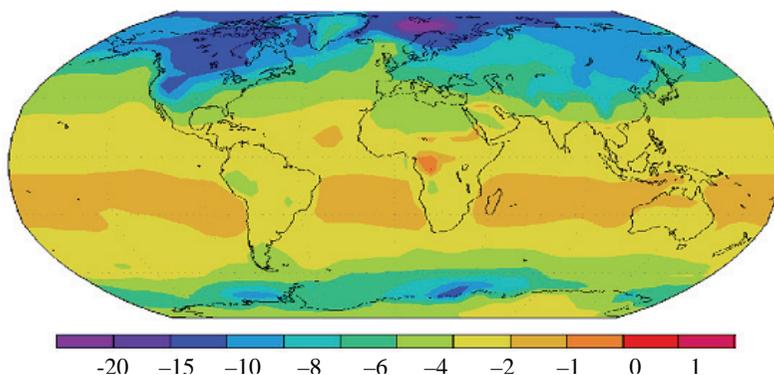


Рис.8. Изменение среднегодовой температуры через 800 лет после полного исчезновения лесов (Renssen et al., 2003).

<sup>22</sup> Типичные значения альbedo: влажная почва 5—10%, чернозем 15%, сухая глинистая почва 30%, светлый песок 35—40%, полевые культуры 10—25%, травяной покров 20—25%, лес — 5—20%, свежевыпавший снег 70—90%; водная поверхность для прямой радиации от 70—80%, при Солнце у горизонта - от 5%, при высоком солнце для рассеянной радиации около 10%; верхняя поверхность облаков 50—65% (<http://meteorologist.ru/>)

и прилегающий слой воздуха. Например, по данным измерений во Вьетнаме, в июле дневная температура на высоте 120 см над почвой и на поверхности почвы под пологом леса на несколько градусов ниже, чем на участках, занятых травянистой растительностью, при этом влажность воздуха составляет 85-100% и 55-95% соответственно (рис.9, Кузнецов и др., 2010).

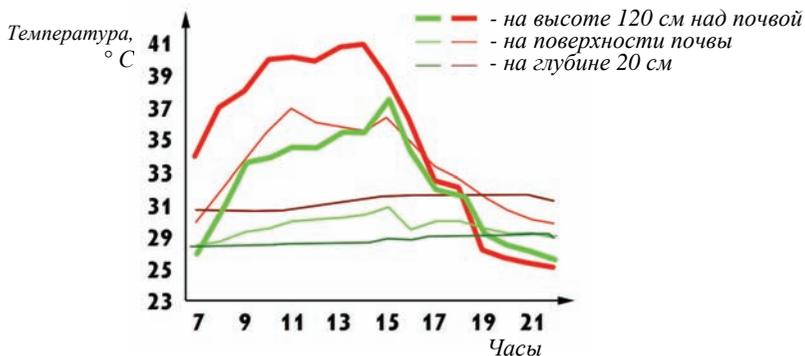


Рис.9. Изменение температур в течение дня в июле под пологом леса (зеленые линии) и на территориях, занятых травами (красные линии), Вьетнам (Кузнецов и др., 2010).

Ночью, напротив, пары воды над растительностью не дают сильно остывать поверхности, что предохраняет ее от заморозков. При массовом осушении болот и сведении лесов эта функция регуляции локального климата утрачивается. Например, после осушения болот в южной Флориде сельское хозяйство стало нести убытки от заморозков (Ecosystems..., 2005).

При замене лесов агроэкосистемами и травянистыми сообществами на климат действуют два противоположных эффекта – увеличение альбедо, оказывающее охлаждающее воздействие, и уменьшение эвапотранспирации, ведущее к усилению нагревания поверхности. Недостаточная изученность этих процессов пока не позволяет дать однозначный прогноз – какой из этих факторов будет доминировать и каково будет интегральное воздействие на климат (см. ниже).

Природная растительность формирует водный цикл на суше, испаряя существенную часть воды, которая поступила с осадками (одновременно уменьшается поверхностный сток воды). Значительная часть испаренной влаги снова выпадает в виде осадков. Благодаря этому в регионах с богатой растительностью осадков выпадает больше, чем их приносят воздушные течения. Так, в бассейне Амазонки коэффициент циркуляции осадков составляет от 30% до 50% (Eltahir, Bras, 1994; Szeto et al., 2008). В бассейнах рек умеренного и бореального пояса – Миссисипи, Маккензи и Лены – этот показатель составляет от 23 до 25%, но, поскольку на севере зимой испарения почти нет, это значит, что летом почти 50% осадков формируется за счет циркуляции влаги (Szeto et al., 2008).

Моделирование циркуляции атмосферы с учетом испарения воды растительностью показывает, что экосистемы могут существенно увеличивать количество осадков во внутриматериковых областях, в том числе на территории России (Betts, 1999, рис. 10).

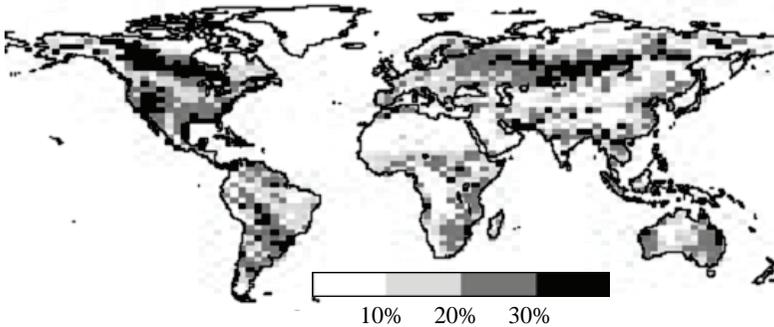


Рис. 10. Результат моделирования роли растительности в формировании цикла воды над сушей. Показано насколько растительность увеличивает долю воды (из количества, поступившего с осадками в данный регион), которая испаряется и формирует локальные осадки (разница между показателями отношения эвапотранспирации к количеству осадков при существующей растительности и без нее) (Betts, 1999).

Один из наиболее ярких примеров влияния растительности на региональный климат можно наблюдать на юго-западе Австралии, где за последние 100 лет 13 млн. га природных сообществ были переведены в сельскохозяйственные поля и огорожены забором для защиты от вредителей («кроличья изгородь»). Образовались четко отграниченные обширные территории с разной растительностью, которые хорошо видны из космоса (рис. 11 а). Природная растительность поглощает больше солнечного света (выглядит темнее), над ней формируются восходящие потоки влажного воздуха, который, поднимаясь выше, образует облака (рис. 11 в) Над полями, наоборот, с высоты опускается сухой воздух, а нижний слой воздуха вместе с испаренной влагой, «затягивается» на территорию с естественной растительностью. В результате формирования такой локальной атмосферной циркуляции над природной растительностью осадки увеличивается на 10%, а над полями уменьшаются на 30% (Charin et al 2008; Lyons, 2002). Различия в плотности облаков над природной и сельскохозяйственной зоной хорошо заметны из космоса (рис. 11 б, Nair, 2009).

Испарение лесами огромного количества влаги формирует режим циркуляции воздушных масс, увеличивающий поступление влажного воздуха от океана вглубь континента - «биотический насос атмосферной влаги» (Горшков, Марьяева, 2006). Влага в воздухе не поднимается на большую высоту, так как из-за охлаждения она конденсируется, формирует облака и выпадает в виде осадков. Влажный воздух переносится только в приземном слое атмосферы из обла-

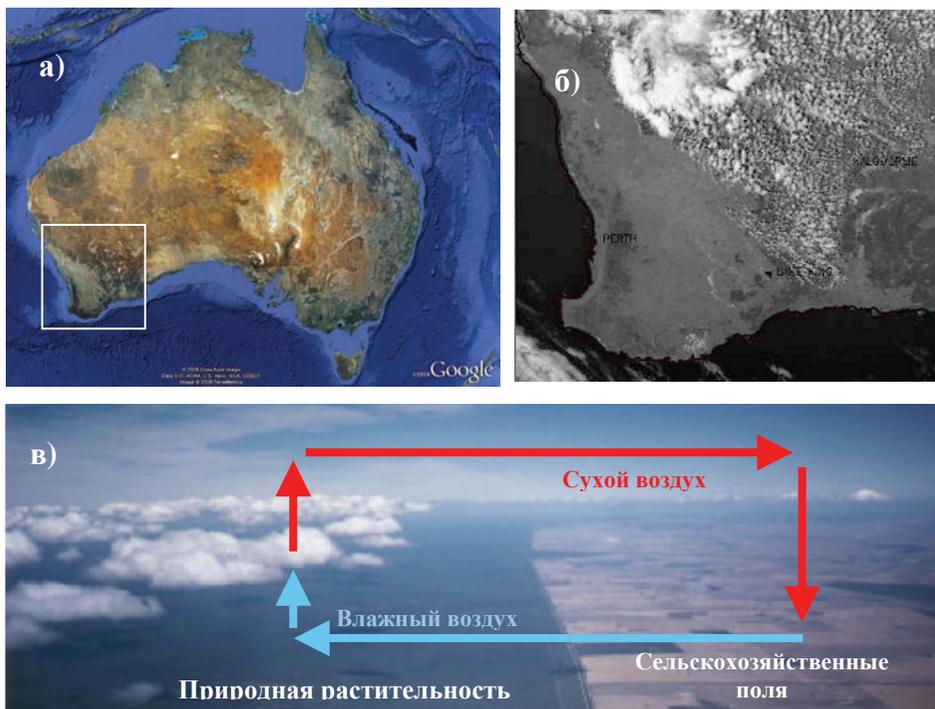


Рис.11. Пример влияния растительности на формирование облаков: а) сельскохозяйственный регион на юго-западе Австралии (поля имеют светло-серый цвет), б) формирование облаков над природной зоной (космический снимок, Nair, 2009). в) локальная атмосферная циркуляция (фотоснимок из Lyons, 2002).

тей с меньшим испарением в области с большим испарением. Поэтому при наличии леса влажный воздух идет со стороны океана на континент и увеличивает количество осадков, а при уничтожении растительности направление движения воздуха в приземном слое меняется на противоположное, вызывая иссушение климата и сокращение стока рек (рис.12).

На примере южной части Флориды показано, что масштабное замещение болот и заболоченных лесов сельскохозяйственными угодьями и урбанизированными территориями в XX в. привело к существенному снижению эвапотранспирации и изменению потоков атмосферной циркуляции. В результате сократилось поступление влажного воздуха от океана. По сравнению с 1900 г., когда экосистемы находились почти в неизменном состоянии, к 1973 г. количество летних осадков снизилось на 9%, а к 1993 г – на 11%, одновременно произошло повышение летней температуры (Pielke et al., 1999).

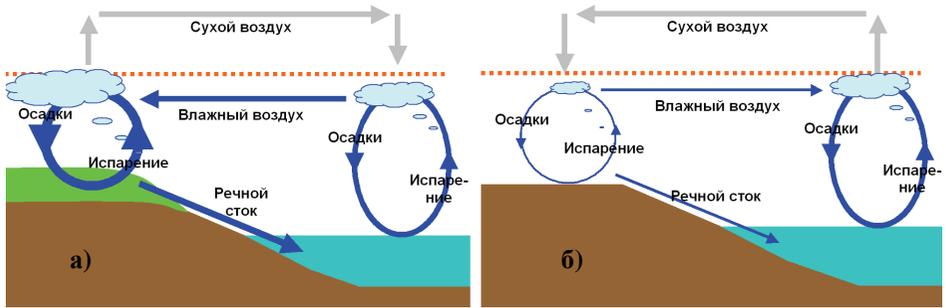


Рис. 12. Схема «биотического насоса атмосферной влаги»: а) циркуляция воздуха при наличии мощной растительности на суше; б) циркуляция воздуха без растительности. Красный пунктир – граница, выше которой влага не поднимается.

Особенно важную роль леса играют в формировании гидрологического режима удаленных от океана внутриконтинентальных равнин, что отмечалось еще в начале прошлого века (Берг, 1922). Современные результаты моделирования подтверждают это (см. рис. 10).

Как было сказано выше, биогеофизические функции важны прежде всего для регионального климата, но при масштабных нарушениях экосистем они распространяются на глобальный уровень. Так, модели сведения тропических лесов показывают, что изменения потоков тепла и влаги над обширными обезлесенными территориями трансформируют глобальную атмосферную циркуляцию и

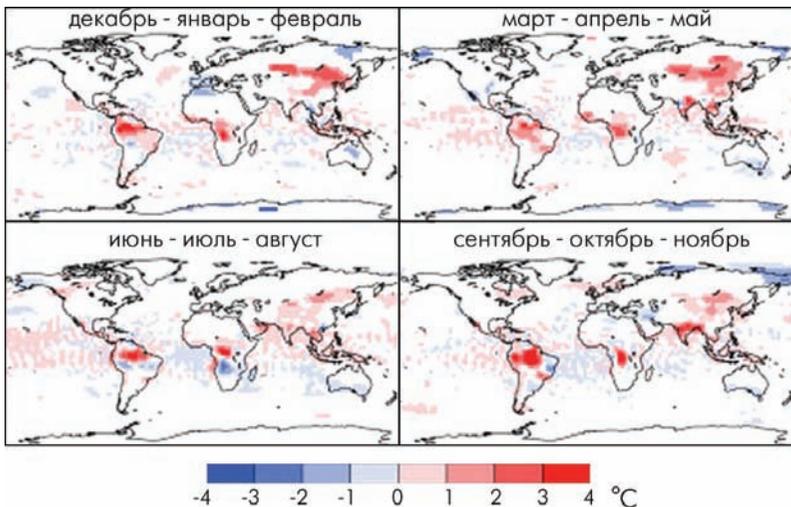


Рис. 13. Моделируемые изменения температуры поверхности в разные сезоны из-за биогеофизических эффектов от уничтожения тропических лесов (с сайта Snyder Climate Research Group <http://www.tc.umn.edu/~pksnyder/tropics.html>).

вливают на климат в умеренных и северных широтах (рис. 13; Avissar, Werth, 2005; Betts et al., 2008; Hasler et al., 2009).

Таким образом, биогеофизические климаторегулирующие функции экосистем оказывают существенное влияние как на региональный, так и на глобальный климат, однако уровень научного понимания этих процессов, как отмечает МГЭИК (Solomon et al., 2007), очень низок.

#### 1.4. Экосистемные функции по смягчению последствий экстремальных природных явлений

Эти функции приобретают особенно важное значение в современных условиях, когда одним из основных признаков глобальной дестабилизации биосферы является нарастание числа экстремальных природных явлений и ущерба от них (рис.14). Среднее ежегодное число зарегистрированных стихийных бедствий, в результате которых населению пострадавших регионов потребовалась внешняя помощь, за последние 20 лет удвоилось - с 200 до 400 (UN OCHA, 2009).

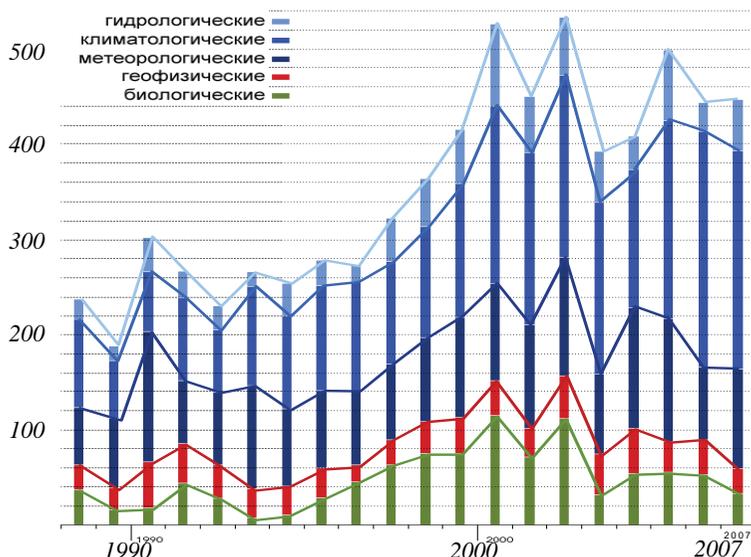


Рис. 14. Число стихийных бедствий в мире (UN OCHA, 2009).

Значение для человека функций природных экосистем по смягчению последствий природных ЧС иллюстрируют цифры ущерба, вызванного их деградацией.

Ключевая роль природной растительности, и в первую очередь лесов, в снижении длительности и высоты паводков является общепризнанной (Calder et al., 2007). В 1998-2005 гг. ливневые дожди вызвали затопление многих районов Европы, в 2005 году только в Альпах ущерб достиг 2 млрд. \$ США. Увеличение ущерба от наводнений в Европе за последнее десятилетие во многом является

следствием уничтожения природных экосистем в результате канализации рек, осушения болот, сведения лесов, покрытия больших площадей асфальтом и другими твердыми материалами. (Ежегодник ГЭП, 2006). В США в бассейне р. Миссисипи прибрежные болота и заболоченные леса обладали способностью аккумулировать 60-дневный речной сток. Сейчас, после дренирования и осушения, они способны аккумулировать объем менее 12-дневного речного стока, т. е. произошло сокращение функции по регулированию стока на 80% (Millennium..., 2005). После большого наводнения в 1993 г. в США было показано, что вложение 2-3 млрд. долларов в восстановление 5,3 млн. га водно-болотных угодий и заболоченных лесов в верховьях рек Миссисипи и Миссури может предотвратить ущерб в 16 млрд. долларов в случае наводнения (рис. 15, Postel, 2008).



Рис. 15. Река Миссури: а) наводнение в июле 1993 г. (Missouri Water Science Center, <http://mo.water.usgs.gov/projects/1993-Flood/>); б) Схема проектируемых охраняемых водно-болотных угодий на р. Миссури (The Lower Missouri River Wetland Reserve Enhancement Program (WREP))<sup>23</sup>.

Водно-болотные угодья, мангровые заросли и другая естественная растительность на морских побережьях является важным фактором, смягчающим воздействие ураганов, штормов и цунами. Ущерб, нанесенный Нью-Орлеану ураганом Катрина в 2005 г. мог быть существенно ниже, если бы были сохранены естественные водно-болотные угодья на побережье Мексиканского залива. В

<sup>23</sup> Основные цели программы по сохранению водно-болотных угодий р. Миссури: предотвращение наводнений, улучшение качества воды, повышение рекреационной ценности территорий, сохранение местообитаний для птиц и других животных, предотвращение вспышек численности moskitov, связанных с наводнениями, и тем самым предотвращение распространения болезней, переносчиками которых они являются. Сайт Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture [http://www.ne.nrcs.usda.gov/wrep\\_index.html](http://www.ne.nrcs.usda.gov/wrep_index.html).

1990-е годы США начинали осуществление стратегии по предупреждению наводнений, которая включала восстановление водно-болотных угодий, однако в начале 2000-х годов федеральные инвестиции в меры по борьбе с наводнениями и восстановлению болот были сокращены. В период 1990–2000 годов темпы исчезновения болот в Луизиане составляли примерно 6 тыс. га в год, в результате чего густонаселенные районы оказались беззащитными перед сильным ветром, высокими волнами и поднятием уровня воды (Ежегодник ГЭП, 2006).

По последним оценкам (Costanza et al., 2008), утрата 1 га прибрежных водно-болотных угодий ведет к увеличению ущерба от штормов и ураганов в среднем на 33 тыс. долларов, суммарная стоимость экосистемных услуг водно-болотных угодий США по защите от ураганов составляет 23 млрд. долларов в год (рис.16).

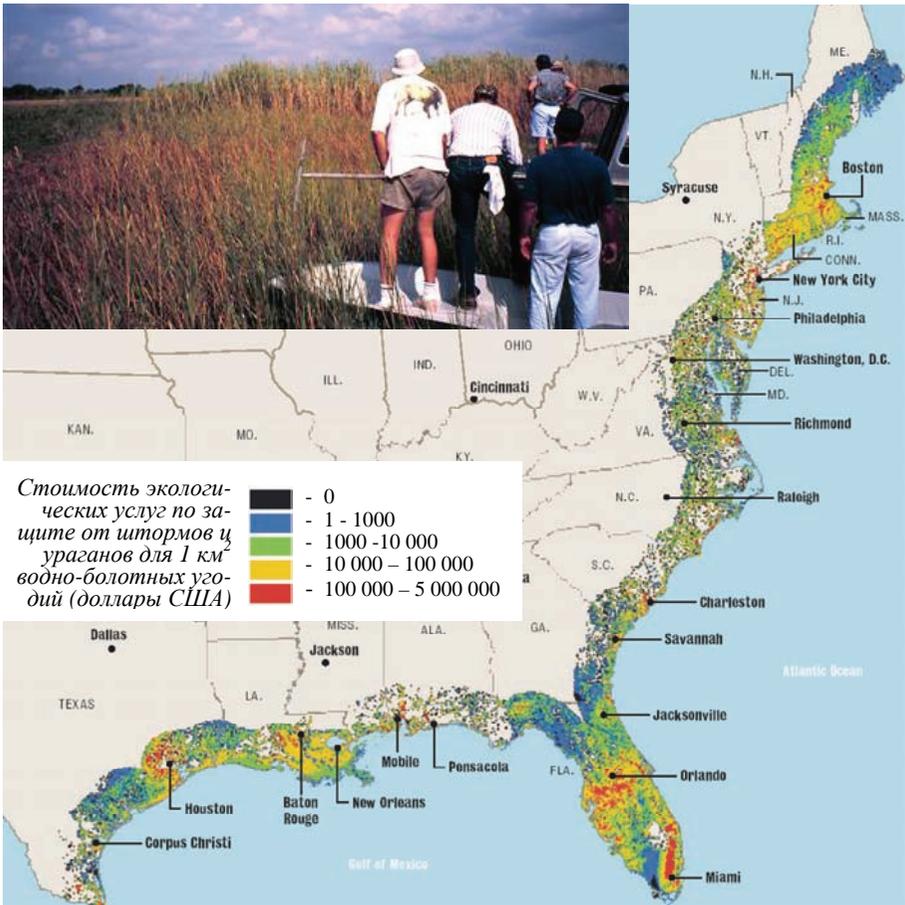


Рис. 16. Стоимость экологических услуг по защите от штормов и ураганов для 1 км<sup>2</sup> водно-болотных угодий побережья США (Costanza et al., 2008). Наверху – планирование проекта по сохранению водно-болотных угодий.



*Рис. 17. Посадки мангровых деревьев в целях снижения ущерба от стихийных бедствий (Global Environment Outlook 4, 2007).*

Разрушение прибрежных экосистем существенно увеличило ущерб от цунами в Индийском океане в 2004 г. (Global Environment Outlook 4, 2007). В последние годы в ряде тропических стран введены в действие программы по восстановлению мангровых зарослей в целях защиты побережья от ураганов (рис.17).

## **1.5. Образование нескольких устойчивых состояний**

Чрезвычайную важность для разработки стратегии природопользования имеет возможность существования нескольких устойчивых состояний системы «биота-климат», которая может быть обусловлена положительными обратными связями между функциями экосистем и климатическими параметрами. В этих случаях постепенные сдвиги внешних факторов вызывают небольшие изменения в системе, пока она не дойдет до некоторого порога, после чего происходит ее быстрый переход в другое состояние. Такие быстрые трансформации могут быть сопряжены с большим экономическим ущербом и опасностью для людей.

Возможность возникновения нескольких устойчивых состояний можно проиллюстрировать на примере обратной связи между растительностью и количеством осадков. Формирование двух устойчивых состояний возможно при следующих условиях (рис. 18, Scheffer, Carpenter, 2003):

- количество локальных осадков зависит от некоторого глобального климатического фактора (например, температуры поверхности океана), определяющего их количество в отсутствие растительности;
- растительность увеличивает количество локальных осадков (см. выше);
- растительность не может существовать, если количество осадков становится меньше определенного уровня.

Если глобальный климатический параметр определяет очень сухие условия, в которых не может существовать растительность (красная зона на рис.18), для каждого его значения имеется только одно устойчивое состояние (красная линия в красной зоне). В очень влажных условиях (зеленая зона) также имеется только одно устойчивое состояние – с растительностью (зеленая линия в зеленой зоне). Однако при средних значениях глобального параметра (белая зона) имеются два

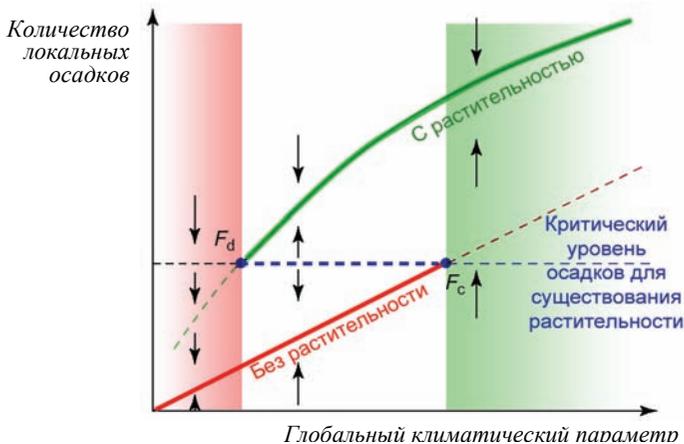


Рис. 18. Образование двух устойчивых состояний при наличии взаимозависимости между растительностью и количеством локальных осадков (по Scheffer, Carpenter, 2003).

устойчивых состояния (красная и зеленая линии в белой зоне). Между ними могут происходить быстрые переходы. Например, при постоянном значении глобального параметра сильная антропогенная деградация растительности может перевести систему из состояния с относительно высоким уровнем локальных осадков в состояние с более сухим локальным климатом.

Примеры быстрых переходов между разными состояниями экосистем имеются для наземных, пресноводных и морских экосистем (Lenton et al., 2008; Scheffer et al., 2001; Scheffer, Carpenter, 2003;).

Например, для бассейна Амазонки показано, что по мере роста обезлесенной площади происходит сокращение осадков и потепление регионального климата, при чем наиболее сильное снижение осадков приходится на засушливые периоды, связанные с климатическими колебаниями Эль-Ниньо (Da Silva, Avissar, 2006; Da Silva et al., 2008; Foley et al., 2007). Положительная обратная связь между площадью леса и количеством осадков ведет к образованию в этом регионе кроме современного состояния еще одного потенциально устойчивого состояния, при котором значительная восточная часть бассейна Амазонки будет замещена саваннами и даже полупустынной растительностью (Ecosystems..., 2005; Oyama, Nobre, 2003). Система положительных обратных связей между природными и антропогенными процессами, конечно, гораздо более сложна, некоторые из них показаны на рис. 19. В результате кумулятивного действия климатических изменений и антропогенного сведения лесов этот крупнейший лесной регион в ближайшее время может перейти через «критическую точку», после чего начнется необратимый процесс замены лесов нелесными сообществами (см. п. 2.4; Nepstad, 2007; Nepstad et al., 2008).

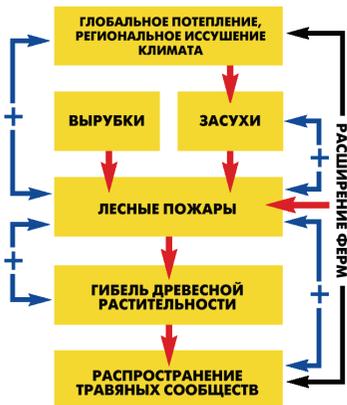


Рис. 19. Схема взаимосвязей, которые могут привести к необратимой замене Амазонских лесов травяными и кустарниковыми сообществами (Nepstad, 2007, с изменениями).

В зоне Сахель<sup>24</sup> состояние растительности контролируется осадками, количество которых, в свою очередь, зависит от растительности, так как ее деградация ведет к их сокращению. Эта взаимосвязь формирует два потенциально устойчивых состояния – саванны и пустыни. Последние 40 лет здесь наблюдались сильные засухи, которые сложно объяснить только внешними климатическими факторами, но которые могут быть результатом работы этой положительной обратной связи. Запустить этот механизм могла деградация растительности из-за чрезмерной антропогенной нагрузки или первая засуха, вызванная аномалией атмосферной циркуляции (Charin et al., 2008; Foley et al., 2003). Интересно, что в последние годы наметилась обратная тенденция – увеличение показателей продуктивности растительности (NDVI), которую тоже трудно объяснить только климатическими факторами. Ее дополнительной причиной может быть снижение сельскохозяйственного пресса в зоне Сахель в силу ряда социально-экономических и политических процессов последних лет (Olsson et al., 2005).

Для объяснения изменений климата в этом регионе была предложена гипотеза о существовании нескольких устойчивых климатических режимов (Wang, Eltahir, 2000), в соответствии с которой существенные изменения растительности могут переводить региональную систему «биота – климат» в новое состояние. Модельный эксперимент для одного из регионов Западной Африки показывает, что при увеличении или уменьшении плотности растительности на 50% система возвращается в состояние начального равновесия (зеленые линии на рис.20), при сокращении плотности на 60% или 70% система переходит в другое состояние с пониженным уровнем осадков (150 мм, голубые линии), при более сильном сокращении растительности система переходит в состояние с еще более сухим климатом (100 мм, красная линия).

<sup>24</sup> Полоса шириной в несколько сотен км к югу от Сахары, протянувшаяся через всю Африку от Атлантического океана до Красного моря.

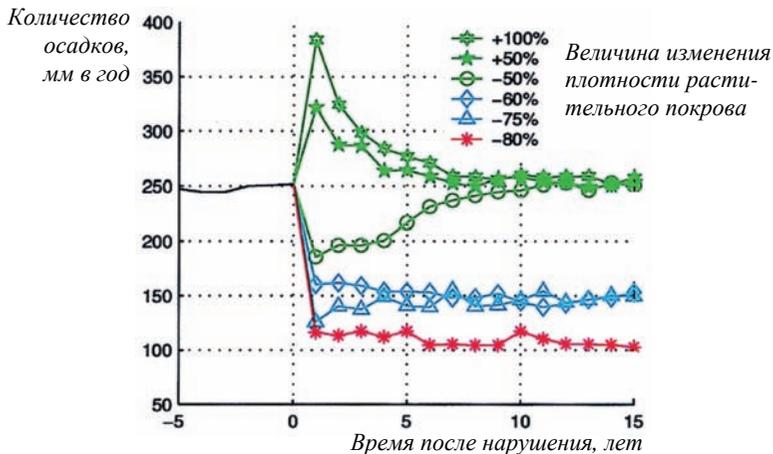


Рис. 20. Моделирование ответа системы «биота – климат» в зоне Сахель на изменения растительности. Состояние начального равновесия – травянистые сообщества при годовом количестве осадков 250 мм (Wang, Eltahir, 2000).

В течение Голоцена климат Северной Африки претерпевал сильные колебания. Окончание ледникового периода сопровождалось увлажнением климата. 8-9 тыс. лет назад Сахара представляла собой саванну с богатым растительным и животным миром (рис. 21, 22). Но около 5,5 тыс. лет назад, как показывает анализ океанических осадков, произошло резкое увеличение интенсивности ветровой эрозии в этом регионе (рис. 23), что может говорить о быстром переходе от саванны к пустыне<sup>25</sup>, который трудно объяснить изменениями орбитальных характеристик Земли и инсоляции, но можно объяснить сильными нелинейными связями между растительностью и климатом. Моделирование подтверждает возможность существования в зоне Сахель нескольких устойчивых состояний, различающихся мощностью растительности и количеством региональных осадков (Brovkin, Claussen, 2008; Foley et al., 2003; Irizarry-Ortiz et al., 2003).

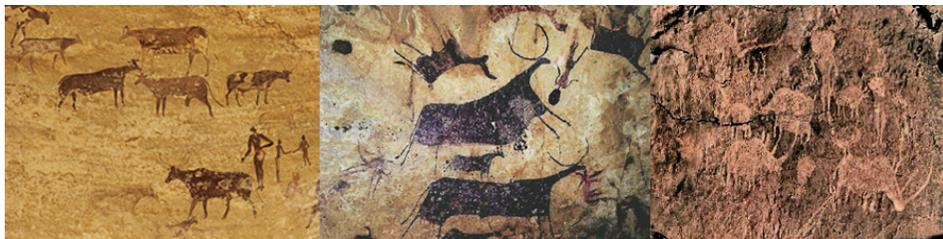


Рис. 21. Наскальные изображения животных из разных регионов Сахары (Алжир, Чад, Судан).

<sup>25</sup> Однако получены и другие данные, свидетельствующие, что этот переход был более плавным и занял не сотни, а тысячи лет (Kropelin et al., 2008).

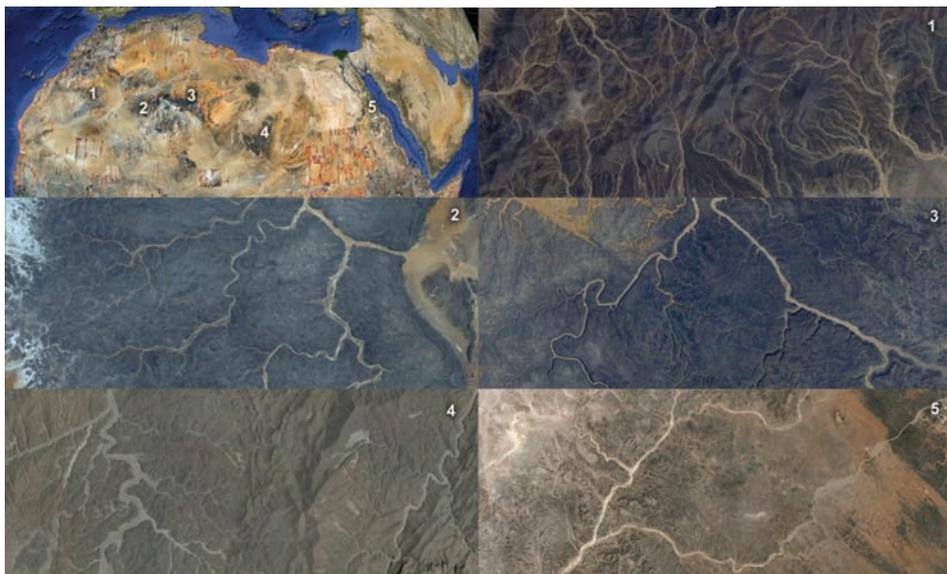


Рис. 22. В программе Google Earth на территории Сахары практически везде, где поверхность свободна от песка, видны высохшие русла рек.

На севере важнейшее значение имеет влияние растительности на альбедо. Леса и кустарники, возвышающиеся над снежным покровом, поглощают намного больше солнечной энергии, чем снег. По сравнению с тундрой, лес весной поглощает в 4,7 раза больше солнечной энергии (Charin et al., 2005), что увеличивает среднесезонную температуру на 10°C, а среднегодовую - на 5°C (Field et al., 2007). Поэтому увеличение площади лесов ведет к потеплению весной. Однако летом происходит охлаждение, так как деревья испаряют больше воды. Нагревающий эффект в снежный период, вероятно, более силен, чем летнее охлаждение (Ecosystems..., 2005).

Летнее потепление, происходящее на Аляске в течение последних десятилетий, которое трудно объяснить изменениями атмосферной циркуляции и

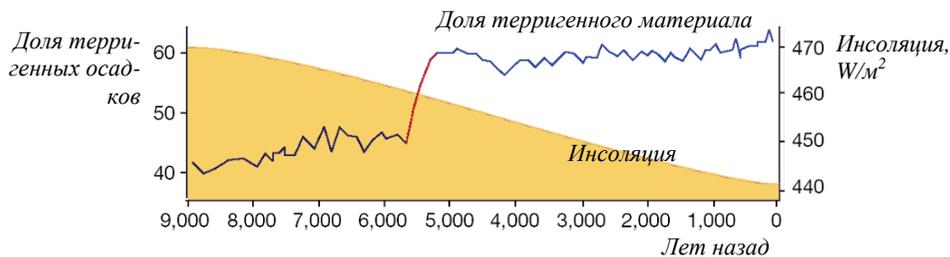


Рис.23. Динамика летней инсоляции в результате изменений орбиты Земли и резкий рост доли терригенных (поступивших в результате эрозии поверхности суши) материалов в морских осадках около 5,5 тыс. лет назад (Scheffer et al., 2001).

и морского льда, может быть результатом включения положительной обратной связи между развитием кустарников и повышением температуры. С 1950 г. относительная площадь кустарников на Северном Склоне Аляски увеличилась с 14% до 20%. Более сильный прогрев кустарников весной приводил к более раннему таянию снега (в среднем на 2,5 дня в десятилетие), что увеличивало поглощение энергии, рост температур и дальнейшее распространение кустарников.

Климатический эффект альбедо при изменении площади бореальных лесов и кустарников усиливается связью с площадью морского льда и длительностью безледного периода. Поэтому колебания границы лес-тундра оказывают сильное влияние на климат Земли в целом. Модели показывают, что сокращение лесного покрова могло быть «спусковым крючком» для начала последнего оледенения, а рост лесов был фактором потепления в среднем голоцене (Ecosystems..., 2005).

Т. Lenton с соавторами (2008) выделяют в климатической системе Земли несколько крупномасштабных подсистем, которые могут быстро переходить между разными устойчивыми состояниями. Многие из них в качестве ключевых компонентов включают наземные экосистемы (рис. 24). Авторы подчеркивают, что вероятность быстрого перехода этих подсистем в новые состояния зависит от воздействия человека на них.

Таким образом, климаторегулирующие функции экосистем являются одним из ключевых факторов формирования климата Земли. Будущий климатический сценарий и возможности адаптации человечества к нему во многом будут определяться изменением функций экосистем по регуляции глобального и регионального климата по смягчению разрушительной силы природных чрезвычайных ситуаций и снижению ущерба от них.

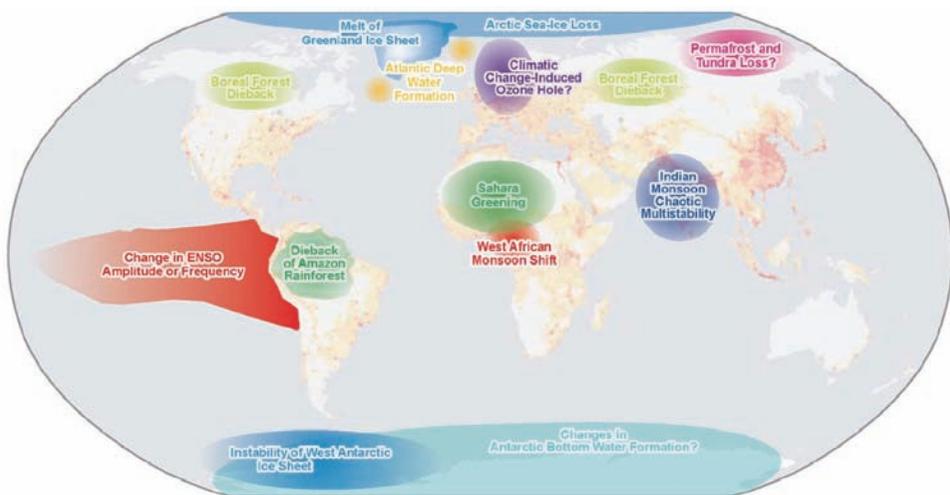


Рис. 24. Примеры климатических подсистем с несколькими устойчивыми состояниями (Lenton et al., 2008).

## 2. АНТРОПОГЕННЫЕ НАРУШЕНИЯ СИСТЕМЫ БИОСФЕРНОЙ РЕГУЛЯЦИИ КЛИМАТА

### 2.1. Антропогенная эмиссия парниковых газов

Основной естественный парниковый газ – водяной пар, но, как считает МГЭИК, прямое антропогенное воздействие на его концентрацию в атмосфере незначительно – прямые выбросы воды в атмосферу в результате деятельности человека, преимущественно ирригации, составляют менее 1% от естественных источников водяного пара. Основные изменения концентрации водяного пара в атмосфере являются реакцией на изменения климата, и поэтому рассматриваются в категории обратных связей внутри климатической системы, а не как результат антропогенного воздействия (Solomon et al., 2007). Однако, если учитывать масштабные антропогенные трансформации экосистем и их функций по регуляции гидрологического цикла, антропогенный вклад в изменение концентрации водяного пара, особенно над сушей, может быть значительным. Некоторые примеры будут рассмотрены в п. 2.4.

Основными парниковыми газами, концентрация которых зависит от действия человека, считаются  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ .

По данным МГЭИК (2007; 2000) с 1850 г. по 1998 г. в результате действий человека в атмосферу было выброшено около 406 Гт углерода в виде  $\text{CO}_2$ . 2/3 этого количества (270 млрд. т) образовалось в результате сжигания ископаемого топлива и производства цемента и 1/3 (136 Гт) в результате землепользования, главным образом при нарушениях лесных экосистем. По другим оценкам эмиссия углерода в результате антропогенной трансформации экосистем в течение последних 200 лет могла быть существенно выше – до 200–220 Гт (Ecosystems..., 2005; House et al., 2002), то есть более 40% суммарной эмиссии углерода. За всю историю человечества в результате уничтожения природных экосистем и нерационального землепользования в атмосферу было выброшено больше углерода, чем всей промышленностью (Данилов-Данильян и др., 2005; Залиханов и др., 2006). Так, по оценкам W. Ruddiman (2003) в результате землепользования за 7800 лет с момента начала развития сельского хозяйства и до начала индустриальной эпохи (19–20 вв) в атмосферу было выброшено 320 ГтС, а за последующие 200 лет – 160 ГтС, то есть всего – 480 ГтС.

Из 480 Гт углерода, выброшенных в атмосферу за 200 лет, океан поглотил 26%, суша – 34%, в атмосфере осталось 40% (Ecosystems..., 2005; House et al., 2002). Современные концентрации  $\text{CO}_2$  (379 ppm) и  $\text{CH}_4$  (1774 ppb<sup>26</sup>) значительно превышают их естественные диапазоны за последние 650 тыс. лет (МГЭИК, 2007). В результате антропогенных выбросов за несколько тысяч лет доиндустриальной эпохи концентрация  $\text{CO}_2$  выросла на 40 ppm (с 240 до 280), концентра-

<sup>26</sup> Ppm – миллионная доля (частей на миллион), ppb – миллиардная доля (частей на миллиард) – единицы измерения концентрации и других относительных величин, аналогичные по смыслу проценту (сотая доля) и промилле (тысячная доля)

ция метана выросла на 250 ppb (Ruddiman, 2003), за последние 200 лет концентрация  $\text{CO}_2$  выросла на 99 ppm (с 280 до 379); концентрация метана - в 2 раза<sup>27</sup>.

Объемы антропогенных выбросов парниковых газов продолжают нарастать, прежде всего за счет промышленных выбросов (рис. 25). По данным МГЭИК (2007) ежегодная эмиссия  $\text{CO}_2$  из-за сжигания ископаемого топлива увеличилась с 5,4 Гт С в 1980-е гг. до 6,4 Гт в 1990-е и до 7,2 Гт С в 2000–2005 гг. К этому следует прибавить выбросы  $\text{CO}_2$  за счет изменений в землепользовании, которые в 1990-е годы составляли около 1,6 Гт С в год. Антропогенная эмиссия метана в конце 1990-х – начале 2000-х гг. составляла по разным оценкам от 320 до 428 Мт в год, что существенно превышает эмиссию из природных источников (200–260 Мт) (см. п. 1.2.1) (МГЭИК, 2007).

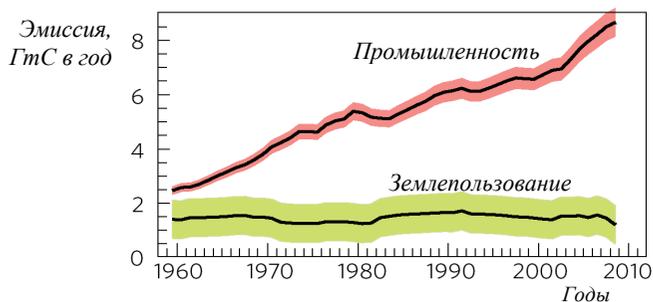


Рис.25. Антропогенная эмиссия  $\text{CO}_2$  (Le Quere et al., 2009).

Однако, антропогенная эмиссия – далеко не единственный путь нарушения природного углеродного цикла<sup>28</sup>. Важнейшую роль играют изменения функций экосистем по регуляции углеродного цикла в результате их разрушения человеком (см. п. 2.3) и в результате происходящих сегодня климатических изменений.

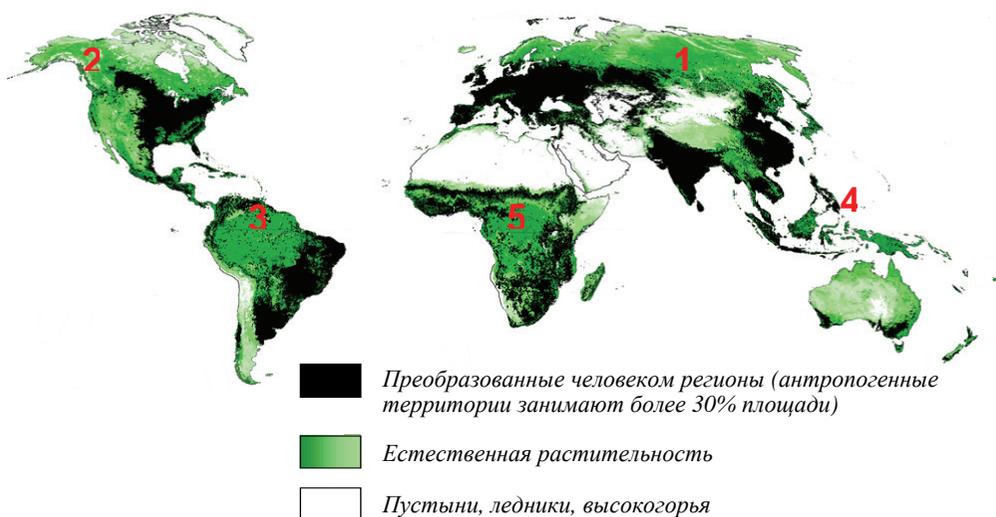
## 2.2. Сокращение площади природных экосистем

Сегодня система биосферной регуляции параметров окружающей среды существенно нарушена человеком. Основной фактор этих нарушений – уничтожение природных экосистем, осуществляющих эту регуляцию. К сегодняшнему дню природные экосистемы уничтожены или существенно нарушены на 63.8% территории суши, которая могла бы быть занята растительностью (без учета

<sup>27</sup> По данным МГЭИК, после 1993 г наблюдалось некоторое снижение темпов роста концентрации метана в атмосфере (Solomon et al., 2007).

<sup>28</sup> Следует отметить, что антропогенная эмиссия углерода составляет лишь несколько процентов от природных потоков, и это уже, по мнению многих специалистов, привело к существенным нарушениям глобальной системы регуляции среды. Однако циклы других важнейших биогенных элементов – азота, фосфора, серы – нарушены человеком намного сильнее и антропогенные потоки этих элементов существенно превышают природные потоки (Falkovski et al 2000; Millenium..., 2005). Влияние этих нарушений на систему биосферной регуляции изучено намного хуже.

ледников и пустынь) (Данилов-Данильян и др., 2005). В историческое время утрачено 40% - 46% лесов – наиболее продуктивных экосистем суши, а оставшиеся леса в значительной степени фрагментированы и деградированы. В благоприятных для жизни и ведения сельского хозяйства природных зонах люди используют от 20 до 75% территории (Millenium..., 2005). Большинство этих утрат произошло за последние 200 лет (Bryant et al., 1997; Ecosystems..., 2005), причем в последние 50 лет люди изменяли экосистемы более быстро и интенсивно, чем в какой-либо другой сравнимый период истории (Millenium..., 2005). Если взглянуть на карту, то видно, что ненарушенных природных экосистем, которые выполняют функцию биосферной регуляции, осталось не так уж много – сегодня они занимают примерно треть поверхности суши (рис. 26)



*Рис.26. Природные и трансформированные человеком территории (по данным Millennium ecosystem assessment, 2005, и Global Land Cover 2000. Основные центры биосферной регуляции: 1 – Северо-Евразийский; 2 – Североамериканский; 3 – Южноамериканский, 4 – Австралийско-Южноазиатский; 5 - Африканский.*

Если раньше экологический ущерб от антропогенных нарушений экосистем вызывал опасения прежде всего на локальном и региональном уровнях, то сегодня становятся очевидными глобальные последствия разрушения природного покрова (Foley et al., 2005). Сегодня уже имеется немало свидетельств того, что масштабное сокращение площади природных экосистем человеком, нарушение их структуры, уничтожение биоразнообразия ведет к снижению мощности и надежности природных регуляторных функций, что неизбежно влечет за собой большой экономический ущерб (Павлов и др., 2009).

Сократив площадь продуктивных природных экосистем почти наполовину, человек существенно ослабил мощность биосферной «машины» по регуляции

среды. По некоторым оценкам, мощность функций биоты, составлявшая до вмешательства человека 100 TW<sup>29</sup>, сокращена им на 40 TW, из которых лишь 6 TW потребляется человеком в виде продуктов питания, корма для скота и древесины, остальные 34 TW обусловлены уничтожением и нарушением природных экосистем (Makarieva et al., 2008).

Очевидно, что столь масштабные преобразования экосистем существенно изменили их климаторегулирующие функции – как биогеохимические, так и биогеофизические.

### **2.3. Антропогенные нарушения экосистемных функций регуляции углеродного цикла**

Наиболее сильно экосистемные функции нарушаются при замене природных экосистем антропогенными территориями. Очевидно, что у промышленных зон и городских поселений эти функции утрачиваются почти полностью, а сельскохозяйственные угодья сохраняют углерод намного хуже, чем природные экосистемы, место которых они заняли. Так, запас углерода в биомассе, почве и опаде в большинстве типов леса составляет в среднем около 300 т на га, в то время как запас в почвах и биомассе сельскохозяйственных полей – около 100 т (82-125), то есть в три раза меньше (House et al., 2002; Parish et al., 2008).

Однако и в тех случаях, когда полного замещения природных экосистем не происходит, антропогенные нарушения их структуры ведут к деградации климаторегулирующих функций.

Запас углерода в наземной экосистеме (в биомассе, мортмассе, почве, торфе) максимален в климаксных сообществах, а скорость аккумуляции углерода максимальна в начальных и средних сукцессионных стадиях, характеризующихся наибольшей продуктивностью. (1 на рис. 27). При нарушениях экосистем, переводящих их в более ранние стадии, сообщество на несколько лет превращается в источник углерода (5 на рис. 27). Как отмечалось выше, роль экосистемы как поглотителя или источника углерода определяется соотношением скоростей аккумуляции углерода в ходе фотосинтеза и его выделения в процессе дыхания сообщества, где ключевую роль играет дыхание почвы. Нарушения растительности (при вырубках, пожарах, ветровалах и др.), в большинстве случаев ведут к увеличению температуры и/или уменьшению влажности почвы<sup>30</sup>, что усиливает разложение органического углерода. Особенно важны эти процессы для северных экосистем, где запасы углерода в почве и торфе наиболее велики.

Лесные экосистемы после пожаров, рубок или повреждений насекомыми на несколько лет превращаются в источники углерода (рис. 28). Например, после обширных пожаров и поражений насекомыми на рубеже веков в канадских лесах эмиссия углерода превысила его сток (рис. 29), и в дальнейшем прогнозируется

---

<sup>29</sup> TW – тераватт – 10<sup>12</sup> ватт

<sup>30</sup> В местах с избыточным увлажнением может происходить обратный процесс – заболачивание экосистем из-за снижения испарения воды деревьями.

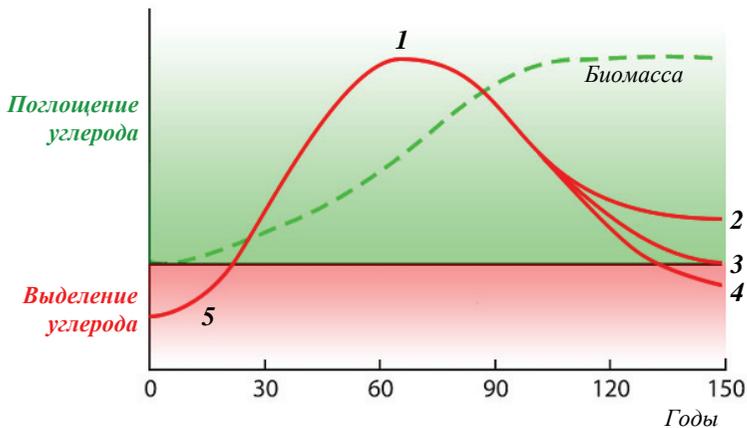


Рис.27. Изменения биомассы (пунктир) и функции поглощения углерода (сплошная линия) лесной экосистемой в ходе вторичной сукцессии после вырубki (по Canadell et al., 2007a с изменениями). 1 – максимальная скорость поглощения углерода на средних стадиях сукцессии; 2 – стабильное поглощение углерода климаксным сообществом; 3 – переход к нейтральности; 4 – выделение углерода при нарушениях или изменении климата и водного режима; 5 – выделение углерода на начальных стадиях сукцессии после вырубki или пожара.

сохранение этого соотношения в связи с увеличением числа пожаров, вызванных изменениями климата (Kurz et al., 2008). Суммарная послепожарная эмиссия углерода в результате разложения органики на горяч в несколько раз превышает его выбросы непосредственно во время пожара. Так, на охраняемой территории лесного фонда России в период 1990-2002 гг. эти потоки составили 10,2 и 0,9 Мт углерода в год соответственно (Замолодчиков и др., 2005).

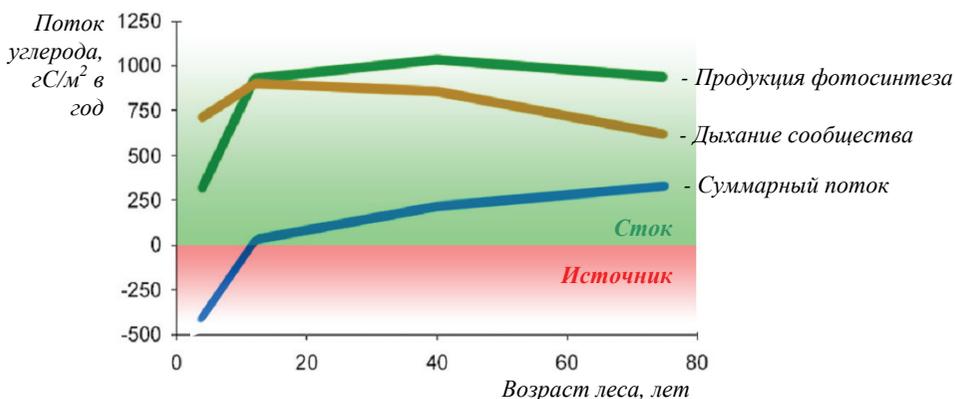


Рис. 28. Годовой нетто-поток углерода, продукция фотосинтеза и дыхание сообщества по данным измерений в сосновых лесах разного возраста в Финляндии (Kolari et al., 2004).

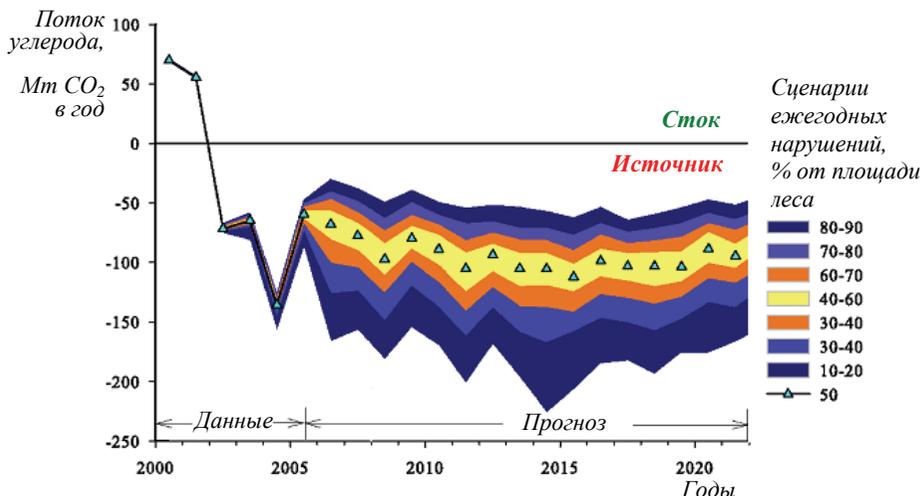


Рис. 29. Результаты моделирования динамики потока  $CO_2$  для управляемых лесов Канады на основании данных о нарушениях лесов и лесной статистики за 2000-2005 гг. Разные цвета соответствуют разным сценариям возможных нарушений лесов пожарами и насекомыми в будущем (Kurze et al., 2008).

По данным А. Fredeen с соавторами (2007), участки вырубок хвойного леса в (Британская Колумбия, Канада) через 5-6 лет продолжали оставаться источниками углерода. Во вторичных лесах (менее 20 лет) запасы углерода были достоверно ниже, чем в старых лесах (140-250 лет) вне зависимости от типа почвы (рис. 30, Fredeen et al., 2005). По оценкам этих исследователей, рубки старых лесов в Британской Колумбии снижают запасы углерода в лесах на 41-54%.

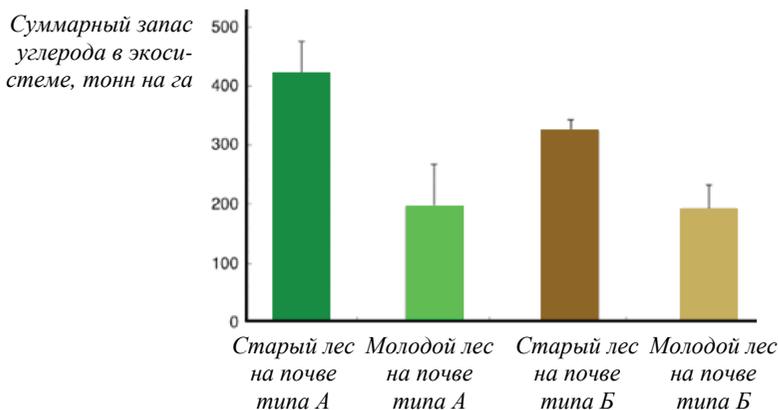


Рис. 30. Суммарные запасы углерода в экосистемах старых (старше 140 лет) и молодых (менее 20 лет) лесов на почвах двух типов (Fredeen et al, 2005).

В России между 1983 и 1992 гг. управляемые леса на европейской части страны, где пожары и вспышки насекомых частично контролировались лесной службой, были стоком 0,051 ГтС в год, а сибирские леса, где контроль различных нарушений обеспечивается в гораздо меньшей степени, были источником 0.081–0.123 ГтС в год (IPCC, 2001a).

Таким образом, природные и антропогенные нарушения леса – это ключевые факторы, определяющие переход лесных экосистем от функции стока углерода к функции источника и наоборот. Нарушения, затрагивающие пулы углерода с большим временем оборота (почвы и торф), влияют на экосистемные процессы на протяжении столетий и тысячелетий (МГЭИК, 2001б; IPCC, 2001a).

Ранее считалось, что старые леса перестают поглощать углерод и существуют при его нулевом балансе. Даже в этом случае они чрезвычайно важны как хранилища больших количеств запасенного ранее углерода, и эту функцию невозможно заменить другими формами землепользования (Canadell et al., 2007a; Field, Kaduk, 2004; Knohl et al., 2009). Однако ряд исследований показал, что старые леса во многих случаях продолжают поглощать углерод, причем вероятность функционирования лесных экосистем как источников углерода не увеличивается с возрастом (рис. 31, Knohl et al., 2009; Luysaert et al., 2008), а определяется изменением локальных гидрологических и климатических условий.

Например, в Центрально-Лесном государственном заповеднике (Тверская обл.) в период с 1999 по 2004 гг. ельники, расположенные в сухих местообитаниях, играли роль стоков углерода, а во влажных – роль источников, причем важнейшим фактором, влияющим на баланс углерода заболоченных лесов, являются колебания уровня воды (Kurbatova et al., 2008).

Таким образом, если учитывать процессы, происходящие в почвах, то нарушенные и восстанавливающиеся леса во многих случаях являются источниками углерода, а старые леса не только сохраняют уже накопленный углерод, но часто

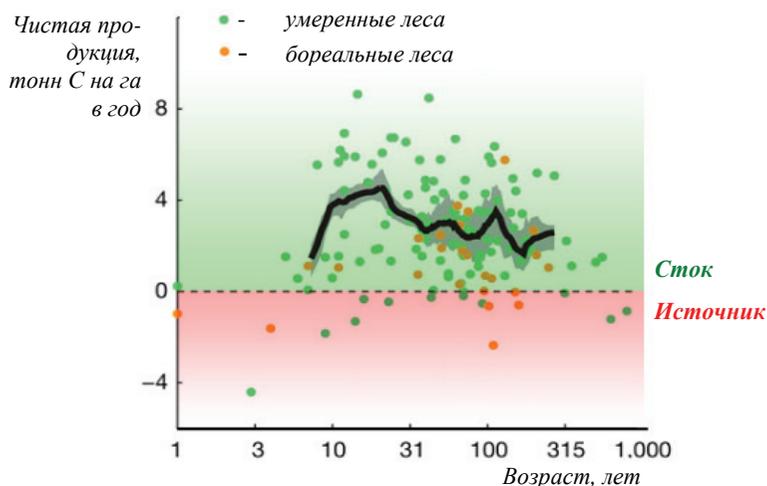


Рис. 31. Чистая экосистемная продукция лесов разного типа (Luysaert et al., 2008).

продолжают аккумулировать его неограниченно долгое время (Ecosystems..., 2005; Nabuurs et al., 2007). Эксплуатация и другие нарушения природных лесов неизбежно сопровождаются потерями углерода (а также нарушениями других функций леса), а представление о том, что молодые и средневозрастные леса оптимальны с точки зрения регуляции углеродного цикла, не совсем верно.

Наибольшие выбросы углерода происходят при нарушениях болотных и заболоченных экосистем, которые содержат наибольшее среди наземных экосистем количество углерода на единицу площади – до 1400 т на га, в то время как для большинства лесов запасы углерода в биомассе и почве не превышают 400 Т на га (Parish et al., 2008). В России средний запас углерода для лесных земель составляет 205 тонн на га; для болот – 639 тонн на га (Sohngen et al., 2005).

Торфоразработки и осушение коренным образом меняют структуру и функционирование болотных экосистем. Уровень воды является основным фактором, который определяет возможность долговременной аккумуляции углерода в торфе. При снижении уровня воды функция болот переключается с поглощения углерода на его выделение, и чем ниже опускается уровень воды, тем более интенсивной становится эмиссия (рис. 32).

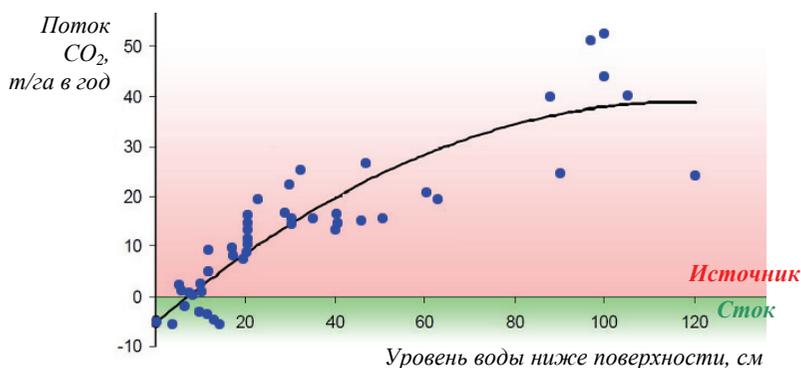


Рис. 32. Изменение потока CO<sub>2</sub> при снижении уровня воды в болотах различных типов в Европе (Joosten, Couwenberg, 2009).

Несмотря на то, что при осушении, как правило, сокращается выделение CH<sub>4</sub>, «охлаждающий» эффект от этого процесса многократно перекрывается «нагревающим» эффектом от эмиссии CO<sub>2</sub>. Кроме того, в некоторых случаях выделение метана продолжается и с осушенных болот. Например, в Томской и Московской областях, а также в Западной Сибири зафиксировано существенное выделение метана из дренажных канав осушаемых болот, с торфоразработок и даже с сенокосов на месте давно осушенных болот (рис. 33) (Глаголев и др., 2008; Чистотин и др., 2006).

Сравнение различных природных и нарушенных болот в Европе показало, что все нарушенные болота (кроме некоторых облесенных болот), оказывают сильный «нагревающий» эффект на климат.

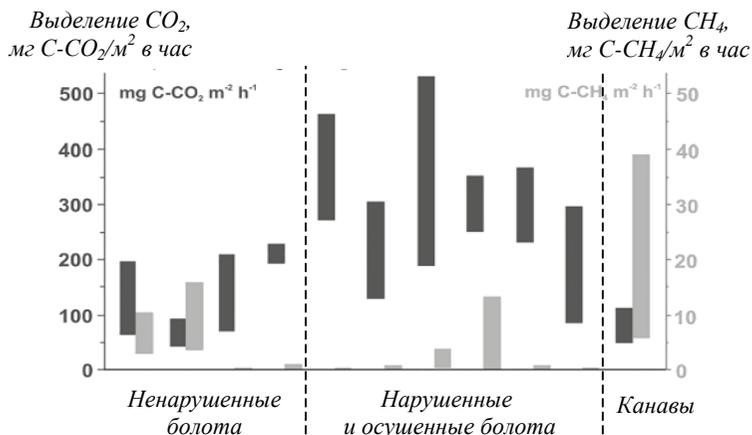


Рис. 33. Выделение  $\text{CO}_2$  (темные столбики) и  $\text{CH}_4$  (светлые столбики) в нарушенных и ненарушенных болотах в Западной Сибири (Глаголев и др., 2008).

По мере увеличения эмиссии  $\text{CO}_2$ , несмотря на одновременное сокращение эмиссии  $\text{CH}_4$ , «нагревающий» эффект усиливается и становится максимальным для торфоразработок и осушенных болот, используемых в сельском хозяйстве (рис. 34). Природные болота близки к нейтральным значениям, колеблясь между функциями небольшого стока или источника углерода, в зависимости от погодных условий данного года (Alm et al., 2007; Drosler et al., 2008; Parish et al., 2008;

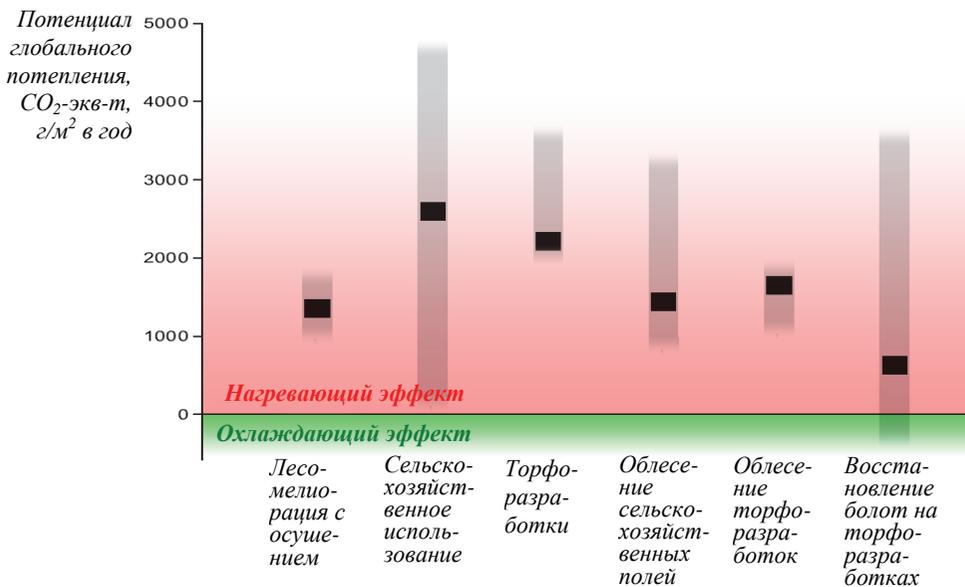


Рис. 34. Зафиксированные диапазоны и средние значения эмиссии парниковых газов в болотах Финляндии (Alm et al., 2007).

Wise use..., 2002). Однако, как было сказано выше, несмотря на то, что современная оценка их ПГП может соответствовать «нагревающему» эффекту из-за эмиссии  $\text{CH}_4$ , их интегральное влияние на климат с учетом накопленного углерода является охлаждением.

Сильно осушенные болота и торфоразработки долгие годы остаются постоянным источником углерода из-за глубокой аэрации торфяного слоя. Удобрение торфяных земель для сельского хозяйства еще больше ускоряет разложение торфа и увеличивает эмиссию  $\text{CO}_2$ . Кроме того, осушение болот ведет к торфяным пожарам, освобождающим огромные количества углерода. Реконструкция (обводнение) осушенных болот позволяет восстановить их функции, но далеко не сразу (Joosten, Couwenberg, 2009).

Роль лесомелиорации в изменении функций более сложна, так как вызывает разнонаправленные процессы – увеличение поглощения  $\text{CO}_2$  при росте биомассы леса и увеличение эмиссии  $\text{CO}_2$  из-за разложения торфа. В начале прирост лесной биомассы может сильно превышать ее утрату в торфе, но постепенно рост леса замедляется, а потом прекращается, а эмиссия из торфа – продолжается<sup>31</sup> (рис. 35). Поэтому на больших временных периодах будет преобладать утрата углерода и облесение торфяных земель нельзя считать эффективной мерой секвестрирования углерода (Parish et al., 2008; Wise use..., 2002).

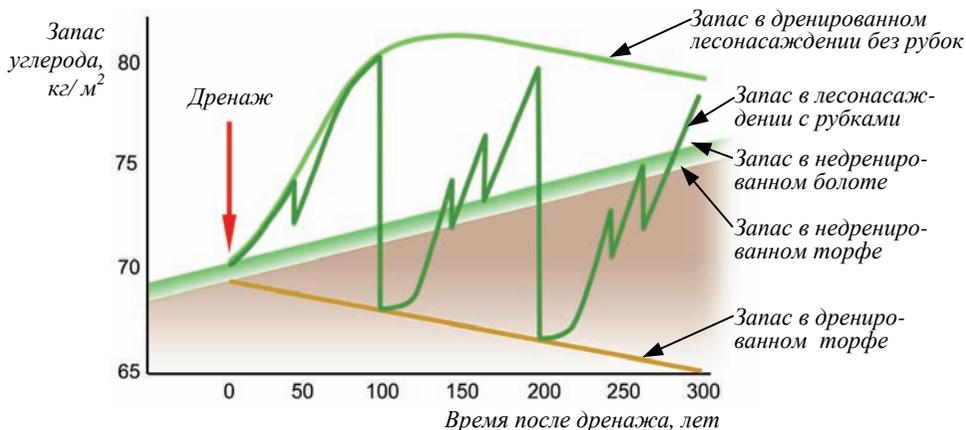


Рис. 35. Динамика запасов углерода в осушенном олиготрофном осоковом болоте при его зарастании сосной. Сплошные линии – запас в биомассе, пунктирные – запас в торфе. 1 – суммарный запас углерода в биомассе леса без вырубок; 2 – запас углерода при рубках леса (Parish et al., 2008).

В отдельных случаях, при мелком дренаже, после лесомелиорации может продолжаться накопление торфа (Parish et al., 2008). В этих случаях, если учесть,

<sup>31</sup> В Финляндии ежегодная эмиссия  $\text{CO}_2$  из почвы участков, лесомелиорированных до 1960 г., составляет сегодня 250-500 г/м<sup>2</sup>. Это говорит о том, что утрата углерода не прекращается в течение многих десятилетий (Minkinen et al., 2007).

что одновременно падает эмиссия метана, лесомелиорированные болота могут оказывать «охлаждающее» воздействие на климат (Wise use..., 2002).

Анализ данных о потоках  $\text{CO}_2$  между экосистемами и атмосферой, собранных по программе FLUXNET в разных типах экосистем по всему миру, показал наличие достоверного повышения интенсивности дыхания нарушенных экосистем по сравнению с ненарушенными (рис. 36) (Baldocchi, 2008). Для экосистем с существенными долговременными запасами углерода в почвах и торфе эффекты от нарушений сохраняются на протяжении столетий и тысячелетий (IPCC, 2001a)

Стратегия землепользования и интенсивность нарушения наземных экосистем являются ключевыми факторами, определяющими, какую роль экосистемы будут играть – источника или стока углерода, от чего, в свою очередь, зависит динамика содержания парниковых газов в атмосфере (Canadell et al., 2007a).

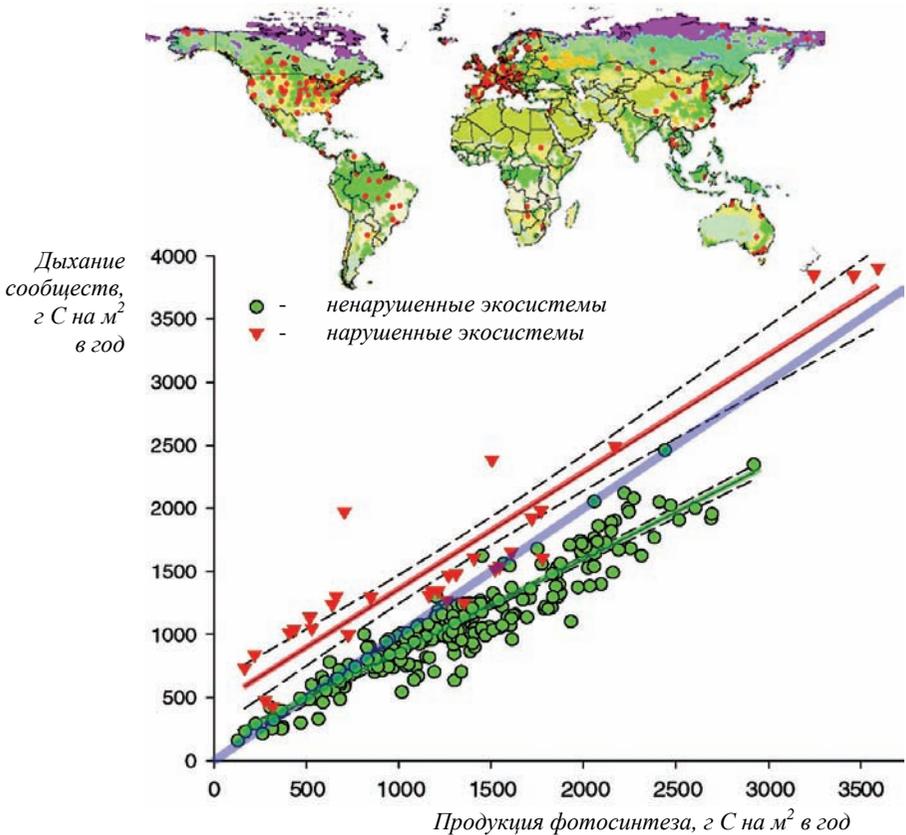


Рис.36. Соотношение выделения и поглощения углерода при дыхании и фотосинтезе в нарушенных и ненарушенных экосистемах. На карте показаны места измерений по программе FLUXNET (Baldocchi, 2008).

В заключение необходимо подчеркнуть, что независимо от окончательного вывода климатологов относительно роли  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в формировании климата Земли, углеродный баланс экосистем является интегральным показателем их функционирования, так как отражает интенсивность основных процессов, происходящих в живых системах – фотосинтеза и дыхания, создания биопродукции и ее деструкции – и, следовательно, всех остальных экосистемных функций. Ключевая роль природных экосистем в регуляции цикла углерода и масштабы антропогенных нарушений этой биосферной функции свидетельствуют об аналогичных масштабах нарушений других механизмов природной регуляции среды, включая и те, которые еще не изучены.

#### 2.4. Антропогенные нарушения биогеофизических климаторегулирующих функций экосистем

Произошедшее в ходе истории человечества масштабное замещение лесов сельскохозяйственными угодьями, которые по физическим характеристикам сходны с травянистыми сообществами, существенно изменило потоки энергии и влаги между поверхностью суши и атмосферой.

Масштабные вырубки лесов привели к снижению поступления пара от суши в атмосферу в этих регионах на  $3000 \text{ км}^3$  в год (4% глобального показателя), в то же время в регионах интенсивной ирригации на  $2600 \text{ км}^3$  в год увеличилось поступление пара в атмосферу (рис. 37). Хотя суммарно в результате этих процессов поступление пара в атмосферу снизилось незначительно по сравнению с

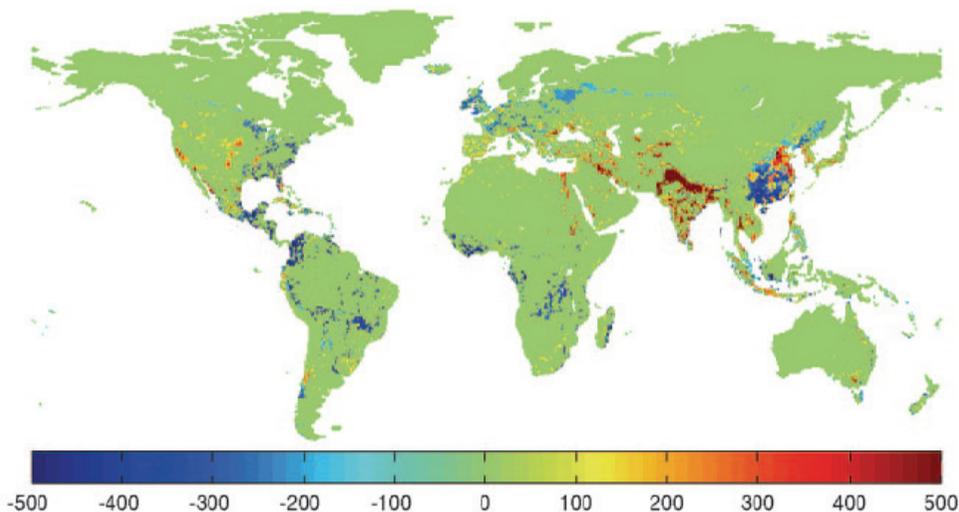


Рис. 37. Изменение потоков пара между поверхностью суши и атмосферой в результате уничтожения лесов и ирригации (мм в год, сокращение потоков обозначено синим цветом, увеличение - красным) (Gordon et al., 2005).

глобальным круговоротом воды – всего на  $400 \text{ км}^3$  в год, произошло существенное перераспределение региональных потоков влаги и изменение системы атмосферной циркуляции, что в некоторых густонаселенных регионах проявилось в заметном иссушении климата (Gordon et al., 2005).

По данным МГЭИК (2007) антропогенные трансформации растительного покрова привели к росту альбедо с радиационным воздействием лишь  $0,2 \text{ Вт/м}^2$ , в то время как антропогенные выбросы  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  дали эффекты в  $1,66 \text{ Вт/м}^2$  и  $0,48 \text{ Вт/м}^2$  соответственно. Однако многие модели показывают, что сила воздействия на климат изменений физических свойств поверхности при антропогенной трансформации экосистем существенно больше и может иметь тот же масштаб, что и влияние концентраций парниковых газов в атмосфере (Brovkin et al., 1999).

Антропогенные преобразования экосистем в предыдущие века и тысячелетия заключались прежде всего в сокращении площади лесов и замещении их сельскохозяйственными полями и травянистыми территориями. Как было отмечено выше, суммарный эффект от таких изменений поверхности зависит от соотношения «нагревающего» эффекта от ослабления эвапотранспирации и «охлаждающего» эффекта от увеличения альбедо (важно прежде всего для снежных регионов). Недостаточная изученность этих процессов пока не позволяет однозначно определить направление результирующих изменений регионального климата. Многие модели свидетельствуют о преобладании «охлаждающего» эффекта из-за увеличения альбедо, причем снижение среднегодовой температуры было наиболее ощутимым в сельскохозяйственных регионах умеренной зоны Северного полушария (рис.38а, Govindasamy et al., 2001; Betts, 2001). Это навело исследователей на мысль, что сведение лесов человеком могло внести существенный вклад в последнее похолодание в Северном полушарии, которое наблю-

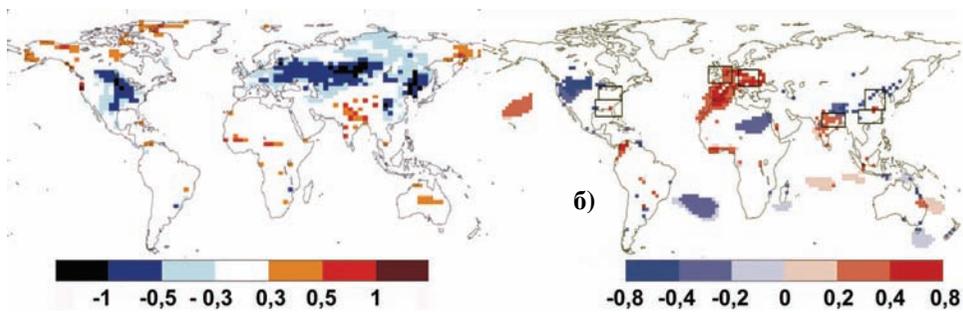


Рис. 38. Результаты моделирования климатических биогеофизических эффектов от сведения лесов человеком в историческое время. а) Сдвиги среднегодовой температуры. Результат сравнения моделей климата при естественной растительности, не измененной человеком, и при современной растительности. Концентрация  $\text{CO}_2$  принималась постоянной на уровне 1990 г. (Betts, 2001). б) Изменение температуры воздуха в слое 2 м над поверхностью земли в результате преобразования человеком природной растительности. Модель показывает существенное повышение температуры в Европе (Findell et al., 2007).

далось с 1000 по 1900 годы<sup>32</sup>, в так называемый «малый ледниковый период» (Brovkin et al., 1999; Govindasamy et al., 2001) (см. также п. 1.3. и рис.8). Другие модели, наоборот, выявили преобладание «нагревающего» эффекта из-за снижения эвапотранспирации. Кроме того, многие модели указывают на вероятность существенного уменьшения осадков в обезлесенных регионах (рис. 38б; Findell et al, 2007; Forster et al., 2007).

Подобный разноречивый результат моделирования лишь подчеркивает необходимость уделять биогеофизическим функциям экосистем не меньшее внимание, чем исследованиям природного углеродного цикла и потоков парниковых газов между экосистемами и атмосферой.

Растительность – мощный регулятор водного режима суши, и нарушения, а тем более уничтожение природных экосистем является важнейшим фактором деградации водных ресурсов (Данилов-Данильян, Лосев, 2008). Примеры того, как антропогенные изменения растительности влияют на формирование осадков и гидрологического режима в разных природных зонах (в прериях, бореальных, умеренных и тропических лесах) можно найти в работе R.A. Pielke et al (2006).

Ключевая роль естественной растительности, и в первую очередь лесов, в обеспечении качества воды<sup>33</sup>, предотвращении эрозии почв, снижение длительности и высоты паводков является общепризнанной (Calder et al., 2007). Любые нарушения природных экосистем приводят к снижению этих функций.

Что касается роли природных экосистем в регуляции запасов доступной воды, то она зависит от масштабов нарушений. Наблюдения показывают, что при уничтожении леса на небольших территориях (единицы - десятки км<sup>2</sup>) объем стока рек увеличивается, а в результате лесопосадок, наоборот, сокращается (Calder et al., 2007; Da Silva et al., 2008). Это объясняется более сильным потреблением и испарением воды деревьями по сравнению с другой растительностью. Кроме того, на примере бассейна Амазонки показано, что небольшие вырубки из-за их прогревания и усиления конвекции воздуха стимулируют формирование над ними гроз, что также может увеличивать количество локальных осадков.

Однако при больших масштабах обезлесения (сотни и тысячи км<sup>2</sup>) картина меняется – наблюдается сокращение осадков, иссушение и потепление регионального климата (Bunyard, 2008; Foley et al., 2007; Nepstad et al., 2008). Как сказано выше, положительная обратная связь между площадью леса и количеством осадков в этом регионе ведет к образованию двух потенциально устойчивых состояний – саванны и леса (см. п. 1.5). Аналогичная закономерность выявлена и для других регионов, например, северо-востока Индии (Meher-Nomji, 1991).

---

<sup>32</sup> Имеются совершенно другие гипотезы о причинах этого похолодания. Так, по мнению W. Ruddiman (2003), похолодание в 1300-1900 гг. может быть результатом пандемий чумы, вызвавших снижение численности населения и зарастания полей лесом в Европе, что привело к снижению концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере.

<sup>33</sup> Программы по сохранению и восстановлению природных экосистем на водосборах для обеспечения населения качественной водой сегодня реализуются во многих странах мира (Payments..., 2008; Postel, Thompson; 2005).

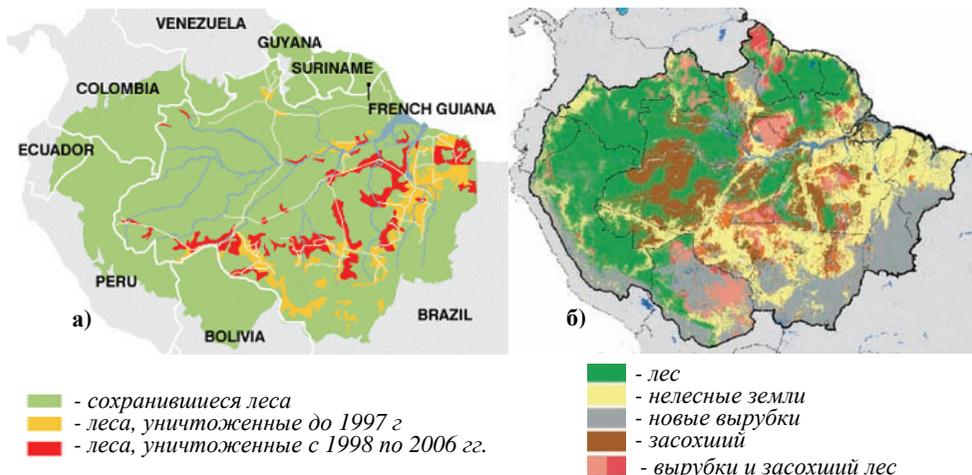


Рис.39. Сокращение лесного покрова Амазонии: а) леса, уничтоженные до 2006 г; б) прогноз состояния лесов к 2030 г. при сохранении современных темпов сведения лесов (Nepstad et al., 2008).

Сегодня бассейн Амазонки лидирует по скорости сокращения лесов<sup>34</sup> (рис. 39; Global Forest..., 2005; Nepstad et al., 2008). Это вызвано ростом спроса на сельскохозяйственную продукцию и биотопливо. Вместо лесов формируются саванноподобные сообщества, растет вероятность пожаров и экстремальных засух. Как видно из рис. 40, количество влаги, доступной для растений в период засух, сокращалось в течение последних лет.

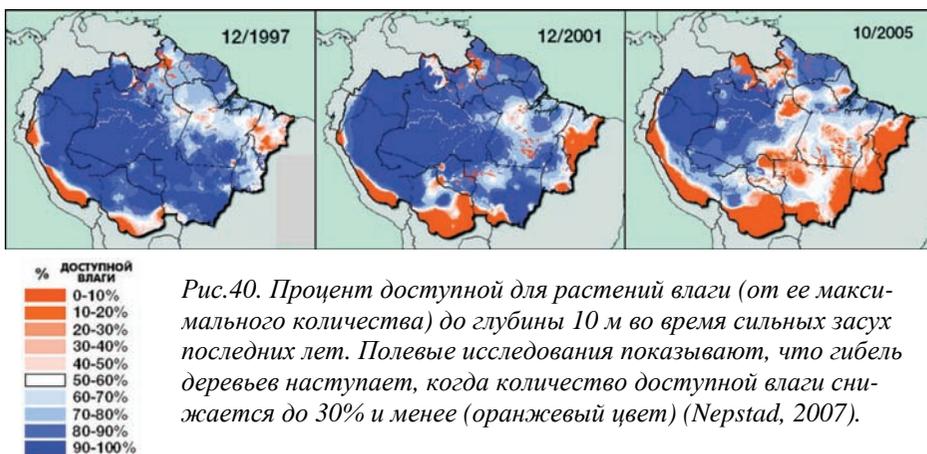
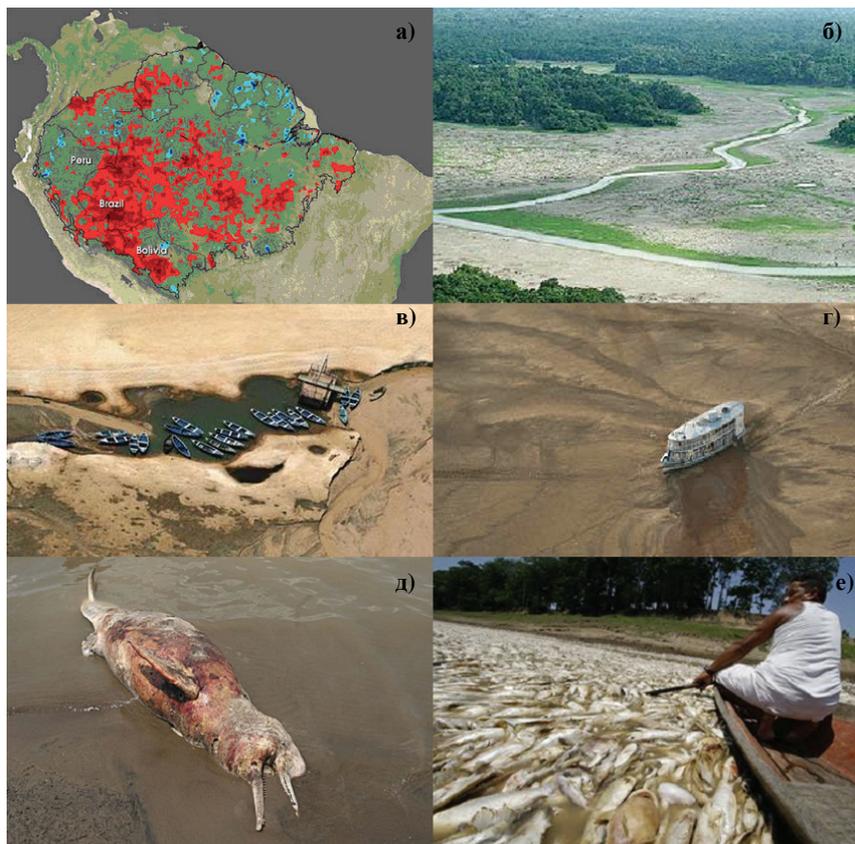


Рис.40. Процент доступной для растений влаги (от ее максимального количества) до глубины 10 м во время сильных засух последних лет. Полевые исследования показывают, что гибель деревьев наступает, когда количество доступной влаги снижается до 30% и менее (оранжевый цвет) (Nepstad, 2007).

<sup>34</sup> Причем, как показывают социально-экономические исследования, сведение лесов вовсе не сопровождается повышением уровня жизни населения (Rodrigues et al., 2009).



*Рис.41. Засуха в бассейне Амазонки 2005-2007 гг.: а) отклонения от средней нормы количества осадков в июле-сентябре 2005 г. по данным НАСА, красным цветом показано снижение количества осадков, синим – повышение (<http://earthobservatory.nasa.gov/>); б-е) последствия засухи: пересыхание водоемов, прекращение судоходства, гибель водной фауны (фотографии с сайтов Greenpeace, информационных агентств Reuters, Environment News Service .*

Сильнейшая засуха 2005-2007 гг. привела к обмелению Амазонки, прекращению судоходства, массовой гибели рыбы. Десятки тысяч людей остались без чистой воды и пищи, возникла опасность эпидемии, регион был объявлен зоной бедствия (рис. 41). Первопричиной этой засухи климатологи считают процессы формирования и циркуляции воздушных масс над океанами, однако экстремальная сила и продолжительность этого бедствия явились в определенной степени результатом масштабного сведения лесов в регионе.

Из-за кумулятивного действия глобальных климатических изменений и сведения лесов этот крупнейший в мире лесной регион в ближайшее время может перейти через «критическую точку», после чего начнется необратимый процесс

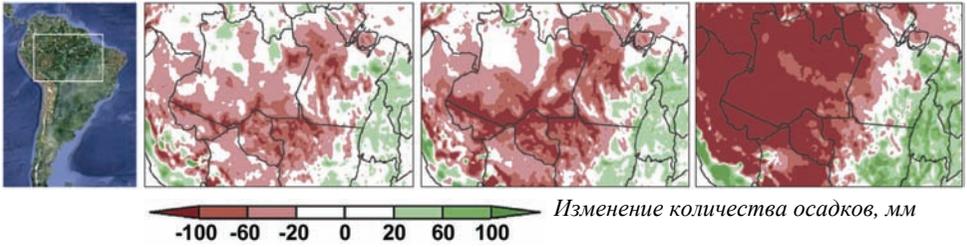


Рис. 42. Прогноз изменения количества осадков влажного периода (январь-февраль) при продолжении современных темпов сведения лесов к 2030 и 2050 гг. и в случае полного сведения лесов. С 1970 по 2000 гг. количество осадков за два месяца влажного периода составляло в среднем 530 мм (Da Silva et al., 2008).

замены лесов травянистыми и саванноподобными сообществами – уничтожение 30-40% лесов может перевести большинство Амазонии в сухой климат (рис.42, Malhi et al., 2008; Nepstad, 2007; Nepstad et al., 2008; Oyama, Nobre, 2003).

На другой стороне Земного шара – в Китае, в начале 1990-х гг. ежегодный ущерб от сведения лесов составлял 12 % ВВП, при чем основная его часть была результатом нарушения средообразующих (а не продукционных) функций леса. 60% экономического ущерба, вызванного сведением лесов, составляли потери речного стока и сокращение осадков (рис. 43, Yu-shi et al., 1997). Деграция средообразующих функций лесов привела в катастрофической ветровой и водной эрозии почв, пыльным бурям, опустыниванию, загрязнению океана речными выносами грунта и почвы (рис. 44).

В последние годы в Китае выделяются большие средства на восстановление лесов и сегодня 70% мирового прироста площади лесов происходит именно за счет китайских лесопосадок. Однако восстановление лесов требует существенного времени. Кроме того, желание получить от проектов по лесовосстановлению быструю выгоду ведет к тому, что во многих случаях создаются посадки



Рис. 43. Ежегодный экономический ущерб от уничтожения лесов, 1992 г. (по данным Yu-Shi et al, 1997).

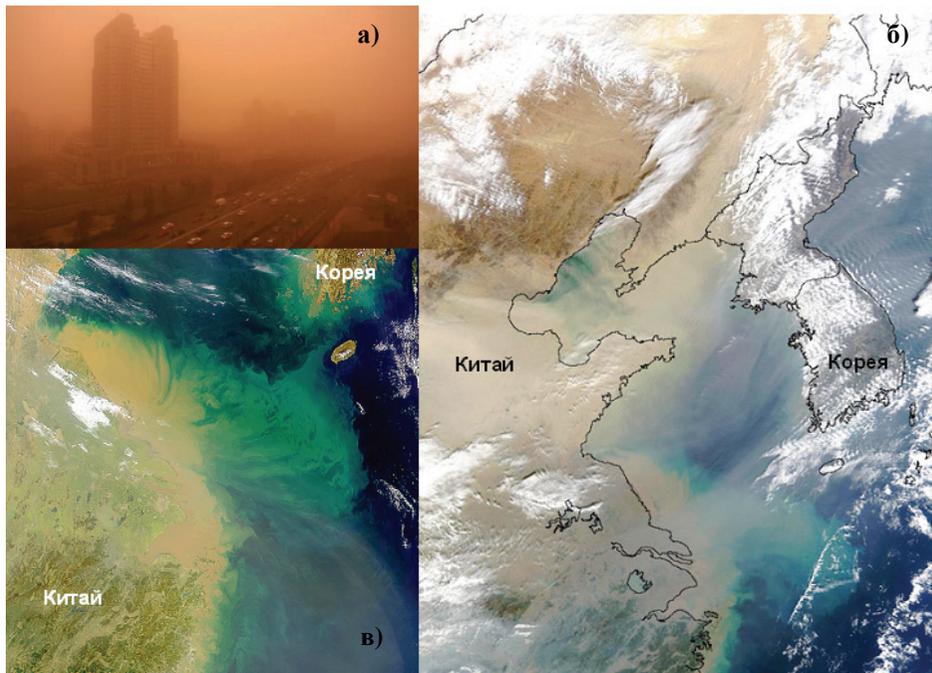


Рис. 44. Ветровая и водная эрозия в Китае: а) пыльная буря в Пекине; б) облака пыли над Китаем (NASA, 2002); в) почва, грунт и загрязнения выносятся реками в океан (NASA, 1999).

быстрорастущих чужеродных пород деревьев. Функции по регуляции регионального водного цикла и климата у таких коммерческих посадок сильно снижены по сравнению с природными лесами. Эти факторы – наследие масштабного сведения лесов в недалеком прошлом и создание «коммерческих» плантаций вместо природных лесов – являются, по мнению китайских экологов, одной из причин, усугубляющей ущерб от периодических засух в Китае (Cheng, 2010). Последняя засуха, поразившая многие регионы страны в 2009 – 2010 гг., считается сильнейшей за последние 50 лет (рис. 45. <http://feww.wordpress.com>; <http://online.wsj.com>; <http://www.freakyweather.com>)

В России также можно найти примеры ущерба от деградации средообразующих функций природных экосистем. Так, лесные и торфяные пожары в Центральном и Северо-Западном Федеральных округах России в начале 2000-х гг. (рис. 46) нанесли большой материальный ущерб и вред здоровью населения не только непосредственно в районах пожаров, но и в крупных городах (Москва, Санкт-Петербург и др.). Этот ущерб является результатом утраты из-за разработки торфяных залежей и осушения лесов одной из важнейших средообразующих функции болот и заболоченных лесов – функции регулирования гидрологического режима территорий.



Рис. 45. Засуха 2009-2010 гг. в Китае: дно высохшего водохранилища; засохшие посевы; очередь за водой (<http://news.xinhuanet.com>);

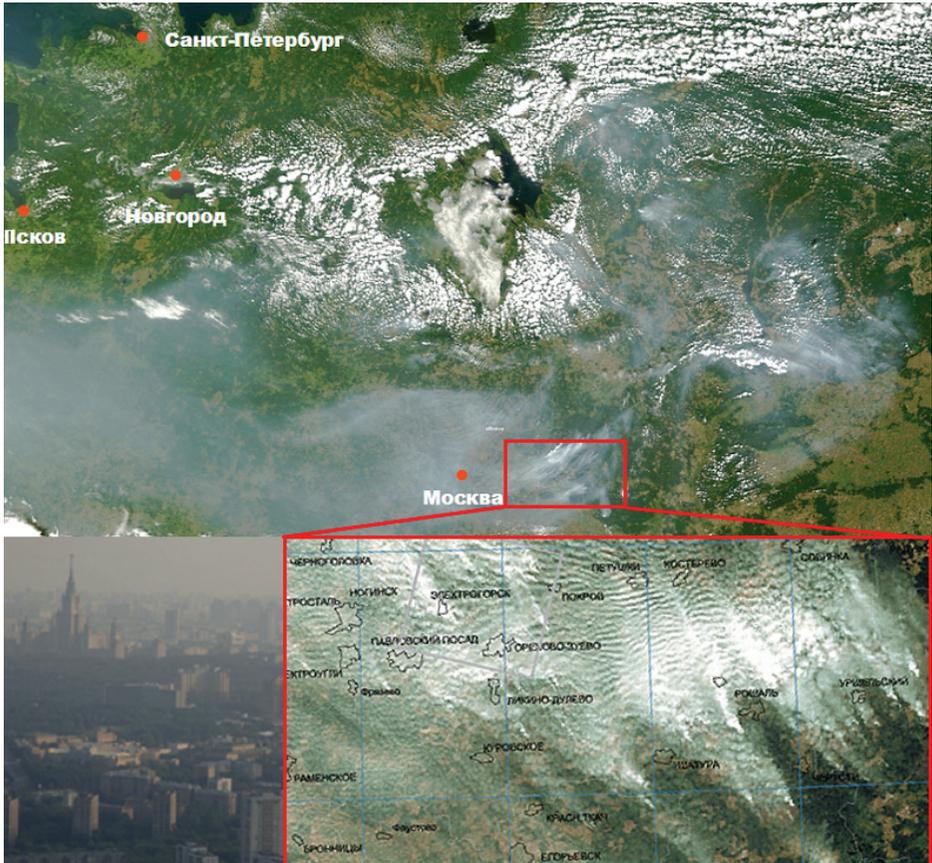


Рис. 46. Лесные и торфяные пожары в Центральном и Северо-Западном округах в начале 2000-х гг.

Таким образом, очевидно, что масштабные антропогенные преобразования территорий оказывают существенное влияние на региональный климат из-за нарушения биогеофизических климаторегулирующих функций экосистем. Региональные изменения климата следует включить в оценку антропогенного воздействия на климат (Pielke et al., 2002). Однако, как было сказано выше, масштабные трансформации территорий, прежде всего, сведение лесов, могут влиять и на глобальные климатические процессы (Avisar, Werth, 2005; Gordon et al., 2005; Hasler et al., 2009; Forster et al., 2007). Как отмечает R. Pielke соавторами (Pielke et al., 2002), явление Эль-Ниньо – это пример, когда нагревание сравнительно небольшой площади поверхности воды в тропической зоне Тихого Океана имеет глобальные климатические последствия. Уничтожение лесов и другие масштабные преобразования поверхности суши, очевидно, могут оказывать не меньшее влияние на климат.

Процессы изменения биогеофизических климаторегулирующих функций экосистем являются важным механизмом антропогенного влияния на климатическую систему, но из-за их малой изученности в настоящее время трудно определить результирующий эффект от их изменения (Forster et al., 2007)

## **2.5. Выход климатической системы за границы природной динамики**

В течение Четвертичного периода (последние 2,5 млн. лет) климат Земли испытывал циклические колебания ледниковых и межледниковых периодов. Как показали данные бурения антарктического льда на станции Восток, четыре оледенения за последние 420 тыс. лет соответствовали циклическим изменениям параметров орбиты Земли. При этом колебания температуры совпадали с изменениями концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Позже эти выводы были полностью подтверждены данными со станции Конкордия и распространены на период в 800 тыс. лет, правда, более ранние циклы оказались менее выраженными (рис. 47)(Louletque et al., 2008; Petit et al., 1999).

Изменения инсоляции, вызванные колебаниями параметров орбиты Земли могли служить инициаторами, запускающими перестройку глобальной климатической системы (Jouzel et al., 2007). Смену глобальных похолоданий и потеплений определяли дальнейшее взаимоусиливающееся действие внутрипланетарных климатических механизмов (перенос тепла и влаги в атмосферу с поверхности океана и суши, включая показатели альbedo и нагревания поверхности, связанные с площадью ледового и снежного покрова, изменения океанической циркуляции) (Ecosystems..., 2005; Jouzel et al., 2007; Petit et al., 1999). Что касается парниковых газов, то высокая корреляция их концентрации с температурой поверхности Земли говорит о том, что они вносили существенный вклад в колебания климата, усиливая, наряду с другими факторами, первоначальное воздействие орбитальных факторов. Моделирование показывает, что вклад парниковых газов мог определять около половины глобальных изменения температуры (Petit et al., 1999).

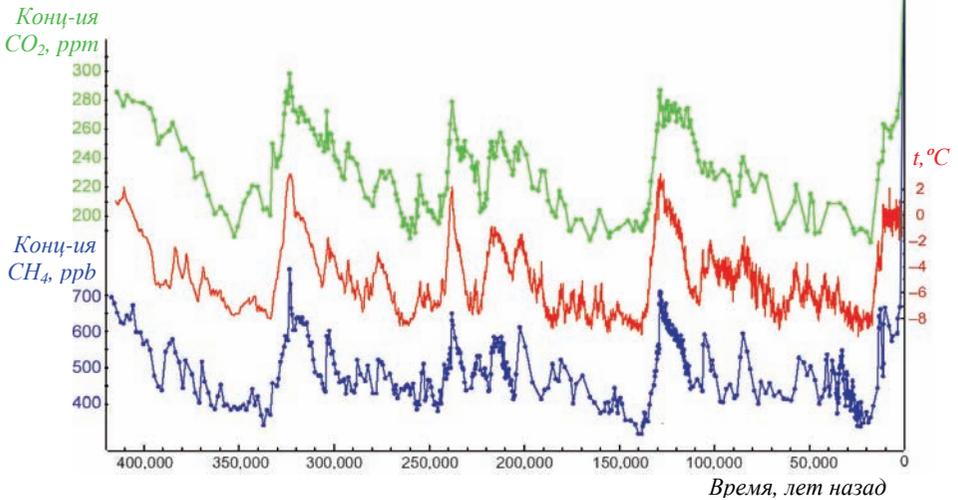


Рис. 47. Реконструкция изменений температуры относительно среднего значения за последнюю тысячу лет, концентрации  $\text{CO}_2$  и метана по данным бурения антарктического льда (Petit et al., 1999, с изменениями).

Воздействие человека на климатическую систему Земли (изменение природных биогеохимических циклов и масштабная трансформация природных экосистем) вывело ее за границы природной динамики Четвертичного периода (Ecosystems..., 2005). Если доиндустриальные концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  (280 ppm и 650 ppb) наблюдались во все межледниковые периоды, то их современные уровни (380 ppm и 1800 ppb) вышли далеко за пределы природных циклов (рис.48, Falkovski et al., 2000; Loulerque et al., 2008; Petit et al., 1999).

Этот переход произошел со скоростью, которая в 10 - 100 раз больше максимальных скоростей изменения концентрации парниковых газов за последние 400 тыс. лет (Falkovski et al., 2000). Если сопоставить амплитуду и скорость изменения концентрации  $\text{CO}_2$  в истории Земли, то видно, что антропогенное воздействие по амплитуде (десятки ppm) сопоставимо с ледниковыми циклами, но его скорость (десятки - сотни лет) на два-три порядка выше (рис. 49). Отметим, что в истории Земли происходили и более сильные изменения концентрации  $\text{CO}_2$ , но они происходили гораздо медленнее – на протяжении миллионов лет.

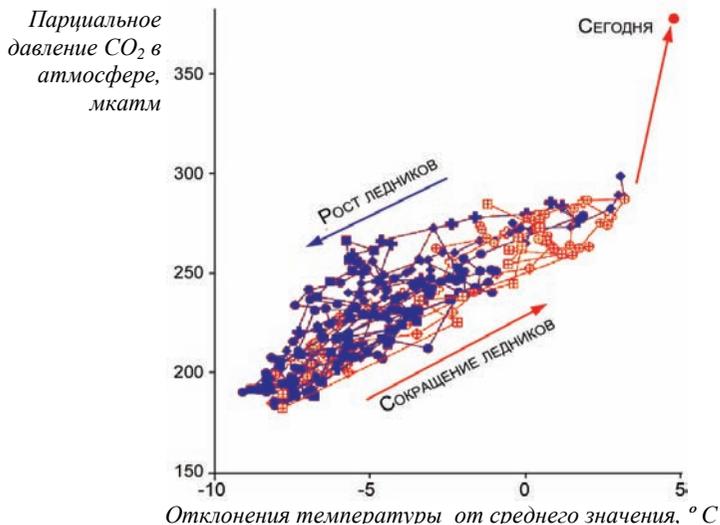


Рис.48. Корреляция изменений парциального давления  $\text{CO}_2$  и температуры в ходе природных циклов оледенения-потепления за 420 тыс. лет (по данным ледового бурения на станции Восток) и современная концентрация  $\text{CO}_2$  за пределами этого домена устойчивости (Falkovski et al., 2000).

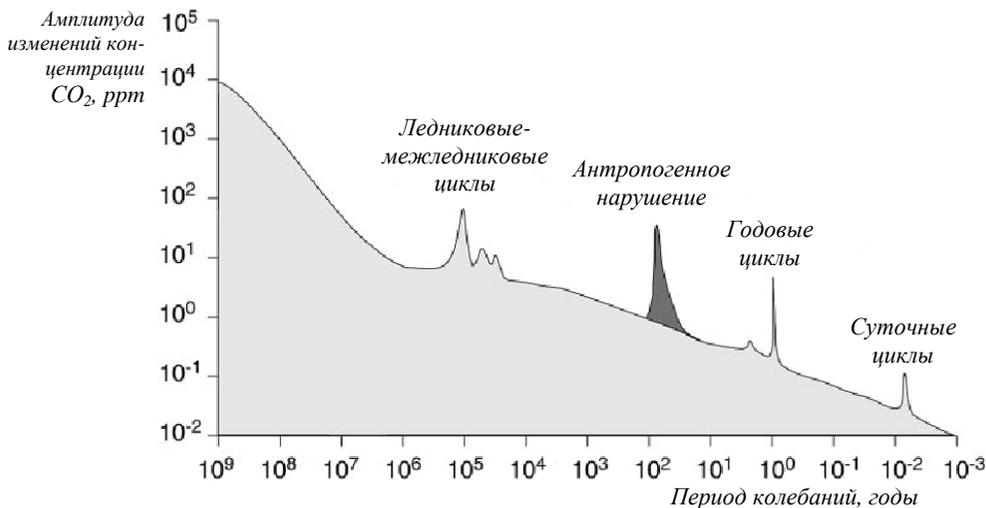


Рис.49. Соотношение амплитуды и скорости изменений концентрации  $\text{CO}_2$  в истории Земли. Антропогенное возмущение углеродного цикла не имеет аналогов в предыдущей геологической истории (Falkovski et al., 2000).

Амстердамская декларация 2001 г.<sup>35</sup>, подчеркивает, что по ряду ключевых параметров масштабы изменений природы Земли беспрецедентны и перекрывают границы, отмеченные, по меньшей мере, за последние полмиллиона лет. Сегодня Земля функционирует в новом состоянии, которое В.И. Вернадский (1988) еще в первой половине XX века охарактеризовал, как «ноосферу», в силу того, что деятельность человека стала крупнейшим геологическим фактором.

S. Crutzen и J. McNeill предложили ввести новое геохронологическое подразделение – антропоцен (Crutzen, Stoermer, 2000)<sup>36</sup>, полагая, что новая эпоха началась в XIX веке в эпоху индустриализации, и его основная черта – огромные масштабы использования ископаемого топлива, которые привели к росту концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере с доиндустриальных значений 270-275 ppm до 380 ppm сегодня. Такое мощное антропогенное воздействие, очевидно, имеет ключевые последствия для функционирования климатической системы Земли.

Однако если учитывать антропогенные изменения природных экосистем и их климаторегулирующих функций, то начало новой эпохи следует отодвинуть на несколько тысяч лет назад, когда началось существенное изменение природных потоков CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в результате развития земледелия и сведения лесов. По подсчетам W. Ruddiman (2003), именно этим объясняется аномальный рост концентраций CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, происходивший в течение последних 8 и 5 тысяч лет соответственно (рис. 50, 51), в то время как происходящие изменения орбиты Земли должны были бы вызвать снижение концентрации этих газов, как это было в течение предыдущих циклов. Современный межледниковый период длится уже 11 тысяч лет, а предыдущие три межледниковых периода были существенно короче – около 4 тыс. лет стабильного теплого климата (Petit et al., 1999). Как считает W. Ruddiman (2003), одним из факторов, «переключившим» ход климатических изменений с тенденции наступления нового ледникового периода на потепление могло быть масштабное преобразование природных экосистем человеком в течении нескольких тысяч лет доиндустриальной эпохи.

Археологические и палеоэкологические<sup>37</sup> исследования говорят о том, что существенное антропогенное изменение ландшафтов Евразии, связанное с распространением сельского хозяйства, началось около 8 тыс. лет назад. Изобрете-

---

<sup>35</sup> Декларация принята на конференции «Challenges of a Changing Earth: Global Open Science Conference» в июле 2001 г. в Амстердаме участниками четырех международных неправительственных программ: Международной геоферно-биосферной программы (МГБП/IGBP), Международной программы по «человеческим измерениям» глобальных изменений (МПЧИ/IHDP), Всемирной программы исследований климата (ВПИК/WCRP), Международной программы DIVERSITAS по проблеме биоразнообразия (<http://www.igbp.net/documents/amsterdam-declaration.pdf>)

<sup>36</sup> В.И. Вернадский (1988) отмечает, что представление о человеке, как о растущей мощной геологической силе, высказывал геолог академик А.П. Павлов (1854-1929), который говорил о наступлении антропогенной эры. Еще ранее о геологической роли человека и наступлении «царства человека» писали Бюффон (1707-1788) и Л. Агассиц (Агассис) (1807-1873).

<sup>37</sup> В Китае и Европе 5-6 тыс. лет назад во многих местах произошло существенное изменение состава пыльцы, указывающее на замещение природных лесов сельскохозяйственными угодьями; исследование осадков в озерах центральной Европы показывает, что 3-5 тыс. лет назад скорость их накопления стала быстро расти, что указывает на сокращение площади лесов в водосборных бассейнах (Ruddiman, 2003).

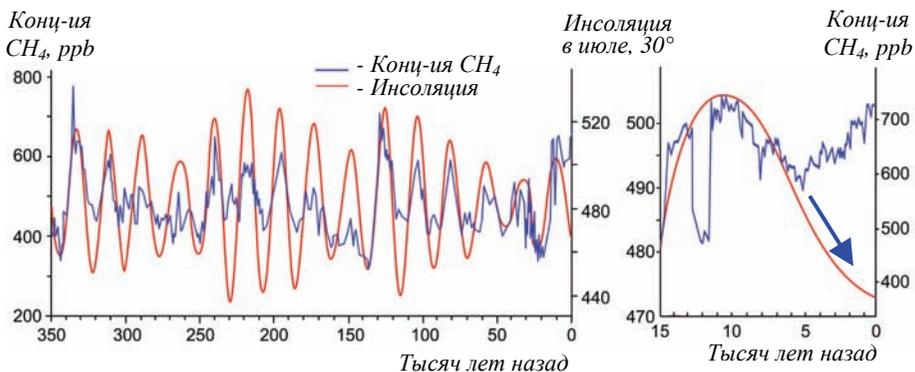


Рис. 50. Изменения концентрации метана и инсоляции последние 350 тыс. лет. Синяя стрелка показывает естественный тренд изменения концентрации  $CH_4$  последние 5 тыс. лет. Шкалы двух графиков не совпадают, так как были использованы данные из разных источников (по Ruddiman, 2003).

ние плуга около 6 тыс. лет назад, освоение технологий выплавки бронзы, а затем железа интенсифицировали этот процесс. Уже 6 тыс. лет назад сельское хозяйство было распространено в центральной и южной Европе повсеместно (рис. 52) Около 5 тыс. лет назад стало распространяться возделывание риса с использованием ирригации. Развитие этих процессов совпадает по времени и может быть одной из причин аномального повышения концентраций  $CO_2$  и  $CH_4$ .

Несмотря на то, что в доиндустриальную эпоху объем ежегодных антропогенных выбросов  $CO_2$  и  $CH_4$  был относительно невелик, их суммарная эмиссия за 7800 лет (320 ГтС) существенно превышает выбросы за 200 лет индустриальной эпохи (160 ГтС). Потепление, вызванное этими ранними эмиссиями парниковых газов составило  $0,8^{\circ}C$  в среднем по Земному шару и  $2^{\circ}C$  в высоких широтах. Этого было достаточно, чтобы остановить следующий цикл оледенения и повернуть тренд климатических изменений в другую сторону (Ruddiman, 2003).

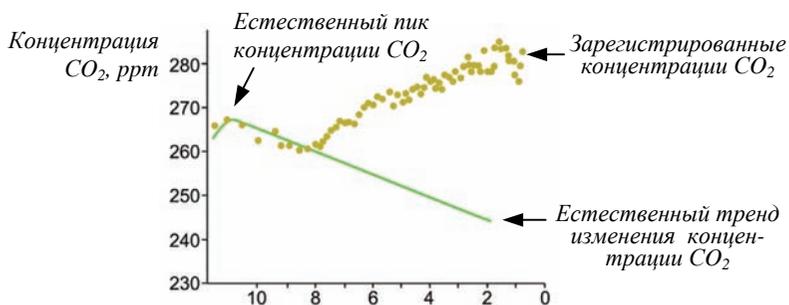
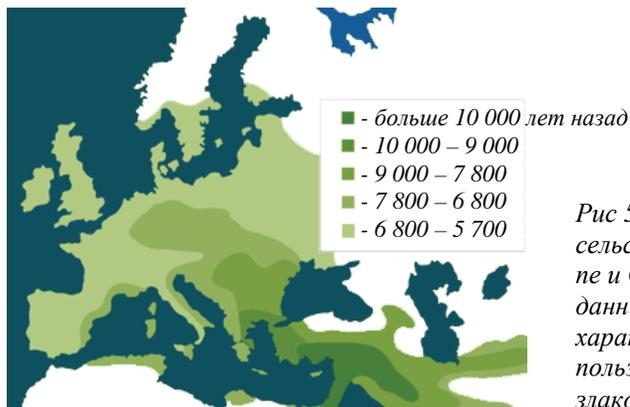


Рис. 51. Естественный тренд изменения концентрации  $CO_2$  и реальные изменения концентрации по данным бурения льда в Антарктиде за 12 тыс. лет (по Ruddiman, 2003).



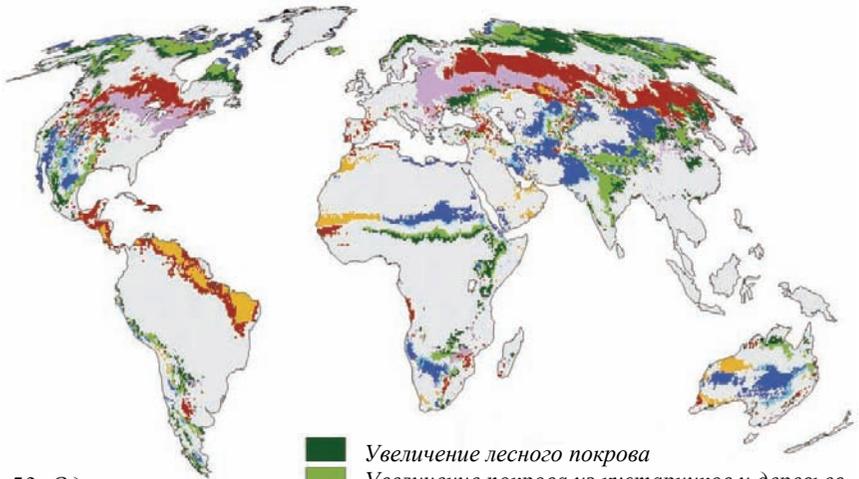
*Рис 52. Распространение сельского хозяйства в Европе и Средиземноморье по данным о первом появлении характерных признаков использования культурных знаков (Ruddiman, 2003).*

### **3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ЭКОСИСТЕМНЫЕ ФУНКЦИИ**

#### **3.1. Изменения площади и границ природных зон**

Сегодня живая природа находится «в тисках» двух мощных факторов – антропогенного давления и климатических изменений. Разрушительные масштабы первого из них кратко обсуждались выше. Особенно опасно то, что антропогенные нарушения экосистем происходят на фоне быстрых климатических изменений, также вызывающих существенные трансформации экосистем. К сегодняшнему дню зафиксировано множество примеров изменений наземных, морских и пресноводных экосистем различных природных зон (Parrу et al., 2007; Secretariat..., 2003). По оценкам МГЭИК (Fischlin et al., 2007) 20-30% видов животных и растений могут оказаться на грани вымирания, если средняя глобальная температура будет на 2-3°C выше доиндустриального уровня. Большинство моделей прогнозирует существенные изменения площади основных типов экосистем и сдвиг природных зон на север в Северном полушарии. Один из примеров показан на рис. 53.

Радикальные трансформации, связанные с переходом нелесных территорий в лесные и наоборот, могут охватить более 10% не занятой сельскохозяйственными полями территории суши. Такой результат для умеренного сценария глобального потепления (меньше 2°C) дают более 40% моделей, а для сценария сильного потепления (выше 3°C) - почти 90% (Fischlin et al., 2007).

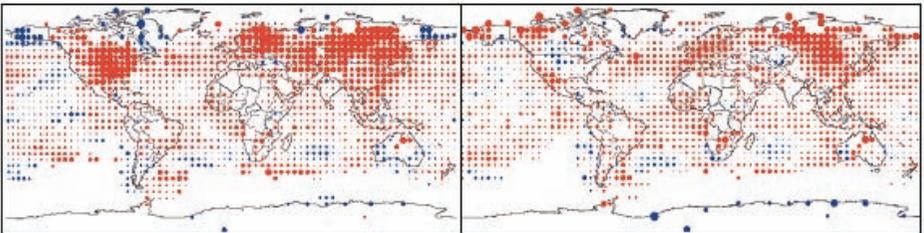


- Увеличение лесного покрова
- Увеличение покрова из кустарников и деревьев
- Увеличения травянистого покрова
- Улучшение условий в пустынях
- Сокращение травянистого покрова
- Сокращение лесного покрова
- Изменение типа леса

Рис. 53. Один из результатов моделирования изменения растительного покрова в ответ на климатические изменения до 2100 г (МГЭИК, 2007).

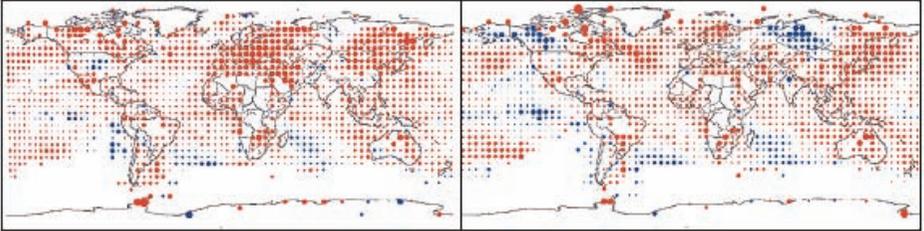
Декабрь, январь, февраль

Март, апрель, май



Июнь, июль, август

Сентябрь, октябрь, ноябрь



-1 -0,8 -0,6 -0,4 -0,2 0 0,2 0,4 0,6 0,8 1 °C за 10 лет

Рис. 54. Изменения сезонных температур с 1976 по 2000 гг. (Soja et al., 2006).

Климатические изменения наиболее сильно ощущаются в северных регионах, в том числе на территории России. Трансформации северных экосистем наиболее сильны. Многочисленные примеры изменений биоценозов, видового состава, характеристик популяций и видов можно найти в публикациях последних лет (см., например: МГЭИК, 2007; Оценочный доклад..., 2008; Callaghan et al., 2004a,b; IPCC, 2002; NEESPI, 2004a; Parry et al., 2007; Post et al., 2009; Secretariat..., 2003; Walther et al., 2002).

Однако именно на севере изменения климата очень неоднородны. По сравнению с серединой прошлого века в одних районах стало теплее, а в других – холоднее (рис. 54). В России на фоне общего увеличения среднегодовых температур происходило снижение зимних температур в ряде районов Сибири и на севере Дальнего Востока (рис. 55, Оценочный доклад..., 2008).

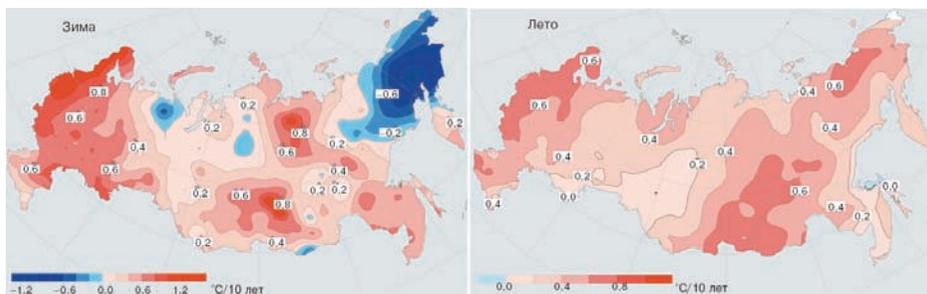


Рис. 55. Средняя скорость изменения температуры приземного воздуха на территории России в зимний и летний сезоны за 1976–2006 гг. (Оценочный доклад..., 2008).

В течение последних десятилетий наблюдается общая тенденция увеличения продуктивности северных экосистем (Ecosystems..., 2005; Nemani et al., 2003; NEESPI, 2004 a). Однако она неоднородна - в одних районах продуктивность растёт, в других – снижается (рис. 56, Vai et al., 2008; Goetz et al., 2007; Nemani et al., 2003; Zhou et al., 2001). Так в тундрах Аляски и в большинстве регионов Евразии продуктивность увеличивалась. Но в Америке более четверти лесов, ранее не нарушенные пожарами, снизили продуктивность, а увеличение продуктивности зарегистрировано только для 4% лесов (Goetz et al., 2007). Сокращение продуктивности экосистем на фоне увеличения температур может объясняться тепловым стрессом и нехваткой воды в летний период (IPCC, 2001a).

В ряде регионов наблюдается смещение границ экосистем. Например, в самом северном в мире древостое – урочище Ары-Мас на Таймыре лиственница проникла в зону тундры, сомкнутость ее древостоя увеличилась, с юга и запада в зону доминирования лиственницы внедрились темнохвойные породы (сосна, ель, пихта) (рис. 57, Оценочный доклад..., 2008; Харук и др., 2004). В горах Южной Сибири и Южного Урала за последние десятилетия верхняя граница леса поднялась на несколько метров выше (Soja et al., 2006).

При сохранении современных тенденций изменений климата к 2080 г. около

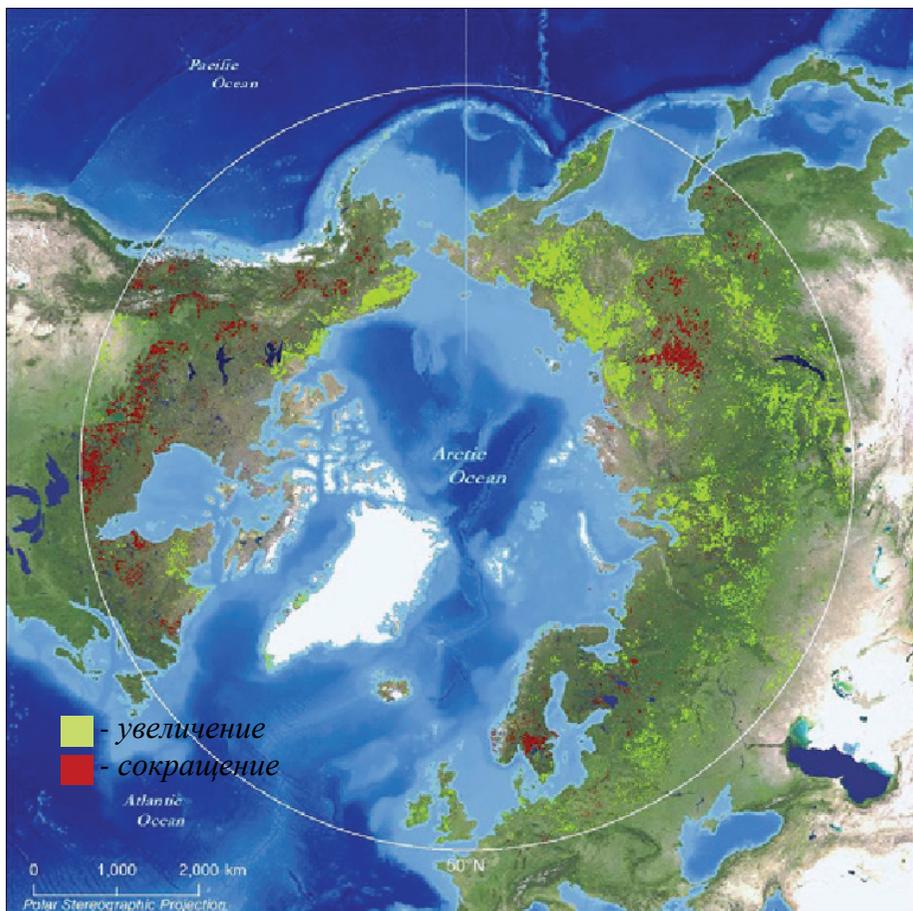


Рис. 56. Изменения фотосинтетической активности по космическим данным (GIMMS-G AVHRR) с 1982 по 2005 гг. (Goetz et al., 2007)

18% современной площади тундры и полярных пустынь будут замещены другими типами растительности. В Канадской Арктике к 2100 г. тундровые сообщества карликовых кустарничков будут замещены высокими кустарниками. В Евразии тундра на 10-35% будет замещена тайгой (Callaghan et al., 2004 с).

По прогнозам Росгидромета, на территории России к середине XXI века следует ожидать существенного потепления, особенно зимой на севере. Годовая сумма осадков уменьшится на юге Европейской территории и Сибири и увеличится в восточной Сибири при их более редкой повторяемости (рис. 58, Оценочный доклад..., 2008).

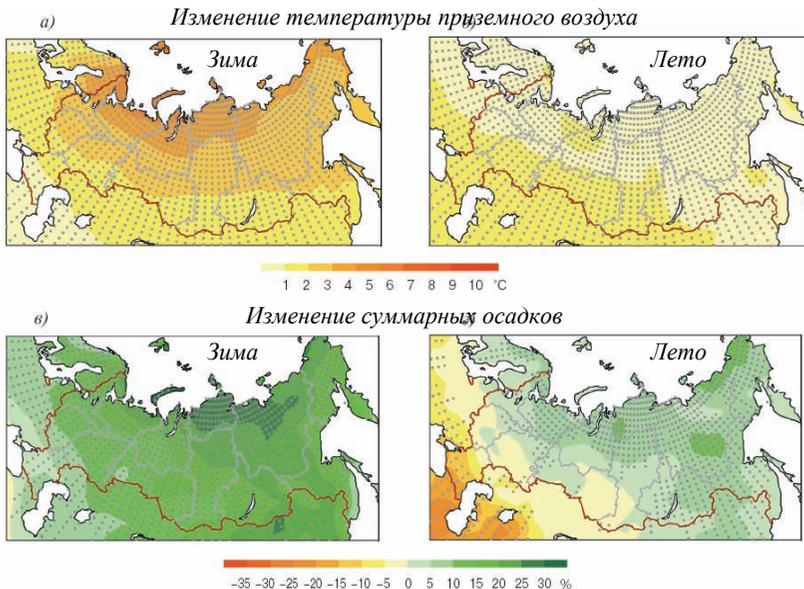
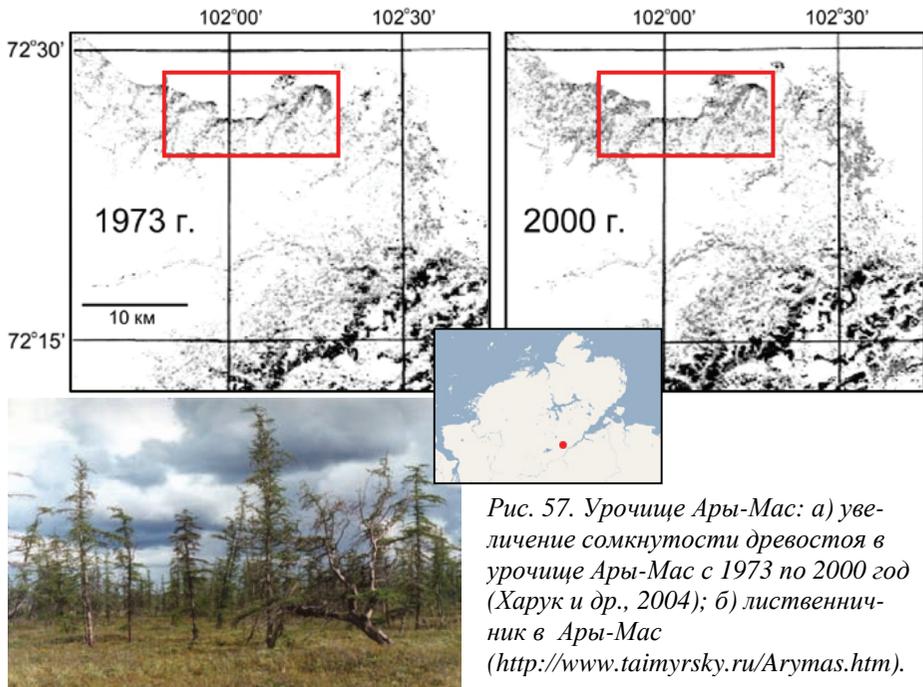
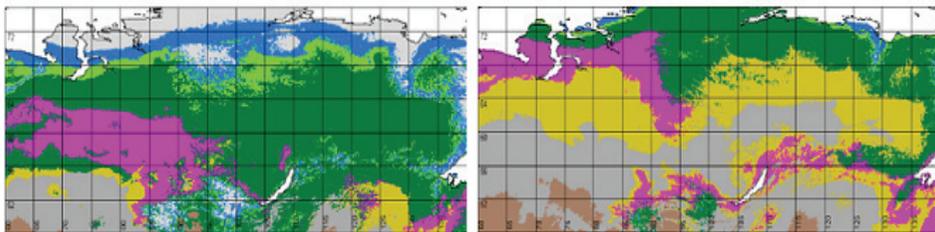


Рис. 58. Прогноз изменения температуры воздуха и осадков к середине XXI в. в процентах по отношению к их значениям в соответствующее время года за период 1980–1999 гг. на территории России (Оценочный доклад..., 2008).



- водоемы
- тундра
- лесотундра
- темнохвойная тайга
- светлохвойная тайга
- лесостепь
- степь
- полупустыня
- полярная пустыня

Рис. 59. Прогноз изменения растительности в Сибири к 2090 г при реализации климатического сценария HadCM3GGa1 (Vygodskaja et al., 2007).

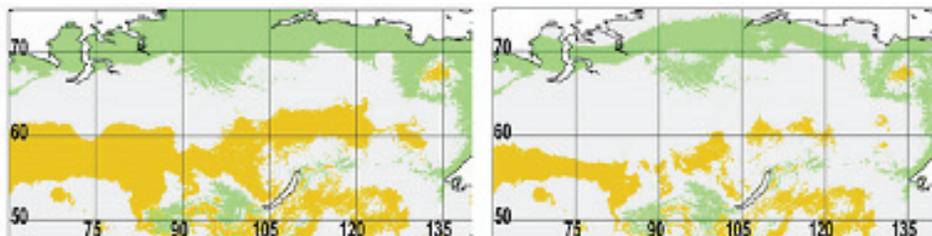
В Сибири к 2090 г в условиях более теплого климата площадь лесов может сократиться в два раза. Южная граница леса сдвинется к северу на несколько сотен км, площадь степной зоны увеличится (рис. 59, Оценочный доклад..., 2008; Soja et al., 2006). Даже при реализации сценария умеренного потепления смена типов экосистем произойдет на значительных территориях, при реализации сценария сильного потепления – на большей части территории, границы природных зон сдвинутся на 600-1000 км, доминировать будут степи, на юге Сибири возникнет опасность опустынивания (Tchebakova et al., 2009).

На Европейской территории России при условии гумидного потепления зона лесов может увеличиться как на север, так и на юг (Оценочный доклад..., 2008)

В условиях климатических изменений сильное влияние на дальнейший ход изменения лесов будут оказывать их естественные и антропогенные нарушения, среди которых наиболее важны пожары и повреждения насекомыми (МГЭИК,

Сценарий HadCM3 A1F1

Сценарий HadCM3 B1



- сокращение лесных экосистем
- распространение лесных экосистем

Рис. 60. Изменения растительности Сибири к 2080 при реализации разных климатических сценариев: HadCM3A1F1 - потепление на 8-9°C и HadCM3 B1 - потепление на 4-5°C (Tchebakova et al., 2009).

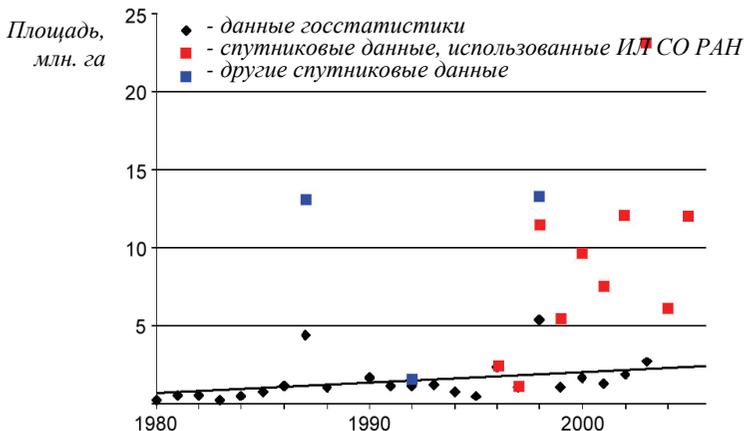


Рис. 61. Площадь сгоревших лесов в России (Soja et al., 2006).

2007). Пожары - доминирующий экологический фактор в северных лесах, определяющий мозаику сукцессионных стадий, возрастную структуру лесов и их видовое разнообразие. В течение последних 20 лет площадь сгоревших лесов в России увеличивалась (рис. 61), причем анализ космических снимков, проведенный ИЛ им. Сукачева СО РАН, показал, что в Сибири площадь сгоревших лесов в несколько раз превышает данные госстатистики (Soja et al., 2006). В Сибири и на Дальнем Востоке процент гарей в лесном фонде в 2-3 раза выше, чем в районах, где имеется охрана лесов (рис. 62, Исаев и др., 2006).

Увеличение частоты лесных пожаров в связи с климатическими изменениями предсказывают многие модели, один из результатов моделирования показан на

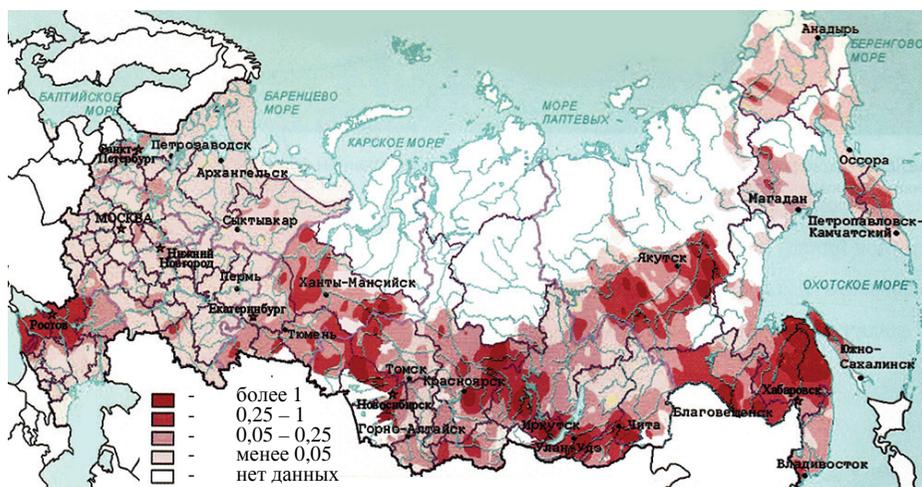


Рис. 62. Процент лесных земель, пройденных пожарами за 1987–2000 гг. (Исаев и др., 2006).

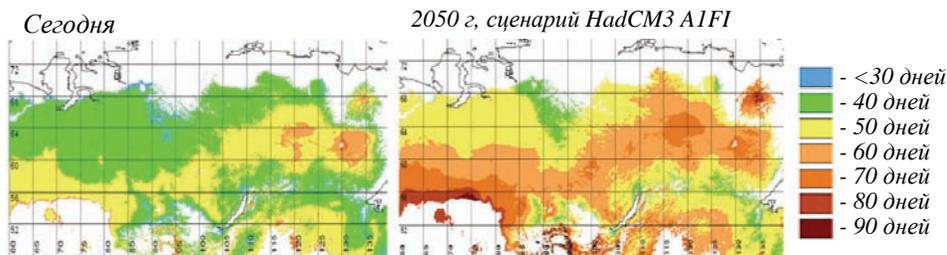


Рис. 63. Прогноз числа дней высокой пожарной опасности в Сибири в 2050 г. для сценариев сильного и умеренного потепления. Сценарий HadCM3 A1FI – потепление к 2080 г на 8-9 °С, сценарий HadCM3 B1 – потепление на 4-5°С (Soja et al., 2007).

рис. 63 (Soja et al., 2006). При реализации сценария увеличения глобальной температуры на 1 °С рост площади, пройденной лесными пожарами, составит 12-16%, при повышении средней глобальной температур на 2 °С – в два раза больше. Если также учесть вероятное усиление грозовой деятельности, то число и площадь пожаров могут вырасти в 1,5 – 2 раза (Коровин и др., 2003).

Кроме того, климатические изменения будут влиять на состояние популяций видов - вредителей леса и различных патогенных организмов, вызывающих болезни деревьев. Это может привести к росту числа и интенсивности вспышек насекомых-вредителей и распространению болезней леса.

В целом, изменение режима природных и антропогенных нарушений – важнейший фактор, который будет определять направления изменения экосистем.

### 3.2. Изменения экосистемных функций по регуляции углеродного цикла

В течение последних десятилетий экосистемы суши выполняли роль небольшого чистого поглотителя CO<sub>2</sub> (МГЭИК, 2000). Сегодня экосистемы суши северного полушария являются стоком около 1,4 Гт углерода в год (Canadell, 2002). При этом бореальные и умеренные экосистемы поглощают углерод, а тропики, скорее всего, нейтральны или являются его источником (Canadell et al., 2007a). Эти различия объясняются не только влиянием климата, но и тем, что в умеренном поясе происходит зарастание ранее распаханых полей и увеличение площади леса, а в тропиках ускоряется сведение лесов (Canadell, 2002).

С 1981 по 2003 г. суммарный глобальный показатель активности фотосинтеза на суше вырос на 3,8% (рис. 64, Vai et al., 2008). Поглощение углерода экосистемами за последние 40 лет также немного увеличилось (рис. 65, Le Quere et al., 2009). Это можно объяснить ростом средних температур и увеличением осадков во многих регионах планеты, эффектом от «удобрения» атмосферы растущим

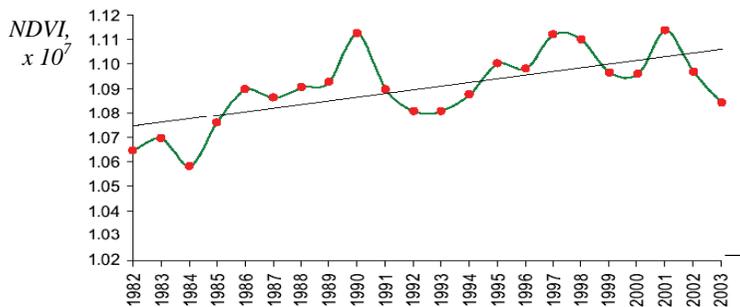


Рис.64 . Динамика суммарного глобального показателя NDVI ( $\times 10^7$ )(Bai et al, 2008).

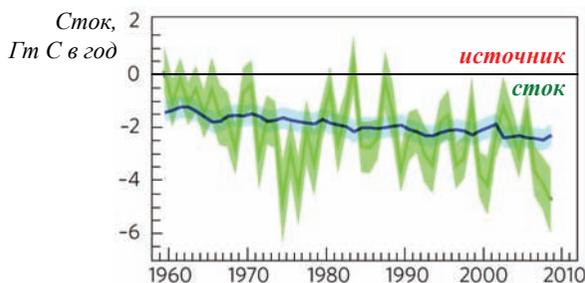


Рис. 65. Поглощение  $\text{CO}_2$  экосистемам суши (зеленое) и океана (синее); отрицательные значения – поглощение (Le Quere et al., 2009).

количеством  $\text{CO}_2$ <sup>38</sup>, а также увеличением площади лесов в умеренном поясе. С 1980–х гг. наземные экосистемы и океан поглотили около половины антропогенных выбросов (МГЭИК, 2007). В 2000–2006 гг. экосистемы поглощали около 54% антропогенной эмиссии. (Canadell et al., 2007 б).

Однако объемы антропогенной эмиссии растут быстрее, чем скорость поглощения углерода экосистемами, в атмосфере остается все больше  $\text{CO}_2$ . Относительная способность экосистем (как наземных, так и морских) поглощать углерод снижается (рис. 65; Le Quere et al., 2009). С 1959 по 2006 гг. поглощение  $\text{CO}_2$  океаном и экосистемами суши относительно объемов эмиссии уменьшалось в год в среднем на 0,25%. Сегодня способность экосистем поглощать растущие антропогенные выбросы  $\text{CO}_2$ , вероятно, близка к пределу и при нынешнем состоянии экосистем ее дальнейший рост маловероятен (Canadell et al., 2007б).

Биосферная функция по регуляции круговорота углерода существенно ослаблена человеком, кроме того, в некоторых регионах начинает сказываться сокращение продуктивности экосистем из-за быстрых изменений климата. Происходит расширение территорий, где активность фотосинтеза устойчиво снижается (рис. 66). Если в 1991 г. снижение биологической продуктивности было зарегистрировано на 15% территории суши, то в начале 2000-х гг. - уже на 24%, при-

<sup>38</sup> Продуктивность растений увеличивается при повышении концентрации в воздухе  $\text{CO}_2$  до определенного предела (у разных растений он различен).

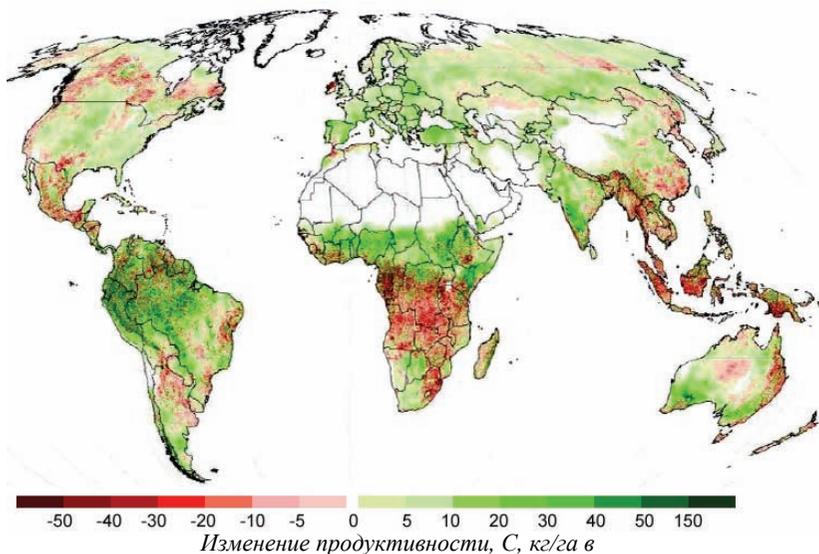


Рис. 66. Изменение продуктивности наземных экосистем с 1981 по 2003 гг. (Bai et al., 2008).

чем наиболее сильное снижение продуктивности наблюдалось в следующих регионах: Африка к югу от экватора; Юго-Восточная Азия (Индокитай и Малайский архипелаг); южная часть Китая; север и центр Австралии; зона травянистых сообществ Южной Америки; отдельные районы бореальных лесов Северной Америки и Сибири (Bai et al., 2008). Однако пока обрабатывались эти данные картина успела измениться и к этому списку, видимо, следует прибавить Амазонию, где сильнейшая засуха 2005 г. привела к превращению тропических лесов этого региона из поглотителей углерода в его источник (Phillips et al., 2009).

Для оценки изменений регуляторных функций экосистем важным показателем может служить способность экосистем эффективно использовать имеющиеся климатические ресурсы. Индекс эффективности использования суммарных температур (величина фотосинтетической продукции, приходящаяся на один градус суммы годовых температур) наиболее сильно снизился в бореальной зоне (рис.67 а), что говорит о том, что северные экосистемы не могут приспособиться к быстрому росту температур (их продукция не растет или растет непропорционально медленно). Индекс эффективности использования осадков (величина продукции на единицу выпавших осадков) снизился на значительных площадях как в тропической, так и в бореальной зоне (рис. 67 б). Если исключить территории, где были сильные засухи, то, по мнению авторов, эти данные свидетельствуют о деградации самих экосистем, вызванной антропогенными нарушениями, обширными пожарами или другими факторами. Площадь таких территорий достаточно велика и они, в общем, совпадают с регионами, где зарегистрировано наиболее сильное снижение продуктивности (рис. 66)

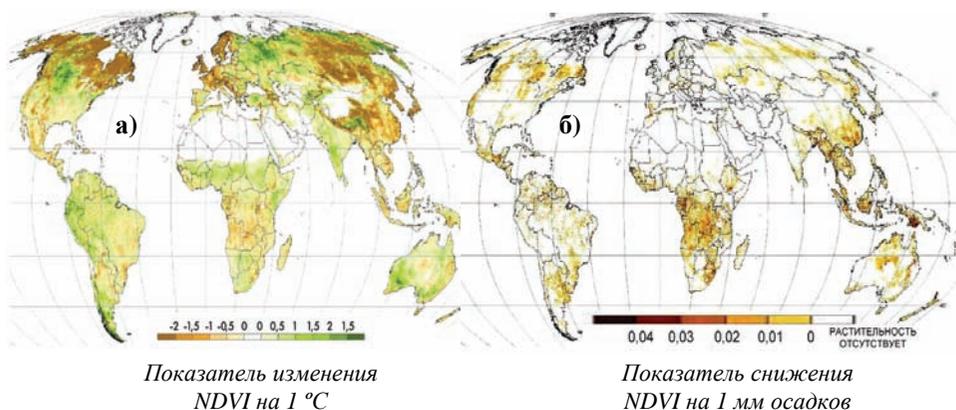


Рис.67. Территории, где с 1981 по 2003 гг. наблюдалось снижение эффективности использования климатических ресурсов: а) изменение NDVI на 1 градус суммарных годовых температур; б) снижение NDVI на 1 мм осадков (Bai et al., 2008).

Таким образом, можно сделать следующие общие выводы:

- суммарная регуляторная функция наземных экосистем противодействует росту концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, о чем говорит зарегистрированный рост фотосинтетической продукции, но ее мощности уже недостаточно для того, чтобы остановить рост концентрации  $\text{CO}_2$  (МГЭИК, 2007);
- мощность регуляторных функций экосистем на значительных территориях снижена из-за их антропогенной деградации или климатических изменений.

Дальнейшее изменение биосферной функции регуляции углеродного цикла зависит от соотношения противоположных процессов: с одной стороны - интенсификации разложения органики в почвах, торфе и мерзлоте и роста эмиссии  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в атмосферу из экосистем, и, с другой стороны - увеличения продуктивности экосистем и роста поглощения ими  $\text{CO}_2$  из атмосферы. Как будет изменяться соотношение этих процессов в будущем - неизвестно.

Именующиеся модели дают разные прогнозы (см. ниже, п. 4.1), но можно считать, что средняя оценка состоит в том, что экосистемы суши к концу века будут действовать как слабый сток углерода, но относительное значение этой функции будет ослабевать по мере накопления  $\text{CO}_2$  в атмосфере (Friedlingstein et al., 2006). Запасы углерода в наземной биосфере вырастут, но способность поглощать углерод из атмосферы сильно снизится (Lucht et al., 2006). При этом наибольший рост запасов углерода прогнозируется в северных регионах с достаточным увлажнением, а его наибольшие потери следует ожидать в регионах, где потепление будет сопровождаться иссушением климата (рис. 68) Lucht et al., 2006). Как видно из рисунка, на территорию России попадают обе эти зоны.

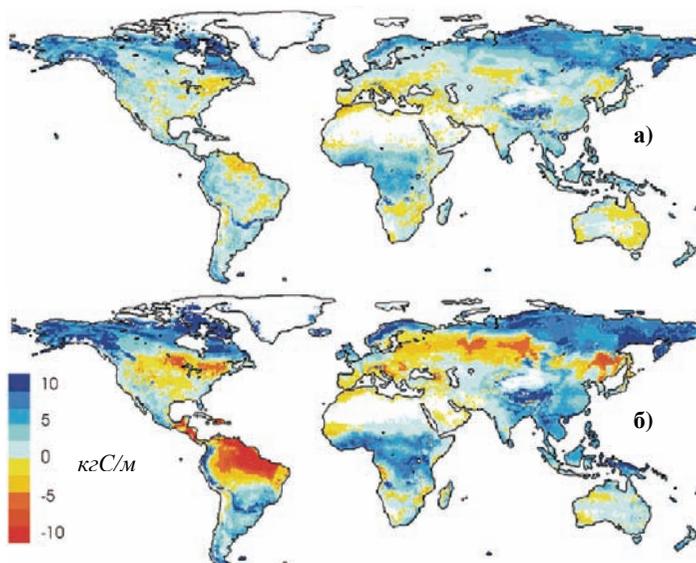


Рис. 68. Прогноз изменений запасов углерода в наземных экосистемах (в биомассе и почве) с 2000 по 2100 гг. для сценариев умеренного(а) и сильного(б) потепления (Lucht et al., 2006).

#### ИЗМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ СЕВЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО РЕГУЛЯЦИИ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА

Высокие широты в 1980 – 1990 годах в целом были стоком углерода, причем наибольший сток был в Евразии (NEESPI, 2004b). Леса севернее 30 параллели поглощали в среднем 0.68 Гт углерода в год (70% этого стока приходилось на Евразию). Запасы углерода в биомассе выросли в бореальных лесах Евразии и умеренных лесах Северной Америки, но сократились в бореальных лесах Канады. Также небольшое снижение запасов углерода отмечено в северной части Восточной Сибири (Muneri et al., 2001) (рис. 69). Однако одновременно с увеличением запасов углерода в биомассе, вероятно, произошло уменьшение его запасов в почвах, обусловленное интенсификацией разложения органики. По оценке E. Euskirchen et al. (2006), в умеренных и северных экосистемах с 1976 по 2000 г количество углерода в биомассе увеличилось на 3.6 г, а в почве уменьшилось на 3.2 г/кв.м в год, то есть суммарное содержание выросло лишь на 0,3 г.

В **лесных экосистемах** при продолжении современных тенденций климатических изменений можно ожидать развития разнонаправленных процессов в различных регионах. Так, в средней полосе Русской равнины на юге лесной зоны будет происходить деградация лесов и эмиссия больших количеств углерода, в то время как смешанные и южнотаежные типы леса могут увеличивать запасы углерода (Розенберг, Коломыц, 2007).

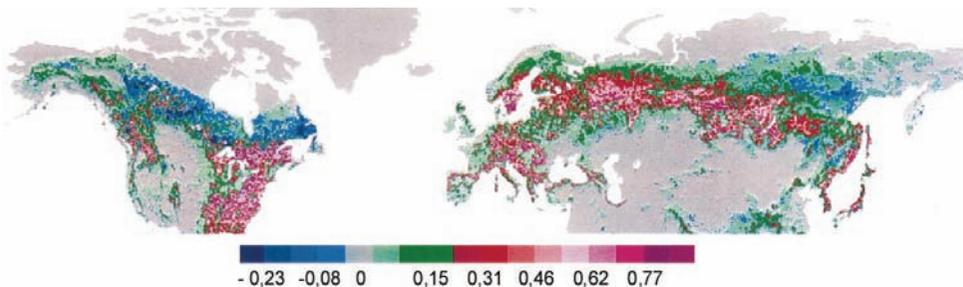


Рис.69. Изменения запаса углерода в биомассе бореальных и умеренных лесов северного полушария в период с начала 1980-х до конца 1990-х гг.(Myneni et al; 2001)

Выделение углерода из-за интенсификации гетеротрофного дыхания в сообществах и роста интенсивности их нарушений пожарами и насекомыми (см. п. 2.3) может превысить рост первичной продуктивности в результате потепления (IPCC, 2001a).

Для северных **болот** в условиях повышения среднегодовых температур при сохранении режима увлажнения прогнозируется усиление поглощения CO<sub>2</sub> и увеличение эмиссии CH<sub>4</sub> (Ecosystems..., 2005). При этом выделение метана из болот может стать сопоставимым с его антропогенной эмиссией (Gedney et al., 2004). Однако, как было отмечено ранее (п. 1.2.2), для процесса захоронения углерода в почвах и торфе более важным, чем температура, фактором является увлажнение. Поэтому, если повышение температуры будет сопровождаться снижением уровня воды, болота могут превратиться из поглотителей в источники CO<sub>2</sub>. Это подтверждают, например, результаты моделирования потока углерода между болотом Старосельский мох (Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник) и атмосферой (рис. 70, Kurbatova et al., 2009). Учитывая огромные запасы углерода в болотах, их переключение с поглощения углерода на его выделение может оказать существенное влияние на дальнейший ход климатических изменений.

Ключевую роль в определении будущего климатического сценария играют экосистемы Арктики и зоны многолетней **мерзлоты**. С одной стороны, они наиболее чувствительны к изменениям климата, а с другой, имея огромные запасы углерода в мерзлоте, сами оказывают сильное обратное влияние на климат.

Нынешний статус арктических экосистем – являются они стоками или источниками углерода – непонятен. Измерения (наземные и со спутников) показывают, что арктические экосистемы являются небольшими источниками углерода, но многие модели говорят, что они играют роль стоков (Ecosystems..., 2005). Одни исследователи считают, что сегодня полярный регион имеет примерно нулевой баланс по CO<sub>2</sub>, а другие - что Арктика поглощает углерод, но при этом оказывает нагревающее воздействие на климат из-за выделения метана (Callaghan et al., 2004 b,c).



Рис. 70. Результаты моделирования изменения потока углерода между экосистемой болота и атмосферой (положительные значения – выделение углерода, отрицательные – поглощение). Поток углерода определяется разницей между первичной продукцией и дыханием сообщества. За основу взяты данные 1999 года, когда болото Старосельский мох (ЦЛГЗ) было источником  $\text{CO}_2$  (Kurbatova et al., 2009, с изменениями).

Тем более не понятно, какова будет климатическая роль Арктики в будущем. Между тем, здесь происходят довольно быстрые изменения природной среды.

Во многих районах наблюдается деградация мерзлоты. С 1956 до 1990 г. активный слой<sup>39</sup> в зоне мерзлоты в среднем вырос на 20 см (МГЭИК, 2007). В России в конце XX в. на многих участках происходило увеличение температуры многолетней мерзлоты и глубины протаивания (Оценочный доклад..., 2008). В Сибири за последние 30 лет произошло смещение зоны активной деградации мерзлоты в восточном направлении – «заозерность» Западной Сибири сократилась, а Восточной Сибири – выросла (Шахова, Семилетов, 2008). В то же время, состояние мерзлоты в Восточном секторе Арктики можно считать пока стабильным (Гиличинский и др., 2008).

В случае реализации сценария потепления в северных регионах к середине XXI века температура поверхности грунтов может повысится на 0,9-2,3 °С, глубина сезонного протаивания - увеличиться на 15-33%. Южная граница многолетней мерзлоты на равнинах и плоскогорьях отступит к северу на 50-600 км (рис. 71, Павлов, Гравис, 2000; Shkolnik et al., 2010).

При деградации мерзлоты возрастает выделение не только  $\text{CO}_2$ , но и метана, который, как сказано выше, оказывает в ближайшей перспективе более сильное

<sup>39</sup> Активный слой – поверхностный слой толщиной от нескольких сантиметров до нескольких метров, который оттаивает летом и вновь замерзает зимой.

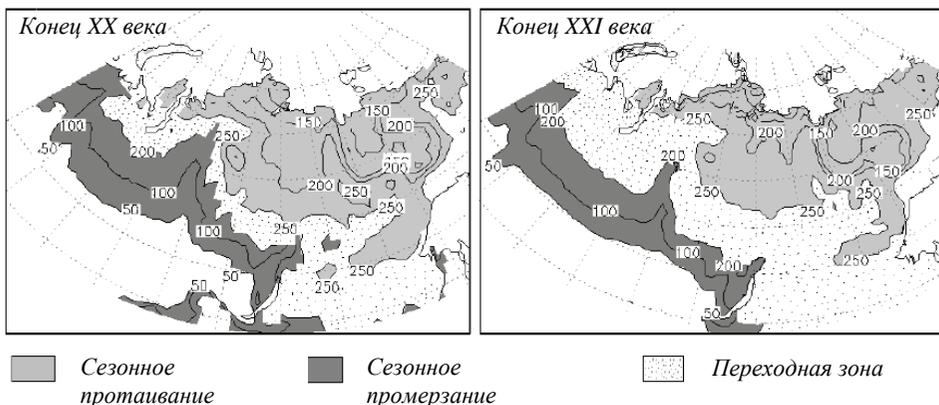


Рис.71. Прогноз изменения глубины протаивания и промерзания (см) к концу XXI века (2091–2100) (Shkolnik et al., 2010).

влияние на парниковый эффект. Растущее выделение метана обусловлено тем, что во многих местах деградация мерзлоты идет через образование мелководных озер и болот, имеющих мощную зону абиотического разложения прежде замороженной органики. Особенное внимание исследователей в последнее время привлекло пузырьковое выделение метана из арктических озер, которое может составлять 15 до 35 Мт в год (рис. 72, Walter et al., 2007).

Для потоков метана характерна очень высокая изменчивость во времени и в пространстве, поэтому диапазон оценок его эмиссии довольно широк. Совре-



Рис. 72. Выделение метана из арктических озер: а) вмерзшие в лед пузырьки метана; б) Katey Walter поджигает пузырьки, чтобы продемонстрировать, что там находится метан (фотографии S. Zimov и K. Walter с сайтов [www.sciencedaily.com](http://www.sciencedaily.com) и [www.livescience.com](http://www.livescience.com)).

менная эмиссия метана из тундровых почв составляет от 17 до 42 Мт в год (Wagner, 2009), эмиссия экосистемами севернее 45 широты – 51 Мт, из которых на долю России приходится 64%, т. е. 32 Мт (Zhuang et al., 2004). Российские исследователи оценивают эмиссию метана с поверхности криолитозоны России от 20 до 33 Мт в год (Оценочный доклад..., 2008; Anisimov Reneva, 2006).

Сегодня эти объемы составляют несколько процентов от суммарной эмиссии метана<sup>40</sup>, но в результате таяния вечной мерзлоты выделение метана может существенно возрасти. В случае продолжения повышения температуры рост эмиссии метана на широтах выше 60° с.ш. может составить 19-25% (Wagner, Liebner, 2009) Ежегодная эмиссия метана из вечной мерзлоты России к середине XXI в. может вырасти на 20-40%, при этом самый сильный рост - до 50% - ожидается в Восточной Сибири и на Арктическом побережье, где запасы углерода относительно невелики, а в Западной Сибири, где сосредоточены основные запасы, эмиссия вырастет лишь на 10-15% (рис. 73). Дополнительное выделение углерода из мерзлоты составит 6-10 Мт в год.(Anisimov, 2007; Anisimov, Reneva, 2006), что не приведет к заметному воздействию на глобальный климат – если другие источники метана будут неизменными (Anisimov, 2007).

Направление изменения эмиссии метана при деградации мерзлоты будет определяться местными гидрологическими условиями - улучшение дренажа почвы будет уменьшать эмиссию метана и увеличивать эмиссию CO<sub>2</sub>, а подъем уровня воды будет иметь обратный эффект (Callaghan et al., 2004 с).

Как отмечалось выше, одновременно с интенсификацией разложения органики климатические изменения вызывают и противоположный ответ экосистем - усиление фотосинтеза и поглощения углерода. Ряд моделей прогнозируют, что в

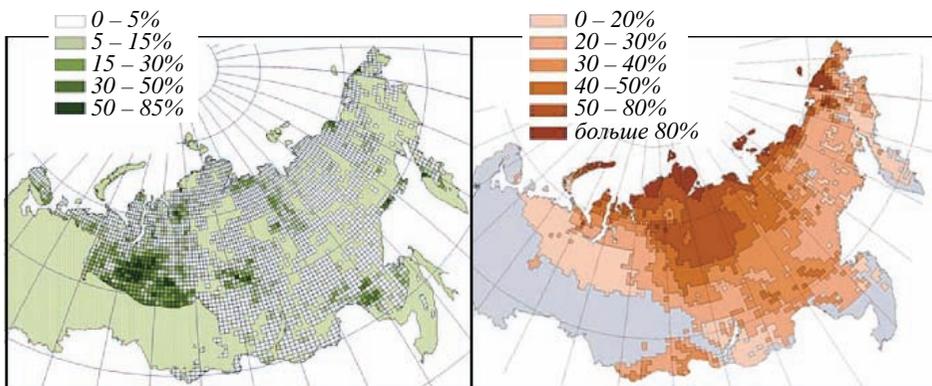


Рис. 73. Болота в зоне многолетней мерзлоты России: а) процент территории, занятой болотами; б) прогнозируемое изменение потоков метана из сезонно оттаивающих болот к середине XXI века при реализации климатического сценария GFDL (Anisimov, Reneva, 2006).

<sup>40</sup> Суммарная эмиссия метана в 2000-2004 гг. составляла 582 Мт в год (Solomon et al., 2007),

некоторых регионах Арктики рост фотосинтеза и поглощения  $\text{CO}_2$  будет опережать рост дыхания сообществ, что в результате даст небольшой сток углерода (Callaghan et al., 2004 c; Chapin et al., 2008).

### 3.3. Прогноз изменения биогеофизических климаторегулирующих функций экосистем

Масштабные изменения площади и расположения экосистем вызовут существенное изменение их биогеофизических функций, в первую очередь – изменения альбедо и регуляции водного цикла. Сила воздействия на климат этих эффектов сопоставима с эффектами от изменений углеродного цикла (Field et al., 2007; Bala et al., 2007). Например, одна из моделей глобального замещения всей современной растительности лесами показывает, что при этом суммарный «нагревающий» эффект от изменения альбедо и эвапотранспирации<sup>41</sup> существенно снижает ожидаемый «охлаждающий» эффект от поглощения углерода («нагревающий» эффект соответствует потеплению на 1,3 °C, то есть 60% эффекта от удвоения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере). И, напротив, глобальное замещение существующей растительности травами даст «охлаждающий» эффект, так как изменения альбедо будут воздействовать на климат сильнее, чем выделение углерода (Bala et al., 2007; Gibbard et al., 2005). Другая модель показывает, что при увеличении площади лесов в ответ на «удобрение» атмосферы дополнительным количеством  $\text{CO}_2$  через 430 лет поглощение углерода растущими лесами даст «охлаждающий» эффект в 1,2°K, а снижение альбедо – «нагревающий» эффект в 0,65°K, но биогеохимический эффект со временем будет снижаться из-за перехода к равновесию потоков между суши, океаном и атмосферой, а биогеофизический эффект будет оставаться и при временном горизонте в 100 лет окажется сильнее (Bala et al., 2006)

Как уже говорилось выше (п. 1.5), граница тундра-лес (возможно, самая обширная граница между биомы на Земле) оказывает сильное влияние на климат. Сокращение снежного периода и продвижение на север кустарниковой и древесной растительности приведет к существенному снижению альбедо в арктическом регионе (Callaghan et al., 2004 c), причем «нагревающий» эффект от снижения альбедо может превышать «охлаждающий» эффект от роста поглощения  $\text{CO}_2$  при развитии растительности. Трансформация всей зоны тундры в лес может дать поглощение 21 ГтC в биомассе, но эффект от снижения альбедо при этом будет эквивалентен выделению 32 Гт углерода (без учета выделения парниковых газов при таянии мерзлоты) (Field et al., 2007).

Многие модели прогнозируют, что изменения площади лесов на севере и в тропиках будут по-разному воздействовать на климат. При увеличении площади лесов на севере «нагревающий» эффект от снижения альбедо может быть более сильным, чем «охлаждающий» эффект от увеличения поглощения ими  $\text{CO}_2$ ; в

---

<sup>41</sup> В этой модели «нагревающий» эффект от снижения альбедо при увеличении площади лесов оказался сильнее «охлаждающего» эффекта от увеличения эвапотранспирации.

тропиках же ожидается преобладание «охлаждающего» эффекта от увеличения испарения влаги, который усилит эффект от поглощения ими углерода (Charin et al., 2008; Field et al., 2007).

Однако не очевидно, что площадь лесов в умеренной и бореальной зонах будет расти. Если учесть их возможную деградацию в южной части лесной зоны, площадь лесов может уменьшиться (см. п. 3.1), а альbedo региона при этом возрастет (рис. 74, Vygot'skaya et al., 2007).

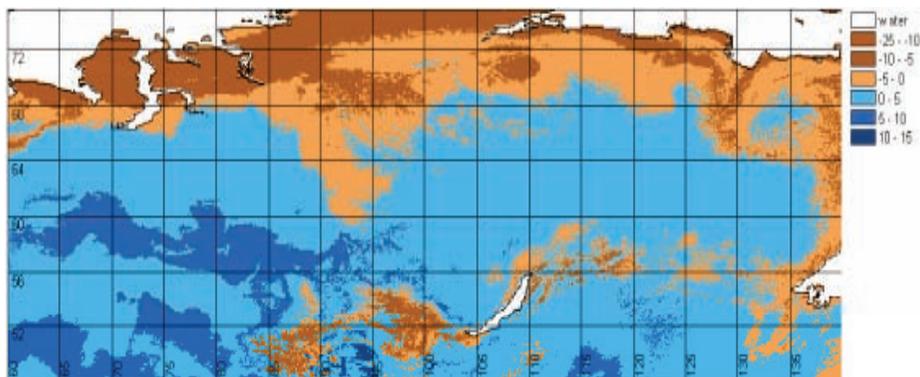


Рис. 74. Прогнозируемые изменения альbedo в Сибири к 2090 г, вызванные изменениями в растительном покрове (Vygot'skaya et al., 2007).

При таких масштабных трансформациях экосистем существенно изменится водный цикл континентальной части Северной Евразии. На большей части территории России прогнозируется увеличение осадков (Оценочный доклад, 2008), однако сокращение площади лесов и распространению лесостепной и степной зон (см. п. 3.1) будет способствовать их снижению. Дegradация мерзлоты в условиях усиления дренажа и снижения осадков может привести к иссушению и даже опустыниванию (Callaghan et al., 2004 c). Ожидается уменьшение влагосодержания почв в весенне-летний период и формирование более засушливых условий практически на всей Европейской территории России. Несмотря на то, что в следующие 30 лет возобновляемые водные ресурсы в целом по стране могут увеличиться на 8-10%, в ряде густонаселенных регионов, где они и сегодня уже ограничены, они уменьшатся на 5-15%, в то время как нагрузка на них вырастет (Оценочный доклад, 2008). В этих условиях сохранение природных экосистем приобретает критически важное значение для поддержания водных ресурсов страны<sup>42</sup>.

<sup>42</sup> Кроме того, изменения гидрологического цикла Северной Евразии вызовут изменения переноса пресной воды и термогалинной циркуляции в Мировом Океане, что в свою очередь будет оказывать влияние на климатическую систему (NEESPI, 2004a)

## 4. ЭКОСИСТЕМНАЯ СТРАТЕГИЯ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОГО ЗНАНИЯ

### 4.1. «Ключевые неопределенности» в знаниях о климатической системе и принцип предосторожности

Несмотря на интенсивные исследования, в понимании климатической системы Земли сохраняются существенные пробелы. МГЭИК (Solomon et al., 2007) признает, что «ключевыми неопределенностями» остаются вопросы, связанные с современной ролью и прогнозом изменения таких важнейших физико-химических блоков климатической системы как облака, аэрозоли, криосфера, океаническая циркуляция и др. Климатическая роль экосистем и ее возможные изменения также находятся в числе основных неопределенностей.

Единого мнения о балансе основных факторов формирования климата Земли до сих пор нет. Эксперты МГЭИК в 4-м докладе (МГЭИК, 2007) повысили по сравнению с 3-м докладом вероятность того, что основной причиной современных изменений климата является антропогенное увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере. Этот вывод принят также в Оценочном докладе Росгидромета (2008). Но имеется немало противников этой концепции (Кондратьев и др., 2001).

Однако не зависимо от того, как будет решен спор климатологов о ведущих факторах современных изменений климата, очевидно, что функции экосистем являются важнейшим блоком климатической системы и их масштабные нарушения оказывают сильнейшее влияние на сценарий климатических изменений в будущем.

Принципиально важным вопросом для выработки климатической стратегии является соотношение силы эффектов от антропогенных выбросов парниковых газов и изменения климаторегулирующих функций экосистем. Одна из попыток оценить это соотношение на основе моделирования показала, что возможные эффекты от изменения экосистемных функций имеют разнонаправленное действие и их предполагаемая сумма существенно ниже воздействия на климат растущих антропогенных выбросов (рис. 75, Field et al., 2007).

Однако при сравнении антропогенных и экосистемных климатических факторов надо учитывать очень сильную разницу в степени их изученности. Сегодня более или менее точную количественную оценку можно дать только промышленным выбросам парниковых газов. Антропогенная эмиссия углерода в результате землепользования уже является одной из основных неопределенностей (МГЭИК, 2007). Климаторегулирующие функции экосистем изучены еще менее полно. Имеются большие пробелы даже в наиболее изученной части системы «биота - климат» – в углеродном цикле. Как отмечают многие специалисты, имеющаяся сегодня глобальная сеть сбора данных об углеродном цикле недостаточна для формирования надежного прогноза (Scholes et al., 2009). Многие важные факторы изменения «углеродной» функции экосистем еще не иссле-

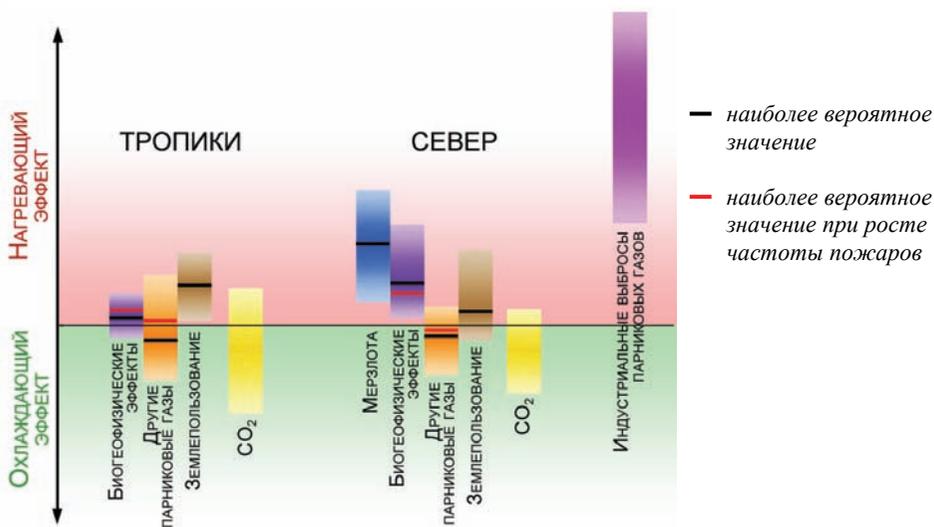


Рис. 75. Сравнение прогнозируемого воздействия на климат промышленных выбросов парниковых газов и экосистем с учетом возможных изменений их функций (Field et al., 2007).

дованы. Например, для прогнозирования изменения роли почвы, которая является ключевым фактором в цикле углерода, надо изучать обратные связи не только между почвой и атмосферой, но и внутри почвы – между различными группами микроорганизмов, растениями и животными. Не зная этих связей, предсказать изменения цикла углерода нельзя (Bardgett et al., 2008). Кроме того, многие уже известные обратные связи внутри системы «биота - климат» пока не учитываются в интегральных климатических моделях (Chapin et al., 2009). Пример трех важных процессов в почве, которые пока не учитываются в климатических моделях, показан рис. 76 (Heinmann, Reichstein, 2008):

- повышение активности микробного метаболизма при протаивании вечномерзлых почв может привести к ее дополнительному нагреванию и дополнительному увеличению эмиссии углерода в атмосферу;
- усиление роста корней растений при росте температур и выделение ими в почву органических веществ увеличивают число бактерий, питающихся этими веществами и активизирует их деятельность по разложению органических веществ, ранее остававшихся стабильными; что ведет к дополнительному усилению выделения в атмосферу углерода;
- рост первичной продукции вызывает дефицит азота в почве, из-за этого грибы в качестве источника азота начинают использовать лигнин, который ранее оставался нетронутым, в результате в круговорот вовлекается дополнительное количество органического вещества и увеличивается эмиссия углерода.

Недостаток знаний пока не позволяет надежно оценить в долговременной перспективе даже направление изменения «углеродной» функции экосистем, не

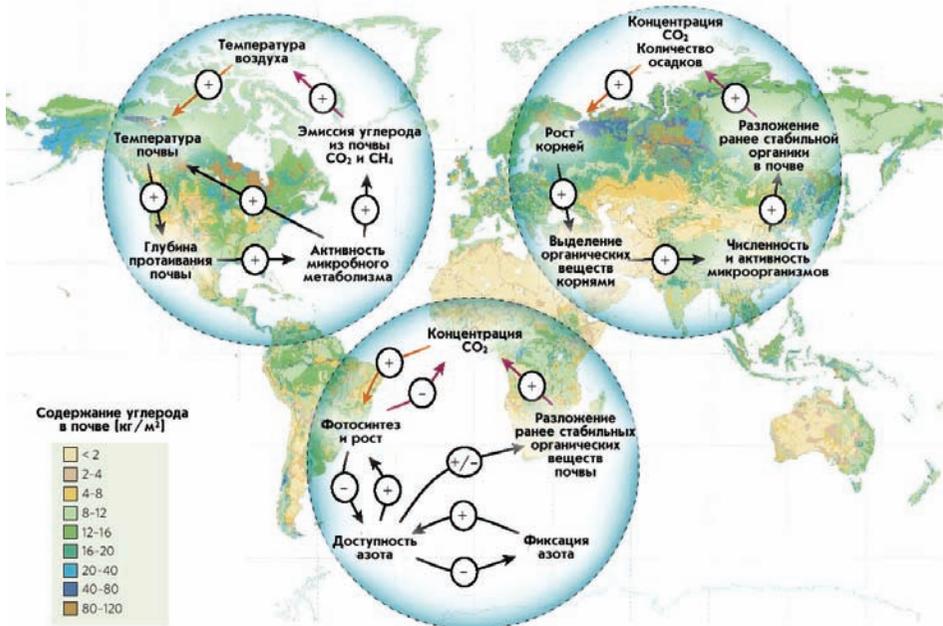


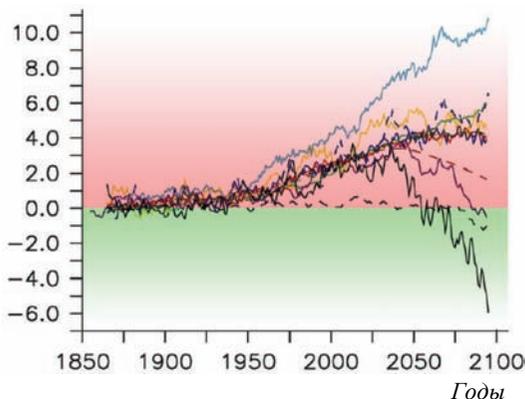
Рис. 76. Три примера важных для климатической системы процессов в почве (Heinmann, Reichstein, 2008). Объяснения в тексте.

говоря уже о ее количественных прогнозах. Одни модели предсказывает монотонное увеличение стока углерода до конца века, другие - рост поглощения углерода до середины века, а потом его быстрое падение и превращение экосистем в источник углерода (рис. 77, Canadell et al., 2007a; Fischlin et al., 2007; Friedlingstein et al., 2006).

Воздействие на климат биогеофизических функций экосистем и их возможные изменения в будущем изучены еще хуже.

Поток углерода через экосистемы суши, ГтС в год

Рис. 77. Прогноз изменения поглощения углерода наземными экосистемами по результатам 11 моделей (Friedlingstein et al., 2006).



В этих условиях исследование изменений экосистем и их функций приобретает ключевое значение для разработки климатической стратегии. Однако пока знаний для надежного прогноза изменений системы «биота – климат» недостаточно, наиболее разумным является следование принципу предосторожности Рио-де-Жанейрской декларации по окружающей среде и развитию<sup>43</sup> (1992) о необходимости применения эффективных мер по охране окружающей среды в случаях угрозы серьезного или необратимого ущерба даже в отсутствие полных научных данных.

## 4.2. Оценка значения экосистемных функций для будущей климатической стратегии

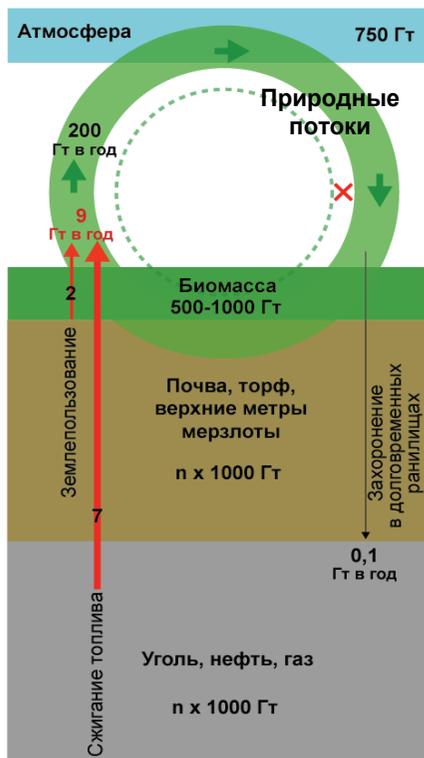


Рис. 78. Соотношение величин потоков и хранилищ углерода (природные потоки показаны зеленым и черным цветом, антропогенные – красным).

Несмотря на упомянутые выше «ключевые неопределенности», на качественном уровне оценка роли экосистем в решении проблемы изменений климата может быть сделана на основании сопоставления мощности природных и антропогенных потоков углерода и его запасов в основных хранилищах биосферы. Основные соотношения могут быть определены следующим образом (рис. 78):

- скорость извлечения человеком углерода из ископаемого топлива примерно в 100 раз выше скорости его естественного захоронения в долговременных хранилищах<sup>44</sup> - накопления торфа в болотах, формирования карбонатов кораллами и отложения планктона с известковым скелетом (Ecosystems..., 2005; Wise use..., 2002);
- запасы углерода в природных хранилищах и его природные потоки на порядки превышают объемы антропогенной эмиссии (см. п. 1.2, рис. 2);
- мощность природной системы регуляции углеродного цикла существ-

<sup>43</sup> <http://www.un.org/russian/document/declarat/riodecl.htm>

<sup>44</sup> Запасы ископаемого топлива создавались природой на протяжении миллионов лет, а при современной скорости сжигания ископаемого топлива (более 7 Гт в год) время их израсходования измеряется тысячами лет.

венно снижена человеком в результате уничтожения природных экосистем (красный крестик на рис. 78);

- запасы углерода в почве, торфе и верхнем слое вечной мерзлоты сопоставимы по объему с разведанными коммерческими запасами ископаемого топлива.

Большинство прогнозов говорит о том, что в современном состоянии наземные экосистемы и океан не смогут поглотить растущие антропогенные выбросы CO<sub>2</sub> (Chapin et al., 2008; Ecosystems..., 2005; Falkovsky et al., 2000).

Может ли восстановление экосистем исправить ситуацию? Наиболее простой ответ заключается в том, что верхний биологический предел поглощения углерода экосистемами – это его количество, выделенное в атмосферу в историческое время в результате уничтожения природных экосистем человеком (Canadell et al., 2007a; Canadell, Raupach, 2008). Это количество равно 180-220 ГтС (DeFries et al., 1999; House et al., 2002), что соответствует примерно 28 годовым промышленным выбросам 2004 года<sup>45</sup>. Более сложная логика подразумевает, что полное восстановление лесов даст эффект, противоположный тому, что произошло в результате их сведения. Если в атмосфере осталось 40% всей антропогенной эмиссии за это время (60 % поглотили океан и экосистемы суши), то при полном восстановлении лесов также будет поглощено 40% от 200 Гт С, выпущенных в результате их уничтожения – то есть около 80 Гт (House et al., 2002). Это количество соответствует 11 годовым промышленным выбросам. МГЭИК (2000) считает, что реалистичный сценарий частичного восстановления лесов в мире с учетом интересов сельского хозяйства может дать максимальное поглощение от 60 до 90 Гт углерода с 1995 до 2050 г.

Таким образом, при целенаправленной политике природопользования **восстанавливающиеся экосистемы могут поглотить существенную часть антропогенной эмиссии углерода – в объеме нескольких современных годовых промышленных выбросов.**

Однако наиболее важная функция экосистем в области регуляции углеродного цикла заключается в сохранении углерода, накопленного в почвах, торфе и верхнем слое мерзлоты. Антропогенные нарушения экосистем в условиях изменяющегося климата могут довольно быстро вовлечь эти огромные запасы в активный круговорот углерода. Например, если перевести все леса в травянистые сообщества или в сельскохозяйственные поля (модельный сценарий полного обезлесивания) произойдет эмиссия от 450 до 820 Гт углерода (House et al., 2002), что соответствует 58-113 годовых промышленных выбросов 2004 г, то есть в несколько раз больше аналогичных оценок возможного поглощения углерода экосистемами при их восстановлении. При этом надо учесть, что эта оценка сделана на основании разницы содержания углерода в почвах и биомассе лесных и травянистых сообществ. Если к ней прибавить возможную эмиссию углерода из болот и вечной мерзлоты, то эти цифры существенно увеличатся. **Таким образом, объем функции хранения углерода соответствует сотням современных годовых промышленных выбросов.**

---

<sup>45</sup> В 2004 г промышленная эмиссия углерода составила 7,2 Гт С (МГЭИК, 2007).

Сравнение объемов экосистемных функций по хранению и поглощению углерода с величиной его годовых антропогенных выбросов является наглядной иллюстрацией того, что **важнейшая для человека функция экосистем заключается в замедлении процессов изменения климата и биосферы**. Она дает человечеству время для адаптации к ним. А если скорость климатических изменений не будет чрезмерной высокой, то цивилизация сможет относительно безболезненно перестроить экономику и системы безопасности населения, то есть, можно считать, что проблема будет решена.

Возможность выполнения этой важнейшей роли экосистем зависит от того, насколько сильно человек будет их нарушать. В частности, если экосистемы будут иметь возможность адаптироваться к потеплению, рост выделения парниковых газов может быть кратковременной реакцией, которая по мере развития более мощной растительности и роста биомассы сменится поглощением углерода. Если для современных тундровых экосистем пороговая температура, когда деструкция начинает преобладать над продукцией составляет около 14°C (Замолотчиков и др 1998), то по мере развития более мощной растительности эта граница может смещаться на более высокие значения температуры. Можно ожидать, что в долгосрочной перспективе арктический ландшафт будет повышать содержание органики в почве и в биомассе. Такие процессы зафиксированы в тундровых экосистемах на Аляске и в Скандинавии, где происходит продвижение древесной и кустарниковой растительности на север (Callaghan et al., 2004 a,b,c; Ecosystems..., 2005; Hinzman et al., 2005). Эксперименты с изменением термического и водного режима болот показали возможность их приспособления к ним – болота быстро теряют или поглощают углерод, пока не достигнут равновесия при новом уровне воды (Bridgham et al., 2008).

Природные механизмы биотической саморегуляции и адаптации могут обеспечить существование экосистем в условиях постепенно изменяющегося климата на протяжении десятилетий, столетий и даже тысячелетий, если для трансформации типа экосистемы необходимы изменения почв (Fischlin et al., 2007). Например, скорость смещения границ лесных биомов по палеэкологическим данным составляет 300-500 м в год, то есть для замещения тундры лесом требуется тысячелетие. В горах этот процесс может быть быстрее, но там продвижение лесов на большую высоту ограничено отсутствием почвы. Южная граница леса может сокращаться быстрее из-за пожаров (Tchebakova et al., 2009).

Если учитывать только естественные процессы изменения растительности и мерзлоты в Сибири в ответ на климатические сдвиги, то они по ряду параметров могут быть сходными с тем, что наблюдалось в период голоценового климатического оптимума 8 – 5 тыс. лет назад (Tchebakova et al., 2009), но одновременное антропогенное давление на экосистемы создает совершенно новые условия развития биоты, которые не наблюдались ранее в истории Земли (см. п. 2.4).

Растительность имеет большой «запас прочности», но антропогенная активность в сочетании с климатическими изменениями может вызвать ее быстрые изменения (Chapin et al., 2004). Наиболее быстрых изменений следует ожидать там, где действие климатических сдвигов будет усиливаться изменениями в ха-

рактуре природных и антропогенных нарушений (Goetz et al., 2007; IPCC, 2001a).

Например, в Арктике физические нарушения поверхности ведут к повышению температуры почвы и ускорению таяния мерзлоты (Callaghan et al., 2004 b), а хорошо развитая растительность может замедлять деградацию мерзлоты (Ping et al., 2008), сразу после вырубки глубина протаивающего слоя увеличивается (Iwahana et al., 2005). Что касается засушливых регионов к югу от лесной зоны, здесь чрезмерное усиление хозяйственной нагрузки в условиях меняющегося климата может создать предпосылки для катастрофического опустынивания (Оценочный доклад..., 2008).

В условиях меняющегося климата антропогенное давление на экосистемы не только ускоряет их трансформации, но может придать им «неожиданное» направление. Так, антропогенные пожары, загрязнение и техногенные нарушения мерзлоты в Сибири могут привести к тому, что линия леса вместо того, чтобы двигаться на север, будет оставаться на месте или даже опускаться к югу (Chapin et al., 2004). В некоторых районах подобные сдвиги уже происходят (Callaghan et al., 2002). По некоторым оценкам, антропогенная тундра сегодня занимает сотни тыс. км<sup>2</sup> от Архангельска до Чукотки, в Архангельской обл. и республике Коми граница тундры находится на 40-100 км южнее, чем несколько десятилетий назад (Callaghan et al., 2004c).

### **4.3. Основные направления изменения политики с учетом климаторегулирующих функций экосистем**

Таким образом, формирование действенной и эффективной политики в области климата без учета климаторегулирующих функций экосистем невозможно. Однако сегодня, как отмечалось выше, на фоне крайне высокого внимания к проблемам климата, задачи исследования и сохранения климаторегулирующих функций экосистем не входят в процесс принятия важнейших политических и экономических решений.

Результаты Копенгагенского климатического саммита показали, что политика, узко направленная на проблему антропогенной эмиссии парниковых газов, неэффективна и необходимо формирование новой стратегии в области климата. В области биотической регуляции климата можно выделить следующие основные направления развития этой политики.

1. Приоритет цели восстановления естественных механизмов регуляции климатической системы Земли перед задачами снижения среднглобальной температуры за счет различных технических и геоинженерных проектов.

При наличии больших пробелов в понимании климатической системы Земли и отсутствии единого мнения климатологов о ведущих причинах и дальнейшем ходе климатических изменений наиболее целесообразной стратегией является поддержание и восстановление природных механизмов регуляции климата, в первую очередь – климаторегулирующих функций экосистем. Как было сказано выше, важнейшая функция природных экосистем – замедление климатических сдвигов, а дальнейшее нарушение живого покрова Земли может усилить деста-

билизацию климата и привести к его непредсказуемым изменениям. В этих условиях преследование узкой цели снижения среднеглобальной температуры за счет масштабных технических и геоинженерных проектов нецелесообразно и опасно, так как такие проекты вызывают еще большие нарушения природных экосистем и естественной системы регуляции климата.

## 2. Учет экосистемной функции по хранению накопленного ранее углерода, а не только потоков парниковых газов между экосистемами и атмосферой.

Как отмечалось выше, объем экосистемной функции хранения углерода, выраженный в числе годовых индустриальных выбросов в несколько раз больше аналогичной оценки функции поглощения углерода. Это ни в коей мере не значит, что задача восстановления экосистем и поглощения ими углерода не важна. Но это значит, что невнимание к задаче поддержания функции сохранения запасов углерода может свести на нет все усилия по регуляции потоков парниковых газов. Кроме того, как было показано выше (п. 1.2), учет функции хранения углерода необходим для адекватной оценки климатической роли экосистем, обладающих его существенными запасами, например, болот. Отсутствие такого учета уже сегодня приводит к принятию неправильных решений.

Иллюстрацией могут служить проекты по производству биотоплива на месте природных экосистем. Эти проекты рассматриваются как способ решения климатической проблемы<sup>46</sup> за счет достижения «нулевого углеродного баланса», при котором количество углерода, выделяемое при сжигании биотоплива, равно тому, что было поглощено во время роста биотопливных культур. Однако если при этом не учитывается выделение углерода из почвы и торфа, результат биотопливных проектов может иметь эффект, противоположный заявленной цели.

В последние годы расширяются плантации для выращивания сахарного тростника (прежде всего - в Бразилии), масличной пальмы (прежде всего – в Индонезии) и других биотопливных культур (The state of food and agriculture, 2008). Однако, исследования, проведенные в тропических лесах и саваннах Южной Америки и Юго-Восточной Азии, а также в прериях США, показали, что при переводе природных экосистем в плантации для выращивания биотоплива в атмосферу выделяются большие потоки парниковых газов из почв, торфа и подстилки. Выбросы углекислого газа, в зависимости от типа экосистемы и выращиваемой культуры, могут от 17 до 420 раз превышать его «экономия» от использования выращенного биотоплива. В Амазонии и Малайзии для возмещения этой эмиссии углерода выращенным биотопливом потребуется 300-400 лет (рис. 79) (Fargione et al., 2008). Этот пример показывает, что действия, направленные только на решение задачи снижения концентрации парниковых газов без учета возможных изменений средообразующих функций экосистем могут привести к прямо противоположному результату.

---

<sup>46</sup> Часто более важными факторами в развитии биотопливных проектов является стремление стран обеспечить свою независимость от поставок углеводородов из других стран и резких колебаний цен на мировом нефтяном рынке; а также прямая экономическая выгода, если производство биотоплива обходится дешевле бензина (например, этанол из сахарного тростника в Бразилии).

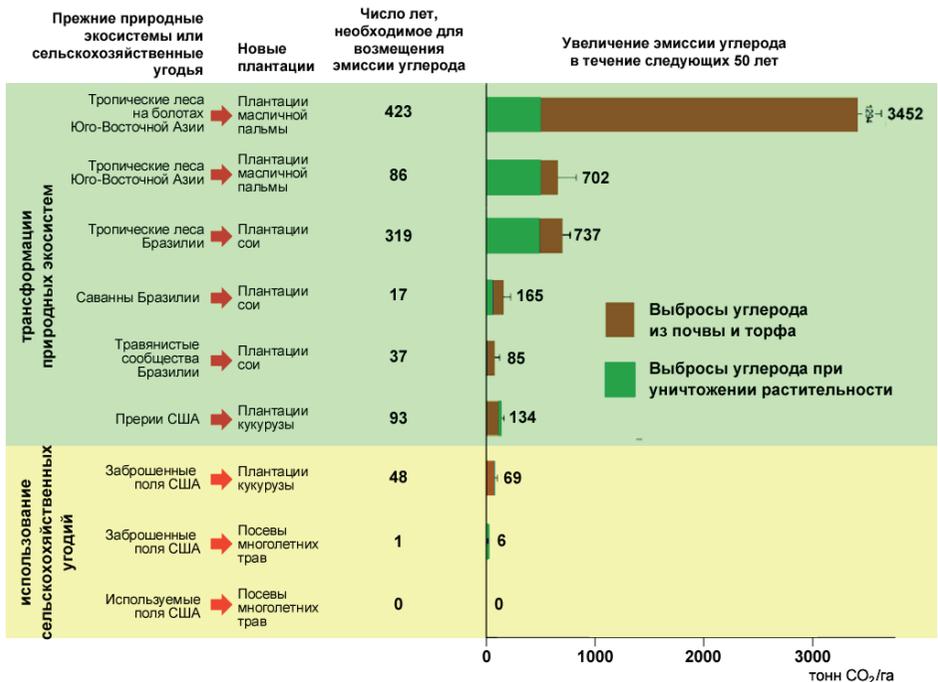


Рис. 79. Выделение углерода при преобразовании природных экосистем в плантации биотоплива (по Fargione et al., 2008, с изменениями).

В России также рассматриваются проекты создания плантаций биотопливных культур и его производства из древесины и торфа (сайт Российской Национальной Биотопливной Ассоциации: [www.bioethanol.ru](http://www.bioethanol.ru)). Эти проекты требуют всесторонней экспертизы с точки зрения их воздействия на средообразующие функции экосистем, которые планируется заменить этими плантациями или разрушить торфоразработками. Особенно тщательной экспертизы требуют проекты использования торфа в качестве топлива. Время обновления торфа в наиболее древних месторождениях имеет тот же порядок (от  $10^2$  до  $10^7$  лет), что у бурого угля ( $10^5$ - $10^8$  лет). Поэтому торф следует считать невозобновимым ресурсом и ископаемым топливом (Parish et al., 2008; Wise use..., 2002). Использование в качестве топлива торфа с осушенных болот климатически контрпродуктивно, так как из-за разложения органики на торфоразработках в атмосферу выбрасывается больше углерода, чем содержится в заготовленном торфе (Joosten, Couwenberg, 2009). Из-за этого воздействие на климат энергии, полученной из торфа, на 9-7% больше, чем у угля даже в пересчете на 300-летний период (Kirkinen et al., 2007). Сравнение воздействия на климат (с учетом выбросов CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O) различных технологических цепочек добычи и использования торфа (добыча торфа из природных, лесомелиорированных, осушенных для сельского хозяйства болот с их последующим облесением или обводнением с целью вос-

становления) показало, что единственный сценарий, когда добывать торф может быть «климатически выгодно» – это его добыча с уже используемых в сельском хозяйстве торфяных земель (которые и так выделяют много CO<sub>2</sub>) с их последующим облесением (рост леса через 150 лет делает эту площадь стоком)<sup>47</sup>.

Кроме того, при экспертизе проектов использования торфяных экосистем необходимо учесть деградацию их водорегулирующих функций. На обширных равнинных территориях верховые болота и заболоченные леса с дождевым питанием играют роль главных регуляторов водного режима, обеспечивают поддержание водных ресурсов и постоянство речного стока (Forests and water, 2008).

### 3. Учет не только антропогенных изменений «углеродных» функций экосистем, но и значения экосистемных функций, не испытывающих управляющих воздействий со стороны человека.

Киотский протокол учитывает изменение потоков парниковых газов в результате воздействия человека на природные экосистемы и агроэкосистемы<sup>48</sup>. Функции природных экосистем, не испытывающие управляющих воздействий со стороны человека, сегодня не учитываются. Между тем, именно сохранение этих функций наиболее важно в определении будущего климатического сценария. Поэтому необходимо наладить их адекватный учет в процессе принятия решений. В частности, для оценки влияния стран на климат важны не абсолютные значения антропогенных выбросов парниковых газов, а разность между выбросами и поглощением углерода экосистемами. Такая постанова вопроса была бы справедлива и выгодна для России и других стран, сохраняющих массивы природных экосистем на своей территории. В разное время эту идею пытались внести в Киотский протокол, но она не имела успеха (Тарко, 2008).

Важный шаг к решению этой задачи сделан в рамках Программы предотвращения сведения и деградации лесов (Reduce Emission from Deforestation and forest Degradation, REDD), которая направлена на развитие финансово-экономических механизмов, стимулирующих не только восстановление, но и сохранение природных лесов как хранилищ углерода. В 2007 г. Всемирный банк объявил об учреждении фонда Forest Carbon Partnership Facility (FCPF), назначение которого – поощрять страны мира в сохранении своих лесов. В марте 2009 г участниками программы REDD являлись 37 развивающихся стран и 11 развитых стран-доноров. В 2008 г фонды программы (Readiness and Carbon Funds) составляли 169 млн. долларов (<http://www.forestcarbonpartnership.org/fcp/>). Прогнозируемые объемы рынка

<sup>47</sup> Инновационным методом «климатически выгодного» производства биомассы можно считать ее изъятие из влажных природных или обводненных восстановленных болот (paludiculture; wet agriculture and forestry). (Joosten, Couwenberg, 2009).

<sup>48</sup> Киотский протокол предусматривает, что Стороны, включенные в приложение I, учтут облесение, лесовосстановление и обезлесивание (ОЛОб), а также согласованные виды деятельности, связанной с землепользованием, изменениями в землепользовании и лесным хозяйством (ЗИЗЛХ), при выполнении ими своих обязательств по сокращению выбросов. Полная система учета углерода будет состоять в полном учете изменений в запасах углерода по всем резервуарам углерода. Однако Киотский протокол уточняет, что внимание должно быть ограничено теми площадями, которые являются «прямым результатом деятельности человека» с 1990 г. (статья 3.3) или результатом воздействия деятельности человека (статья 3.4).

руемые объемы рынка услуг по сохранению лесов по программе REDD сопоставимы с объемами мировой торговли древесиной. Потенциальный рынок услуг по сохранению леса с учетом умеренной цены 10 долларов за тонну углерода и реальных возможностей развивающихся стран по сокращению рубок леса, составляет около 10 млрд. долларов в год, в то время как экспорт лесоматериалов из развивающихся стран в 2006 г. составил 39 млрд. долларов (Miles and Karos, 2008).

Совершенно очевидно, что программы сохранения природных лесов как важнейших регуляторов климатической системы должны быть ориентированы не только на развивающиеся страны и тропические леса, но на все природные экосистемы, и, прежде всего – на северные экосистемы - леса, болота, экосистемы на вечной мерзлоте. У всех стран, обладающих обширными массивами природных экосистем, должны быть эффективные механизмы их сохранения в рамках глобальной климатической стратегии.

#### 4. Комплексный учет биогеофизических климаторегулирующих функций, функций по регуляции водного цикла и других экосистемных функций наряду с функциями по регуляции углеродного цикла.

Биогеофизические климаторегулирующие функции находятся сегодня вне сферы климатической политики. Между тем, как отмечалось выше, их воздействие на климат не менее важно, чем воздействие экосистемных функций по регуляции углеродного цикла. Кроме того, при принятии решений необходим комплексный учет предполагаемого изменения всех средообразующих функций. Отсутствие такого комплексного подхода сильно повышает вероятность принятия ошибочных решений в области климатической политики. Примером могут служить усилия в рамках Киотского протокола по увеличению поглощения CO<sub>2</sub> за счет посадок быстрорастущих (и во многих случаях чужеродных для данных регионов). Исследования, проведенные через несколько лет после организации таких посадок, показали, что они не всегда эффективны, особенно в условиях засушливого климата. Функция улавливания и накопления углерода далеко не всегда улучшалась, но хуже всего, что это привело к существенному сокращению стока рек (рис. 80) (Foley et al., 2005; Jackson et al., 2005; Jackson et al., 2007). Особенно сильно сократили речной сток посадки эвкалиптов. Теперь в ряде регионов, например, в ЮАР, ведется работа по преодолению негативных последствий от распространения чужеродных видов деревьев и восстановлению типичных природных кустарниковых и травяных сообществ (Postel, 2008).

Усилия по предотвращению потепления без комплексного учета всех экосистемных функций могут привести к обратному результату. Например, как отмечалось выше, моделирование изменения альбедо при изменении площади лесов показывает, что их полное уничтожение на севере даст большой «охлаждающий» эффект, но как отмечают сами авторы этих моделей (Gibbard et al., 2005), леса выполняют множество других важных для человека функций, прежде всего – функцию регуляции гидрологического режима, особенно важную для обширных внутриконтинентальных территорий (см. п. 1.3).

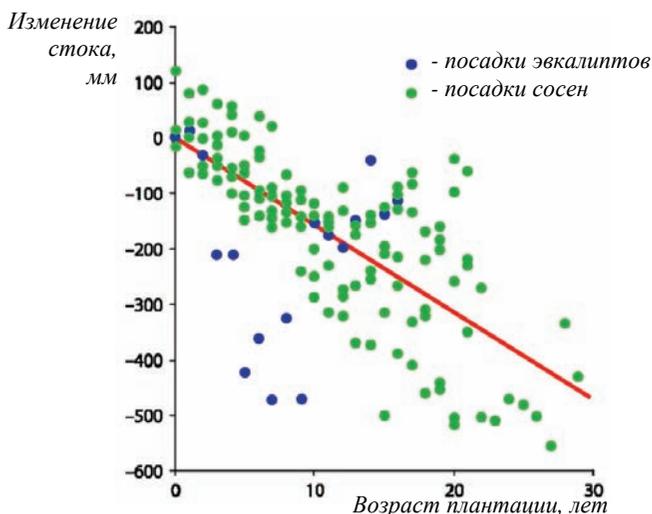


Рис. 80. Изменения речного стока в зависимости от возраста плантаций, данные по 26 водосборным бассейнам, 504 годовых наблюдений (Jackson et al., 2007).

##### 5. Интеграция задач в области климатической политики и сохранения биоразнообразия.

Для экологов, исследующих средообразующие функции экосистем, объективная необходимость объединения этих задач очевидна. Как отмечают Н. Locke и В. Maskey (2009), пора объединить усилия в области двух важнейших международных конвенций – Конвенции о биологическом разнообразии и Рамочной конвенции об изменении климата. Их разделение вредно для целей обеих конвенций – КБР получает непропорционально мало внимания по сравнению с РКИК в то время как задачи смягчения и замедления климатических изменений не могут быть решены без сохранения биологического разнообразия природных систем.

В течение последних 15-20 лет исследования роли биоразнообразия в осуществлении экосистемных функций были одним из наиболее актуальных и быстро развивающихся направлений экологии. Многочисленные работы зарубежных и российских исследователей показали, что искусственное снижение видового разнообразия ведет к деградации экосистемных функций (см: Павлов, Букварева, 2007). Этот вывод имеет принципиальное значение для формирования политики в области природопользования, и, в частности, для сохранения климаторегулирующих функций экосистем.

Ключевое значение биоразнообразия для поддержания стабильности окружающей среды и устойчивого развития общества подчеркивают Конвенция о

биологическом разнообразии<sup>49</sup> (1992), Национальная стратегия сохранения биоразнообразия России<sup>50</sup> (2001), доклад «Оценка экосистем на пороге тысячелетия»<sup>51</sup> (2005). Экологическая доктрина Российской Федерации<sup>52</sup> (2002) в качестве одной из основных задач государственной экологической политики определяет «сохранение и восстановление ландшафтного и биологического разнообразия, достаточного для поддержания способности природных систем к саморегуляции и компенсации последствий антропогенной деятельности».

Задачи комплексного учета всех экосистемных функций и сохранения биоразнообразия как необходимого условия их выполнения поставлены в экологическо-центрической концепции природопользования (Павлов и др., 2009, 2010).

## 5. ГЛОБАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ РОССИЙСКИХ ЭКОСИСТЕМ И МЕСТО РОССИИ В ПОСТКИОТСКОМ ПРОЦЕССЕ

Россия обладает крупнейшими в мире массивами природных экосистем, в том числе лесов, имеющих особую ценность для поддержания биосферной регуляции (рис.81). На нашей территории расположен крупнейший центр стабилизации биосферных процессов (рис. 26).

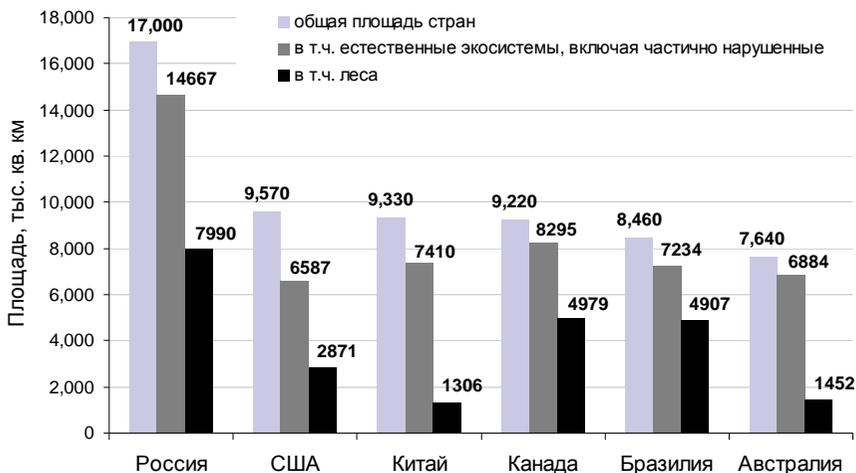


Рис.81. Общая площадь и доля природных экосистем суши в крупнейших странах мира (по данным: Экономика сохранения биоразнообразия..., 2002).

<sup>49</sup> <http://www.un.org/russian/document/convents/biodiv.htm>

<sup>50</sup> <http://old.de.msu.ru/~vart/doc/gef/A25.html>

<sup>51</sup> <http://www.millenniumassessment.org/ru/index.aspx>

<sup>52</sup> <http://www.spsl.nsc.ru/journals/doktrina.pdf>

Запас углерода в растительности и почвах всех природных зон России составляет 336 Гт (40 Гт - в растительности и 296 Гт - в почвах), что равно 16% от мировых запасов (при том, что площадь России составляет 11% от площади мировой суши). Большая часть запасов находится в почвах, составляя 19,7% от мировых, в то время как запасы углерода в растительности составляют 7,2% от мировых (Заварзин, Кудяров, 2006).

Россия занимает первое место в мире по площади лесов (рис. 82), а по запасу углерода в лесной фитомассе уступает только Бразилии (в тропических лесах на 1 га приходится намного больше биомассы, чем на севере). Однако запасы углерода в почвах российских лесов намного больше, чем в тропиках. Поэтому суммарные запасы углерода в российских лесах являются крупнейшими в мире (рис. 83). В почвах и фитомассе лесного фонда<sup>53</sup> заключено около 290 Гт С (253-257 Гт С и 33 – 36 Гт С соответственно), в почвах сельскохозяйственных земель – 45 Гт С (Замолодчиков и др., 2005; Sohngen et al., 2005).

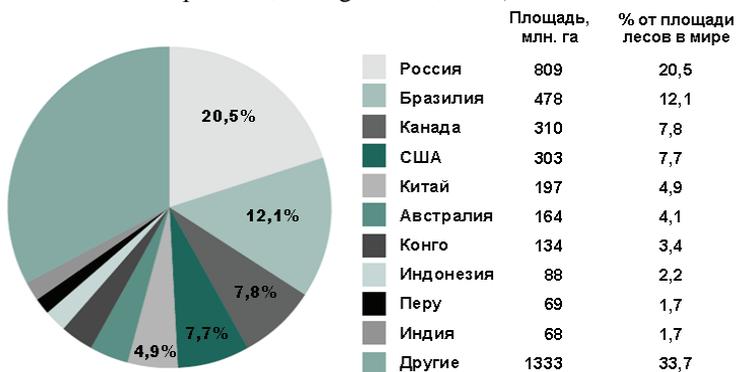


Рис. 82. Десять стран с крупнейшими площадями леса, 2005 г. (Global Forest Resources Assessment. 2005).

И, наконец, крупнейший в мире резервуар углерода в наземных экосистемах находится в вечной мерзлоте России, которая занимает около 11 млн км<sup>2</sup>, то есть 65% территории страны. По разным оценкам, в России находится от 1/2 до 2/3 мировой площади мерзлоты<sup>54</sup> (NEESPI, 2004 а).

Таким образом, экосистемы России выполняют роль крупнейших долговременных хранилищ углерода.

<sup>53</sup> Включая леса, нелесные земли и болота

<sup>54</sup> Надо отметить, что многолетняя мерзлота – не только потенциальный источник огромных количеств CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, но и важнейший фактор риска техногенных катастроф.

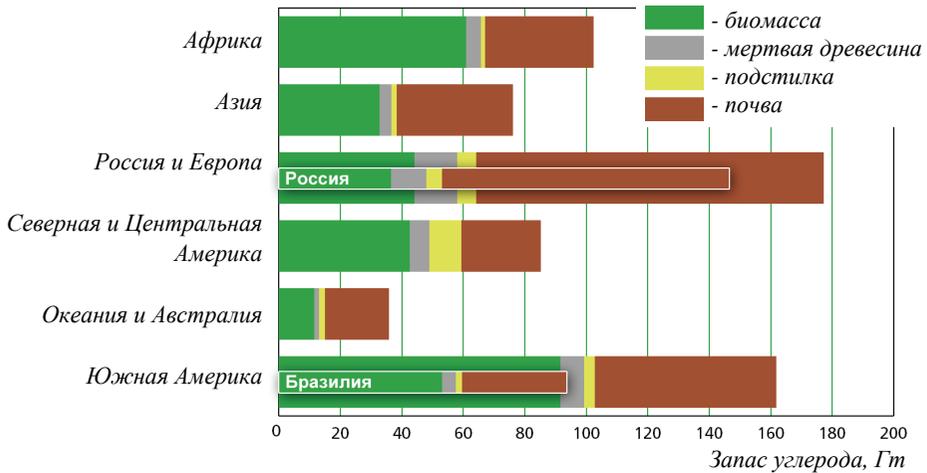


Рис. 83. Запасы углерода по регионам мира (по данным Global Forest Resources Assessment, 2005).

Благодаря функционированию природных экосистем территория России является нетто-стоком углерода. Источниками углерода являются только наиболее южные территории (рис. 84). В 1996-2002 гг. суммарная антропогенная и природная ежегодная эмиссия углерода с территории России составляла 3582 Мт, а поглощение углерода в ходе фотосинтеза - 4450 Мт в год, что в итоге давало нетто сток в размере 868 Мт С в год (Заварзин, Кудеяров, 2006)<sup>55</sup>

Леса России являются нетто-стоком углерода, который оценивается от 136<sup>56</sup> до 40 МтС в год (большое расхождение оценок вызвано медленным обновлением информации лесного учета) (Замолодчиков и др., 2005; Замолодчиков и др., 2007; Sohngen et al., 2005).

Северное положение российских экосистем определяет чрезвычайную важность их функции аккумуляции углерода. Именно в холодном и влажном климате создаются условия для захоронения углерода. Температурный максимум для деструкции выше, чем для продукции, поэтому в холодных условиях продукция может превышать деструкцию, и избыток биомассы будет захораниваться в долговременных резервуарах. Еще один важный фактор, способствующий подавлению деструкции и захоронению углерода - избыточное увлажнение. Именно в северных условиях создаются такие условия. Как было сказано выше, основные запасы углерода в наземных экосистемах сосредоточены в почвах, причем это в

<sup>55</sup> Эмиссия в 1996-2002 гг.: промышленность - 418 МтС; сельское хозяйство - 40,5 МтС; заготовка древесины и торфа - 20,6 МтС; лесные пожары и постпожарная эмиссия - 24 МтС; гибель леса от вредителей - 2,7 МтС; разложение дебриса - 214 МтС; речной сток углерода - 61,8 МтС; дыхание почвы - 2800 МтС (Заварзин, Кудеяров, 2006)

<sup>56</sup> Годичная аккумуляция в фитомассе лесов - 239-238 МтС; эмиссия связанная с рубками в 1990-е - около 65 МтС в год, в 2001 г - 57 МтС; пожарная и послепожарная эмиссия в 1990-е гг. около 20 МтС в год (Sohngen et al., 2005; Замолодчиков и др., 2005)



Рис. 84. Биогенный сток  $CO_2$  на территории России (Заварзин, Кудеяров, 2006).

наибольшей мере относится к северным экосистемам. Запасы углерода в почве в мире превышают запасы в растительности в 3-5 раз, а в России – 7,5 раз. Запас в почвах России – пятая часть мировых запасов углерода в почвах, хотя территория России 1\8,5 территории суши (Заварзин, Кудеяров, 2006).

Таким образом, можно считать, что российские экосистемы являются не только наиболее мощным хранилищем углерода, но и наиболее мощным его стоком в долговременные хранилища наземных экосистем.

Глобальное значение биогеофизических климаторегулирующих функций российских экосистем определяется большой площадью страны. Как было сказано выше, изменение этой группы экосистемных функций на больших площадях влияет не только на региональный, но и на глобальный климат (см. п. 1.3).

Значение изменений альbedo поверхности наиболее велико в регионах с существенной длительностью снежного периода. Как сказано выше (см. п. 1.5), в таких условиях формируется положительная обратная связь между увеличением площади древесной и кустарниковой растительности, которое существенно уменьшает альbedo и увеличением региональных температур, особенно весной. Влияние этой взаимосвязи на климат еще больше усиливается, если данный регион примыкает к океану – в этом случае возникает еще одна положительная связь - между повышением региональных температур на суше и сокращением площади льда на прилегающих акваториях, которое в свою очередь уменьшает альbedo океана. Именно такие условия характерны для российской Арктики, что делает влияние этого региона на климат чрезвычайно сильным.

В связи с оценкой важности биогеофизических климаторегулирующих функ-

ций северных экосистем возникает вопрос об их принципиальном отличии в этом отношении от тропических лесов. Многие модели показывают, что результирующие климатические эффекты от изменения площади бореальных и тропических лесов могут быть противоположными из-за того, что в тропиках наиболее сильное влияние на климат оказывает «охлаждающий» эффект от увеличения эвапотранспирации лесами, а на севере – «нагревающий» эффект от сильного снижения альбедо у древесной растительности по сравнению со снегом (Ecosystems..., 2005; Chapin et al., 2008; Field et al., 2007; Govindasamy et al., 2001). Например, одна из гипотетических моделей предсказывает, что полное уничтожение бореальных лесов даст охлаждение поверхности суши в среднем на 1,4 °С, а уничтожение тропических лесов – нагревание на 0,2 °С (Bala et al., 2007).

Если преследовать узкую цель снижения среднеглобальной температуры, то из этих моделей можно сделать вывод, что сохранять и восстанавливать леса надо прежде всего в тропиках, а не на севере (Chapin et al., 2008; Field et al., 2007; Jackson et al., 2008). Однако сегодня его можно рассматривать лишь как одну из гипотез и ни в коей мере – как руководство к действию. Интегральные оценки климатических эффектов могут сильно измениться при корректировке данных о количестве углерода, который может выйти в атмосферу из болот и мерзлоты при уничтожении северных лесов. К тому же, надо учитывать и то, что при изменении климата и экосистем бореальных лесов соотношение эффектов от изменения альбедо и эвапотранспирации также будет изменяться. Кроме того, как подчеркивают авторы одной из этих работ, надо помнить, что лес выполняет многие другие важные экосистемные функции (Bala et al., 2007), и прежде всего - функцию регуляции гидрологического цикла. Но самым важным аргументом против такого узкого «физического» подхода к оценке климаторегулирующей функции северных лесов является то, что главной задачей следует считать не снижение любыми средствами глобальной температуры, а восстановление нарушенных человеком механизмов биотической регуляции климата Земли.

Таким образом, климаторегулирующие функции российских экосистем следует признать одним из ключевых факторов формирования будущего климатического сценария. Глобальное значение российских экосистем должно определять лидирующее место России в формировании новой международной климатической политики. Для достижения этого необходимы действия в следующих основных направлениях.

- Исследование климаторегулирующих функций экосистем. Россия, обладающая глобальным ресурсом экосистемной климатической регуляции должна и играть лидирующую роль в этих исследованиях. Приоритетное значение исследований климатической системы подчеркивается в Климатической доктрине РФ (2009), очевидно, что одним из основных компонентов реализации этой задачи должно быть исследование функций экосистем.

- Инициирование и продвижение в ходе международных переговоров задачи учета всех климаторегулирующих функций экосистем, включая функции хранения углерода, биогеофизические климаторегулирующие функции и функции по регуляции водного цикла на суше.

- Инициирование и активное участие в международных усилиях по интеграции задач в области климатической политики и сохранения биоразнообразия.

- Переход к национальной экологическоцентрической концепции природопользования (Павлов и др., 2009, 2010), которая обеспечит комплексный учет в процессе принятия политических и экономических решений ценности всех экосистемных функций, включая климаторегулирующие.

*Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Биологическое разнообразие»*

*Автор выносит глубокую благодарность Ю.А. Курбатовой и П.Н. Варгину за ценные замечания и дополнения к работе*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берг Л.С. 1922. Климат и жизнь. М.: Госиздат.
- Вернадский В.И. Философские мысли натуралиста. Раздел первый. Научная мысль как планетное явление (с. 20-89) 1988. М.: Наука. 520 с.
- Гиличинский Д.А., Федоров-Давыдов Д.Г., Холодов А.Л., и др. 2008. Реакция температурного режима мерзлотных почв и верхних горизонтов вечной мерзлоты на изменения климата \\\ Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. IV. Отв. ред. Г.А. Заварзин, В.Н.Кудеяров. Пушино; Москва: ИФХ и БППРАН, ИФЗ РАН. С. 36-49
- Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрехимия. № 5. С. 46-58.
- Горшков В.Г. 1995. Физические и биологические основы устойчивости жизни М.: ВИНТИ. 472 с.
- Горшков В.В., Горшков В.Г., Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., Макарьева А.М. Биотическая регуляция окружающей среды // Экология. 1999. № 2. С. 105-113.
- Горшков В.Г., Макарьева А.М. 2006. Биотический насос атмосферной влаги, его связь с глобальной атмосферной циркуляцией и значение для круговорота воды на суше. Гатчина: Петербургский институт ядерной физики РАН. Пре-принт. 49 с.
- Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., Рейф И.Е. 2005. Перед главным вызовом цивилизации. Взгляд из России. М.: ИНФРА-М. 224 с.
- Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. 2008. Потребление воды и ее дефицит: экологический аспект \\\ Глобальные экологические проблемы России. Отв ред. Ф.Т. Яншина. М.: Наука. 2008. С. 5 – 27.
- Ежегодник ГЭП. 2006. Глобальная экологическая перспектива. Обзор изменений состояния окружающей среды. ЮНЕП. (<http://www.unep.org/geo/yearbook/yb2006/index.asp>).

- Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. 2006. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестник РАН. Т. 76. № 1. С.14-29.
- Залиханов М.Ч., Лосев К.С., Шелехов А.М. Естественные экосистемы – важнейший природный ресурс человечества // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 7. С. 612-614.
- Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н., Честных О.В. 2005. Динамика пулов и потоков углерода на территории лесного фонда России // Экология. №5. С. 323-333.
- Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л. 2007. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение, № 6, С. 23-34
- Исаев А.С., Коровин Г.Н., Лукина Н.В., Сухих В.Н., Ершов Д.В. 2008. Катастрофические воздействия антропогенных и природных факторов на лесные экосистемы // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т IV. Отв. ред. Г.А. Заварзин, В.Н.Кудеяров. Пушино; Москва: ИФХ и БППРАН, ИФЗ РАН. С. 66-79.
- Кондратьев К.Я., Демирчян К.С. Климат Земли и «протокол Киото» // Вестник РАН. 2001. Т. 71. № 11. С. 1002-1009.
- Коровин Г.Н., Зукерт Н.В. 2003. Влияние климатических изменений на лесные пожары в России // Климатические изменения: взгляд из России. Под ред. В.И. Данилова-Данильяна. М.: ТЕИС. С. 63-98.
- Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П., Нгуен Данг Хой. 2010. Закономерности антропогенной трансформации лесных экосистем Вьетнама // Экология и здоровье человека. Российско-Вьетнамская научная конференция. Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр. Ханой. С.
- МГЭИК. 2000. Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство. Специальный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Резюме для лиц, определяющих политику. 29 с. <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-ru.pdf>
- МГЭИК. 2001a. Изменение климата. Обобщенный доклад. Резюме для лиц, определяющих политику. 40 с.
- МГЭИК. 2001b. Изменение климата. Смягчение последствий. Резюме для лиц, определяющих политику и Техническое резюме доклада рабочей группы III. 103 с. [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/vol4/russian/pdf/spm.pdf](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/russian/pdf/spm.pdf)
- МГЭИК, 2007: Изменение климата, 2007 г.,: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад МГЭИК. Пачаури Р.К., Райзингер А. и основная группа авторов (ред.). МГЭИК, Женева, Швейцария, 104 с.
- Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2004 гг. Росгидромет. 2006. 139 с.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Росгидромет. Москва.

- Павлов А.В., Гравис Г.Ф. 2000. Вечная мерзлота и современный климат // Природа. № 4. С. 10-18.
- Павлов Д.С., Букварева Е.Н. 2007. Биоразнообразие, экосистемные функции и жизнеобеспечение человечества // Вестник РАН. Т.77. № 11. С. 974-986.
- Павлов Д.С., Стриганова Б.Р., Букварева Е.Н., Дгебуадзе Ю.Ю. 2009. Сохранение биологического разнообразия как условие устойчивого развития. М.: Институт устойчивого развития / Центр экологической политики России. 2009. 84 с. (<http://www.ecopolicy.ru/index.php?cnt=339>)
- Павлов Д.С., Стриганова Б.Р., Букварева Е.Н. 2010. Экологоцентрическая концепция природопользования // Вестник РАН. Т.80. № 2. С.131-140.
- Розенберг Г.С., Коломыц Э.Г. Прогноз изменений биологического круговорота и углеродного баланса в лесных экосистемах при глобальном потеплении // Успехи современной биологии. 2007. Т. 127. № 6. С. 531-537.
- Семилетов И.П. 1995. Углеродный цикл и глобальные изменения в прошлом и настоящем // Химия морей и океанов. Ред. О.К. Бордовский. М.: Наука. С. 130-154.
- Тарко А.М. 2008. Можем ли мы затормозить глобальное потепление? // Россия в окружающем мире. М.: МНЭПУ. С. 17-43.
- Харук В.И., Им С.Т., Рэнсон К.Дж., Наурзбаев М.М. 2004. Временная динамика лиственницы в экотоне лесотундры // Доклады Академии наук. Т. 398. № 3. С. 1-5.
- Чистотин М.В., Сирин А.А., Дулов Л.Е. 2006. Сезонная динамика эмиссии углекислого газа и метана при осушении болота в Московской области для добычи торфа и сельскохозяйственного использования // Агрехимия. № 6. С. 54-62
- Шахова Н.Е., Семилетов И.П. 2008. Характерные особенности цикла углерода на мелководном шельфе восточного сектора Российской Арктики // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т IV. Отв. ред. Г.А. Заварзин, В.Н.Кудеяров. Пушино; Москва: ИФХ и БППРАН, ИФЗ РАН. С. 167-181.
- Экономика сохранения биоразнообразия. Ред. Тишков А.А. М.: Проект ГЭФ "Сохранение биоразнообразия Российской Федерации", Институт экономики природопользования. 2002. 604 с.
- Alm J., Shurpali N.J., Minkkinen K. et al. 2007. Emission factors and their uncertainty for the exchange of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in Finnish managed peatlands // Boreal environment research. V.12. P.191-209.
- Anisimov O.A. 2007. Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission // Environ. Res. Lett. V.2. 045016.7 p.
- Anisimov O., Reneva S. 2006. Permafrost and changing climate :the Russian perspective // Ambio. V.35, N.4. P.169-175.
- Archer D. 2007. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change // Biogeosciences. V.4. P.521-544. [www.biogeosciences.net/4/521/2007/](http://www.biogeosciences.net/4/521/2007/)

- Arneeth A., Sitch S., Bondeau A. et al. 2009. From biota to chemistry and climate: towards a comprehensive description of trace gas exchange between the biosphere and atmosphere // *Biogeosciences Discuss.* V.6. P.7717–7788.
- Avissar R., Werth D. 2005. Global hydroclimatological teleconnections resulting from tropical deforestation // *Journal of Hydrometeorology.* V. 6. № 2. P.134–145.
- Bai Z.G, Dent D.L, Olsson L., Schaepman M.E. 2008. Global assessment of land degradation and improvement 1: identification by remote sensing. (Report 2008/01). Rome-Wageningen: FAO/ISRIC. 59 p.
- Bala G., Caldeira K., Mirin A. et al. 2006. Biogeophysical effects of CO<sub>2</sub> fertilization on global climate // *Tellus.* V. 58B. P.620–627.
- Bala G., Caldeira K., Wickett M. et al. 2007. Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation // *PNAS.* V.104. N.16. P.6550–6555.
- Baldocchi D. 2008. “Breathing” of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems // *Australian Journal of Botany.* V. 56. P. 1–26.
- Bardgett R.D, Freeman C., Ostle N.J. 2008. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks // *The ISME Journal. International Society for Microbial Ecology.* V.2. P.805–814.
- Betts R.A., 1999: Self-beneficial effects of vegetation on climate in an Ocean–Atmosphere General Circulation Model. *Geophysical Research Letters.* V.26. N.10. P.1457–1460.
- Betts R.A. 2001. Biogeophysical impacts of land use on present-day climate: near-surface temperature change and radiative forcing // *Atmospheric Science Letters.* V.1.1. doi:10.1006/asle.2001.0023.
- Betts R., Sanderson M., Woodward S. 2008. Effects of large-scale Amazon forest degradation on climate and air quality through fluxes of carbon dioxide, water, energy, mineral dust and isoprene // *Phil. Trans. R. Soc. B.* V.363. P.1873–1880.
- Bloom A.A., Palmer P.I., Fraser A., Reay D.S., Frankenberg C. 2010. Large-scale controls of methanogenesis inferred from methane and gravity spaceborne data // *Science.* V.327. 15 January 2010. P.322–325
- Bridgman S.D., Pastor J., Dewey B., Weltzin J.F., Updegraff K. 2008. Rapid carbon response of peatlands to climate change // *Ecology.* V.89. N.11. P.3041–3048.
- Brovkin V., Ganopolski A., Claussen M., Kubatzki C., Petouckhov V. 1999. Modeling climate response to historical land cover change // *Global Ecology and Biogeography.* V.8. P.509–517.
- Brovkin V., Claussen M. 2008. Comment on “Climate-Driven Ecosystem Succession in the Sahara: The Past 6000 Years” // *Science.* V.322. November 2008. 1326b.
- Bryant D., Nielsen D., Tanglely L. 1997. Last frontier forests: Ecosystems and economies on the edge. World Resources Institute. 42 p.
- Bunyard P. 2008. The role of ecosystems in determining climate: the special case of the Amazon rainforests // *Orinoquia.* V.12. N.1. P.15–28.
- Calder I., Hofer T., Vermont S., Warren P. 2007. Towards a new understanding of forests and water // *Unasylva.* V. 58. № 229. P.3–10.

- Callaghan T.V., Crawford R.M.M., Eronen M. et al. 2002. The dynamics of the tundra-taiga boundary: an overview and suggested coordinated and integrated approach to research // *Ambio*. Special report 12. P.3-5
- Callaghan T.V., Bjorn L.O., Chernov Y. et al. 2004 a. Effects on the Structure of Arctic Ecosystems in the Short- and Long-term Perspectives // *Ambio*. V.33. N.7. P.436-447.
- Callaghan T.V., Bjorn L.O., Chernov Y. et al. 2004 b. Effects on the Function of Arctic Ecosystems in the Short- and Long-term Perspectives // *Ambio*. V.33. N.7. P.448-458.
- Callaghan T.V., Bjorn L.O., Chernov Y. et al. 2004 c. Effects of Changes in Climate on Landscape and Regional Processes, and Feedbacks to the Climate System // *Ambio*. V.33. N.7. P.459-468.
- Canadell J.G. 2002. Land use effects on terrestrial carbon sources and sinks // *Science in China (Series C)*. V. 45 Supp. 9 p.
- Canadell J.P., Pataki D.E., Gifford R. et al. 2007 a. Saturation of the terrestrial carbon sink // *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Global Change - The IGBP Series. Eds: Canadell J.G. et al. Springer. P.59–78.
- Canadell J.G., Le Quere C., Raupach M.R. et al. 2007 б. Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks// *Proc. of the National Acad. of Sci. of the USA*. V. 104. P. 18866–18870.
- Canadell J.G., Raupach M.R. 2008. Managing Forests for Climate Change Mitigation // *Science*. V.320. 13 June 2008. P.1456-1457
- Chapin III F.S., Callaghan T.V., Bergeron Y. et al. 2004. Global change and the boreal forest: thresholds, shifting states or gradual change? // *Ambio*. V.33. N.6. P.361-365.
- Chapin III F.S., Sturm M., Serreze M.C. et al. 2005. Role of land-surface changes in Arctic summer warming // *Science*.V.310. 28 October. P. 657-660.
- Chapin III F.S., Randerson J.T, McGuire A.D., Foley J.A, Field C.B. 2008. Changing feedbacks in the climate– biosphere system // *Front Ecol Environ*. V.6. N.6. P.313–320.
- Chapin III F.S., McFarland J., McGuire A.D., Euskirchen E.S., Ruess R.W., Kielland K. 2009. The changing global carbon cycle: linking plant–soil carbon dynamics to global consequences // *Journal of Ecology*. V.97. P.840–850.
- Cheng J. 2010. An Environmentalist’s View on China’s Drought // *The Wall Street Journal*. March 31. [www.wsj.com](http://www.wsj.com).
- Corradi C., Kolle O., Walter K., Zimov S.A., Schulze E.-D. 2005. Carbon dioxide and methane exchange of a north-east Siberian tussock tundra // *Global Change Biology*. V.11. N.11. P. 1910-1925
- Costanza R., Perez-Maqueo O., Martinez M.L., Sutton P., Anderson S.J., Mulder K. 2008. The value of coastal wetlands for hurricane protection // *Ambio*. V.37. N.4. P.241-248.
- Crutzen P.J., Stoermer E.F. 2000. The "Anthropocene"// *IGBP Newsletter*. № 41. P.17–18.

- Da Silva R.R., Avissar R. 2006. The hydrometeorology of a deforested region of the Amazon basin // *Journal of hydrometeorology*. V.7. P.1028-1042.
- Da Silva R.R., Werth D., Avissar R. 2008. Regional impacts of future land-cover changes on the Amazon basin wet-season climate // *Journal of Climate*. V. 21. № 6. P. 1153–1170.
- DeFries R.S., Field C.B., Fung I., Collatz G.J., Bounoua L. 1999. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity // *Global Biogeochem. Cycles*. V.13. N.3. P.803–815.
- Drosler M., Freibauer A., Christensen T.R., Friborg T. 2008. Observations and Status of Peatland Greenhouse Gas Emissions in Europe // *The Continental-Scale Greenhouse Gas Balance of Europe*. Ecological studies. V.203. Springer New York. P. 243-261.
- Ecosystems and human well-being: current state and trends: findings of the Condition and Trends Working Group. 2005. Edited by R. Hassan, R. Scholes, N. Ash (The millennium ecosystem assessment series; V.1).
- Eltahir E.A.B., Bras R.L. 1994. Precipitation recycling in the Amazon basin // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. V.120. P.861-880.
- Euskirchen E.S., McGuire A.D., Kicklighter D.W. et al. 2006. Importance of recent shifts in soil thermal dynamics on growing season length, productivity, and carbon sequestration in terrestrial high-latitude ecosystems // *Glob. Change Biol*. V.12. P.731–750.
- Falkowski P., Scholes R.J., Boyle E. et al. 2000. The global carbon cycle: a test of our knowledge of Earth as a system // *Science*. V.290. 13 October. P.291-296.
- Fargione J., Hill J., Tilman D., Polasky S., Hawthorne P. 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt // *Science*. V. 319. № 5867. P. 1235–1238.
- Field C.B., Lobell D.B., Peters H.A., Chiariello N.R. 2007. Feedbacks of terrestrial ecosystems to climate change // *Annual Review of Environment and Resources*. V.32. P.1–29.
- Field C.B., Kaduk J. 2004. The carbon balance of an old-growth forest: building across approaches // *Ecosystems*. V.7. P.525-533.
- Findell K., Shevliakova E., Milly P.C.D., Stouffer R.J. 2007. Modeled impact of anthropogenic land cover change on climate // *Journal of climate*. V.20. P.3621-3634.
- Fischlin A., Midgley G.F., Price J.T. et al. 2007. Ecosystems, their properties, goods, and services. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. P. 211-272.
- Foley J.A., Coe M.T., Scheffer M., Wang G. 2003. Regime shifts in the Sahara and Sahel: interactions between ecological and climatic systems in Northern Africa // *Ecosystems*. V.6. P.524–539.
- Foley J.A., DeFries R., Asner G.P. et al. 2005. Global consequences of land use // *Science*. V. 309. P. 570–574.
- Foley J.A., Asner G.P., Costa M.H. et al. 2007. Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon basin // *Frontiers in Ecol-*

- ogy and the Environment. V. 5. № 1. P. 25–32.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P. et al. 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Frolking S., Roulet N., Fuglestad J. 2006. How northern peatlands influence the Earth's radiative budget: sustained methane emission versus sustained carbon sequestration // *J. Geophys. Res.* V.111. G01008, doi:10.1029/2005JG000091.
- Frolking S. Roulet N.T. 2007. Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions // *Global Change Biology*. V.13. P.1079-1088.
- Fredeen AL, Bois CH, Janzen DT, Sanborn PT. 2005. Comparison of coniferous forest carbon stocks between old-growth and young second-growth forests on two soil types in central British Columbia, Canada // *Canadian Journal of Forest Research* 35, 1411-1421.
- Fredeen A.L., Waughal J.D., Pypker T.G. 2007. When do replanted sub-boreal clearcuts become net sinks for CO<sub>2</sub>? // *Forest Ecology and Management*. V.239. P.210-216.
- Friedlingstein P., Cox P., Betts R. et al. 2006. Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C<sup>4</sup>MIP model intercomparison // *Journal of climate*. V.19. 15 July. P.3337-3353.
- Gedney N., Cox P.M., Huntingford C. 2004. Climate feedback from wetland methane emissions // *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20503.
- Gibbard S., Caldeira K., Bala G., Phillips T.J., Wickett M. 2005. Climate effects of global land cover change // *Geophys. Res. Letters*. V.32. L23705, doi:10.1029/2005GL024550.
- Global Environment Outlook 4. Environment for development. 2007. United Nations Environment Programme – UNEP. 540 p.
- Global Forest Resources Assessment. 2005. Progress towards sustainable forest management. Rome: FAO. 2006. 320 p.
- Goetz S.J., Mack M.C., Gurney K.R., Randerson J.T., Houghton R.A. 2007. Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America // *Environ. Res. Lett.* V.2. 045031. 9p. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045031
- Gordon L.J., Steffen W., Jonsson B.F., Folke C., Falkenmark M., Johannessen A. 2005. Human modification of global water vapor flows from the land surface // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. V. 102. № 21. P.7612–7617.
- Govindasamy B., Duffy P.B., Caldeira K. 2001. Land use change and Northern hemisphere cooling // *Geophys. Res. Lett.* V.28. N.2. P. 291-294.
- Hasler N., Werth D., Avissar R. 2009. Effects of tropical deforestation on global hydroclimate: a multimodel ensemble analysis // *Journal of Climate*. V. 22. № 5. P. 1124–1141.

- Heimann M., Reichstein M. 2008. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks// *Nature*. V. 451. P. 289–292.
- Hinzman L.D., Bettez N.D., Bolton W.R. et al. 2005. Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other arctic regions // *Climatic Change*. V.72. P. 251–298.
- House J.I., Prentice I.C., Le Quere C. 2002. Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO<sub>2</sub>// *Global Change Biology*. V.8. P.1-6.
- IPCC. 2001 a. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Ch. 5. *Ecosystems and Their Goods and Services*.
- IPCC. 2001 b. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. 4. *Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases*.
- IPCC. 2002. *Climate change and biodiversity*. IPCC Technical paper V. 86 p.
- Irizarry-Ortiz M.M., Wang G., Eltahir E.A.B. 2003. Role of the biosphere in the mid-Holocene climate of West Africa // *Journal of Geophys. Res.* V.108. N.D2. 4042, doi:10.1029/2001JD000989.
- Iwahana G, Machimura T, Kobayashi Y, Fedorov AN, Konstantinov PY, Fukuda M. 2005. Influence of forest clear cutting on the thermal and hydrological regime of the active layer near Yakutsk, eastern Siberia. *Journal of Geophysical Research* 110.
- Jackson R.B., Jobbagy E.G., Avissar R. et al. 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration // *Science*. V. 310. P.1944–1947.
- Jackson R.B, Farley K.A, Hoffmann W.A, Jobbágy E.G, McCulley R.L. 2007. Carbon and water tradeoffs in conversions to forests and shrublands // *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Eds: Canadell J.G. et al. Springer. P. 237–246.
- Jackson R.B, Randerson J.T, Canadell J.G. et al. 2008. Protecting climate with forests // *Environ. Res. Lett.* V.3. 044006. 5p. doi:10.1088/1748-9326/3/4/044006.
- Jobbagy E.G., Jackson R.B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation // *Ecological Applications*. V.10. N.2. P. 423–436.
- Joosten H., Couwenberg J. 2009. *Are emission reductions from peatlands MRV-able?* Greifswald University. Wetlands International, Ede. 16 p. www.wetlands.org
- Jouzel J., Masson-Delmotte V., Cattani O. et al. 2007. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years // *Science Express*. 5 July 2007. 10.1126/science.1141038. 5 p.
- Kirkinen J., Minkkinen K., Penttila T. et al. 2007. Greenhouse impact due to different peat fuel utilization chains in Finland – a life-cycle approach // *Boreal Environment Research*. V. 12. P.211-223.
- Knohl A., Schulze E.-D., Wirth C. 2009. *Biosphere–Atmosphere Exchange of Old-Growth Forests: Processes and Pattern* // Eds: Wirth C. et al. *Old-Growth Forests*. Part 2. *Function, fate and value*. Springer Berlin Heidelberg. P.141-158
- Kolari P., Pumpanen J., Rannik U., Ilvesniemi H., Hari P., Berninger F. 2004. Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland // *Global Change Biology* 10, 1106-1119.

- Kropelin S., Verschuren D., Lézine A.-M. et al. 2008. Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: the past 6000 Years // *Science*. V.320. 9 May 2008. P.765-768.
- Kurz W.A., Stinson G., Rampley G.J., Dymond C.C., Neilson E.T. 2008. Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada's forests to the global carbon cycle highly uncertain // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. V.105. N 5. P.1551–1555.
- Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N. 2008. Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia // *Biogeosciences*. V.5. P. 969-980.
- Kurbatova J., Li C., Tatarinov F., Varlagin A., Shalukhina N., Olchev A. 2009. Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bogs // *Environ. Res. Lett.* V.4. 045022 (5pp) doi:10.1088/1748-9326/4/4/045022.
- Kvenvolden K.A. 1999. Potential effects of gas hydrate on human welfare // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. V.96. P.3420–3426.
- Le Quere C., Raupach M.R., Canadell J.G. et al. 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide // *Nature Geoscience*. V.2. P.831 – 836.
- Lenton T.M., Held H., Kriegler E. et al. 2008. Tipping elements in the Earth's climate system // *PNAS*. V.105. N.6. P. 1786–1793.
- Locke H., Mackey B. 2009. The Nature of climate change // *International Journal of Wilderness* . V.15. N.2. P.7 – 13.
- Loulergue L., Schilt A., Spahni R. et al. 2008. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH<sub>4</sub> over the past 800,000 years // *Nature*. V.453. 15 May. P.383-386.
- Lucht W., Schaphoff S., Erbrect T., Heyder U., Cramer W. 2006. Terrestrial vegetation redistribution and carbon balance under climate change // *Carbon Balance and Management*. V. 1. N.6. <http://www.cbmjournals.com/content/1/1/6>
- Luyssaert S., Schulze E.-D., Borner A. et al. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks // *V.455.11* September. P.213-215.
- Lyons T.J. 2002. Clouds form preferentially over native vegetation // *Integrated Assessment and Decision Support*. Rizzoli A.E., Jakeman A.J. (eds). *Proceedings of the 1-st Biennial Meeting of the IEMSS. International Environmental Modelling and Software Society*. P.355-359.
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Li Bai-Lian. 2008. Energy budget of the biosphere and civilization: Rethinking environmental security of global renewable and non-renewable resources // *Ecological complexity*. V.5. P.281 – 288.
- Malhi Y., Roberts J.T., Betts R.A., Killeen T.J., Li W., Nobre C.A. 2008. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon // *Science*. V.319. P.169-172.
- McGuire A.D., Anderson L., Christensen T.R., Dallimore S., Guo L., Hayes D., Heimann M., Lorenson T., Macdonald R., Roulet N. 2008. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change // *Ecological Monographs*. V.79. N.4. P.523–555.
- Meher-Homji V.M. 1991. Probable impact of deforestation on hydrological processes // *Climatic Change*. V.19. P.163-73.
- Meinshausen M., Meinshausen N., Hare W. et al. 2009. Greenhouse-gas emission tar-

- gets for limiting global warming to 2C° // *Nature*. V. 458. P. 1158–1162.
- Miles L., Kapos V. 2008. Reducing Greenhouse Gas Emissions from Deforestation and Forest Degradation: Global Land-Use Implications // *Science*. V.320. P. 1454–1455.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC. 154 p.  
(<http://www.millenniumassessment.org/ru/index.aspx>)
- Minkinen K., Laine J., Shurpali N.J., Makiranta P., Alm J., Penttila T. 2007. Heterotrophic soil respiration in forestry-drained peatlands // *Boreal Environment Research*. V.12. P.115-126.
- Myneni R.B., Dong J., Tucker C.J. et al. 2001. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests // *PNAS*. V.98. N.26. P.14784–14789.
- Nabuurs G.J., Masera O., Andrasko K. et al. 2007. *Forestry*. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nair U.S. 2009. Preferential formation of cumulus clouds over native vegetation in southwest Australia // *Journal of Earth Science Phenomena*, 2009, 11.  
(<http://www.esphenomena.org/content/preferential-formation-cumulus-clouds-over-native-vegetation-southwest-australia>)
- NEESPI. 2004 a. The Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative. Science Plan. 3.1. Terrestrial Ecosystem Dynamics. <http://www.neespi.org/>
- NEESPI. 2004 b. The Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative. Science Plan. 3.2. Biogeochemical Cycles. <http://www.neespi.org/>
- NEESPI. 2004 c. The Northern Eurasia Earth Science Partnership Initiative. Science Plan. 3.4. Land Use Interactions: Societal-Ecosystem Linkages.  
<http://www.neespi.org/>
- Nemani R.R., Keeling C.D., Hashimoto H. et al. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 // *Science*. V.300. N.5625. P.1560 – 1563
- Nepstad D.C. 2007. *The Amazon's Vicious Cycles*. WWF. 24 p.
- Nepstad D.C., Stickler C. M., Soares-Filho B., Merry F. 2008. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, V. 363, No. 1498, pp. 1737-1746.
- Olsson L., Eklundh L., Ardo J. 2005. A recent greening of the Sahel—trends, patterns and potential causes // *Journal of Arid Environments*. V.63. P.556–566.
- Oyama M.D., Nobre C.A. 2003. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America // *Geophys. Res. Letters*. V.30. N.23. (4 p.) 2199,  
doi:10.1029/2003GL018600.
- Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., Stringer L. (Eds.) 2008. *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: main report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen. 206 p.

- Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P. et al. 2007: Technical Summary. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Payments for ecosystem services getting started: a primer. 2008. Forest Trends, The Katoomba Group, UNEP. 74 p. (<http://www.unep.org>)
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // *Nature*. V.399. 3 June. P.429-436.
- Pielke R A Sr, Walko R.L., Steyaert L.T., Vidale P.L. et al. 1999. The influence of anthropogenic landscape changes on weather in South Florida // *Monthly Weather Review*. American Meteorological Society. V.127. July. P.1663-1673.
- Pielke R.A. Sr., Marland G., Betts R.A. et al.2002. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*. V.360. P.1705-1719.
- Pielke R.A. Sr., Beltran-Przekurat A., Hiemstra C.F. et al. 2006. Impacts of regional land use and land cover on rainfall: an overview // *Climate Variability and Change—Hydrological Impacts*. Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006. IAHS Publ.308.
- Phillips O.L., Aragao L., Lewis S.L. et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest // *Science*. 2009. V. 323. P. 1344–1347.
- Ping C.L., Michaelson G.J., Kimble J.M. et al. 2008. Cryogenesis and soil formation along a bioclimate gradient in Arctic North America // *Journal of Geophys. Res*. V.113. G03S12. 14 p. doi:10.1029/2008JG000744.
- Post E., Forchhammer M.C., Bret-Harte M.S. et al. 2009. Ecological dynamics across the Arctic associated with recent climate change // *Science*. V.325. 11 September. P.1355-1358.
- Postel S. 2008. The forgotten infrastructure: safeguarding freshwater ecosystems // *Journal of International Affairs*. V. 61. № 2. P.75–90.
- Postel S., Thompson B.H. 2005. Watershed protection: capturing the benefits of nature's water supply services // *Natural Resources Forum*. V. 29. P. 98–108.
- Renssen H., Goosse H., Fichet T. 2003. On the non-linear response of the ocean thermohaline circulation to global deforestation // *Geophys. Res. Lett*. V.30. N 2. P. 1061.
- Rodrigues A.S.L., Ewers R.M., Parry L., Souza C.Jr., Veríssimo A., Balmford A. 2009. Boom-and-bust development patterns across the Amazon deforestation frontier // *Science*. V.324. 12 June. P.1435-1437.
- Ruddiman W. 2003. The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago // *Climatic Change*. V. 61. N 3. P.261-293
- Scheffer M., Carpenter S., Foley J.A., Folke C., Walker B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems // *Nature*. V.413. 11 October. P.591-596.
- Scheffer M., Carpenter S.R. 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation // *Trends in Ecology and Evolution*. V.18. N.12. P.648-656.

- Scholes R.J., Monteiro P.M., Sabine C.L., Canadell J.G. 2009. Systematic long-term observations of the global carbon cycle // *Trends Ecol Evol.* V.24. N.8. P.427-430.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2003. Interlinkages between biological diversity and climate change. Advice on the integration of biodiversity considerations into the implementation of the United Nations Framework Convention on Climate Change and its Kyoto protocol. Montreal, SCBD, 154p. (CBD Technical Series no. 10).
- Shkolnik I.M., Nadyozhina E.D., Pavlova T.V., Molkentin E.K., Semioshina A.A. 2010. Snow cover and permafrost evolution in Siberia as simulated by the MGO regional climate model in the 20th and 21<sup>st</sup> centuries // *Environ. Res. Lett.* V.5 015005. 8 p.
- Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.P. et al. 2008. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implications for the global carbon cycle // *BioScience.* V.58. N.8. P.701-714.
- Smith L.C., MacDonald G.M., Velichko A.A. et al. 2004. Siberian Peatlands a Net Carbon Sink and Global Methane Source Since the Early Holocene // *Science.* V.303. 16 January. P.353-356.
- Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F. et al. 2007. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations // *Global and Planetary Change.* V.56. N.3-4. P.274-296.
- Sohngen B., Andrasko K., Gytarsky M. et al. 2005. Stocks and flows. Carbon inventory and mitigation potential of the Russian forest and land base. World Resources Institute. 52 p. <http://pubs.wri.org>
- Solomon S., Qin D., Manning M. et al. 2007. Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Stone R. 2008. Have desert researchers discovered a hidden loop in the carbon cycle? // *Science.* V.320. N.5882. P.1409-1410.
- Szeto K.K., Liu J., Wong A. 2008. Precipitation recycling in the Mackenzie and three other major river basins // *Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience.* V.1: Atmospheric Dynamics. Springer Berlin Heidelberg . P.137-154.
- Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al. 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*, V.23. GB2023. doi:10.1029/2008GB003327. 11 p.
- Tchebakova N.M., Parfenova E., Soja A.J. 2009. The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate // *Environ. Res. Lett.* V.4. 045013. 9 p. doi:10.1088/1748-9326/4/4/045013
- The state of food and agriculture. Biofuels: prospects, risks and opportunities. 2008. Rome: FAO. 128 p.
- UN OCHA. UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. 2009. Climate change – campaign toolkit.
- Vygodskaya N.N., Groisman P.Y., Tchebakova N.M., Kurbatova J.A., Panforyov O.,

- Parfenova E.I. Sogachev A.F. 2007. Ecosystems and climate interactions in the boreal zone of northern Eurasia // *Environ. Res. Lett.* V.2. 045033. 7p.
- Wagner D., Liebner S. 2009. Global warming and carbon dynamics in permafrost soils: methane production and oxidation // *Permafrost Soils. Soil Biology.* V.16. R. Margesin (ed.). Springer Berlin. P. 219-236.
- Walther G.-R., Post E., Convey P. et al. 2002. Ecological responses to recent climate change // *Nature.* V.416. 28 March. P.389-395
- Walter K.M., Smith L.C., Chapin III F.S. 2007. Methane bubbling from northern lakes: Present and future contributions to the global methane budget // *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A.* V.365. P.1657– 1676.
- Wang G., Eltahir E.A.B. 2000. Ecosystem dynamics and the Sahel drought // *Geophys. Res. Letters.* V.27. N.6. P.795-798.
- Whiting G.J., Chanton J.P. 2001. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration // *Tellus.* V.53B. P.521–528.
- Wise use of mires and peatlands – background and principles including a framework for decision-making. 2002. International Mire Conservation Group and International Peat Society. Saarijärven Offset Oy, Saarijärvi, Finland. 304 p.
- Yu-shi M., Datong N., Guang X., Hongchang W., Smil V. 1997. An assessment of the economic losses resulting from various forms of environmental degradation in china. Cambridge: American Academy of Arts and Sciences and the University of Toronto. (<http://www.library.utoronto.ca/pcs/state/china.htm>).
- Zhou L., Tucker C.J., Kaufman R.K. 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 // *Journal of geophys. Res.* V.106. N.D17. P.20069-20083.
- Zhuang Q., Melillo J.M., Kicklighter D.W. et al. 2004. Methane fluxes between terrestrial ecosystems and the atmosphere at northern high latitudes during the past century: A retrospective analysis with a process-based biogeochemistry model // *Global Biogeochem. Cycles.* V.18. GB3010.