

## Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода

Е. А. ВАГАНОВ, Э. Ф. ВЕДРОВА, С. В. ВЕРХОВЕЦ, С. П. ЕФРЕМОВ, Т. Т. ЕФРЕМОВА,  
В. Б. КРУГЛОВ\*, А. А. ОНУЧИН, А. И. СУХИНИН, О. Б. ШИБИСТОВА

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
660036 Красноярск, Академгородок*

*\* Красноярский государственный университет  
660041 Красноярск, просп. Свободный, 79*

### АННОТАЦИЯ

Изложены результаты измерений и расчета параметров углеродного бюджета лесов и болот Сибири. Дана характеристика зональной изменчивости запасов (и прироста запасов) углерода в лесных и болотных экосистемах, приведены результаты прямых измерений потоков углекислоты методом микровихревых пульсаций, дана оценка неопределенности, вносимой в расчет параметров углеродного бюджета лесными пожарами.

### ВВЕДЕНИЕ

Для средних и высоких широт Северного полушария леса и болота являются доминирующими типами растительного покрова. В данной работе приведены результаты изучения роли лесов и болот Сибири в глобальном цикле углерода, а также намечен ряд направлений дальнейших исследований. Формируемые лесами и болотами Сибири запасы и потоки углерода составляют весомую долю от его глобальных запасов и потоков, что объясняется, прежде всего, величиной территории Сибири (около 10 млн км<sup>2</sup>).

Углеродный цикл занимает особое место в проводимых в настоящее время лесозоо- и климатологических исследованиях, поскольку существование растений, этих временных хранилищ углерода, невозможно без поглощения его из атмосферы и последующего возвращения; с другой стороны, именно соединения углерода, являясь основными химическими компонентами естественных и антропогенных выбросов, определяют парниковый эффект. Леса и болота Сибири, с точки

зрения их участия в глобальном цикле углерода, имеют ряд особенностей: 1) характерные для Сибири древостои (с преобладанием пяти хвойных пород), а также лесоболотные и болотные экосистемы обеспечивают долгосрочную консервацию углерода; 2) большая часть лесов Сибири расположена в зоне распространения вечной мерзлоты, что, с одной стороны, определяет низкие величины продуктивности (по запасу около 100 м<sup>3</sup>/га, текущему приросту - 1,27 м<sup>3</sup>/га в год), с другой - дополнительные возможности консервации углерода в почве; 3) большая часть лесов Сибири подвержена периодическому влиянию пожаров (с разной частотой в разных таежных подзонах) [1], что может существенно сдвигать углеродный баланс в сторону эмиссии углеродсодержащих газов в атмосферу.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сказанное выше объясняет значительный интерес научной общественности к изучению

углеродного цикла на лесных и болотных территориях Сибири. В настоящее время более 20 международных проектов направлено на решение названной проблемы. Используемые при реализации этих проектов методы условно можно разделить на прямые и косвенные, наземные и дистанционные, а также определить часть методов как комбинированные (т. е. использующие кроме данных прямых измерений модели, позволяющие рассчитать трудно- или неизмеряемые характеристики цикла).

Прямые методы заключаются в прямом (неопосредованном) измерении параметров углеродного цикла. Так, например, традиционные измерения содержания углерода в наземной и подземной частях экосистем, в подстилке и разных почвенных горизонтах, в детрите, в потоке воды, выносящей углеродсодержащие компоненты из экосистемы, являются прямыми.

Прямыми являются камерные методы измерения дыхания (стволового, почвенного и др.), а также метод микровихревых пульсаций (eddy-covariance), используемый для

измерения концентраций и потоков углекислоты и других углеродсодержащих парниковых газов вдоль вертикального профиля экосистем. Метод микровихревых пульсаций требует установки специальных мачт (с высотой немного или значительно выше полога древостоя), оснащенных расположенным вдоль мачты комплексом газоанализаторов [2-8].

Особое значение в этой группе методов имеют измерения потоков углеродсодержащих газов, производимые на высотных (до 300 м) мачтах (рис. 1) [9]. Поверхностный слой атмосферы, простирающийся примерно от 0 до 200 м над земной поверхностью, характеризуется турбулентным движением, вызванным влиянием трения воздушных потоков о неровности на земной поверхности. Динамика лежащего выше слоя (200-2000 м над земной поверхностью) определяется влиянием сильного конвекционного смешивания в течение дня и отсутствием турбулентности (и разрушения слоя) в течение ночи. Этот слой называют слоем смешивания. Большая амплитуда дневного цикла сигналов углерода в пределах поверхностного слоя в слое сме-

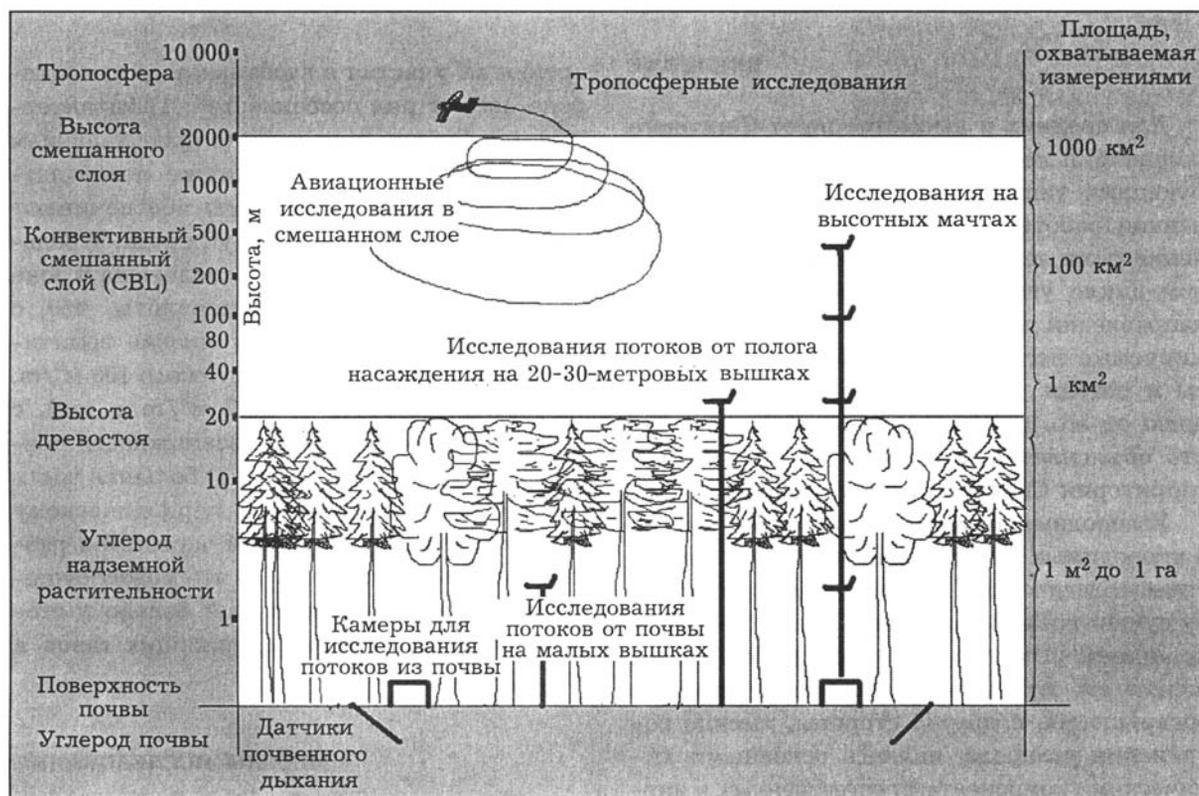


Рис. 1. Система измерений газовых потоков между наземными экосистемами и атмосферой.

шивания сглаживается и ослабляется. Поэтому смешивание внутри слоя, лежащего над поверхностным, является эффективным интегратором как дневных циклов сигналов углерода, так и мелкомасштабных неоднородностей экосистемы, что позволяет не только точно измерять газовый и аэрозольный составы и их динамику по вертикальному профилю, но и рассчитывать интегрированные на территории охвата высотной мачты (около 40 тыс. км) обменные потоки углеродсодержащих газов.

В состав приборного комплекса высотной мачты входят ряд основных метеорологических приборов, полуавтоматизированные системы измерения абсолютных концентраций  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и отбора образцов воздуха для анализа соотношения стабильных изотопов  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  в  $\text{CO}_2$ ,  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  в  $\text{N}_2\text{O}$ . Соотношения изотопов позволяют дифференцировать процессы эмиссии и стока углерода. Например, угарный газ несет информацию об антропогенных эмиссиях, потому что одним из основных его источников является неполное сгорание ископаемых горючих материалов.

Измерения концентраций фракций  $\text{CO}_2$  с различным изотопным составом углерода и кислорода позволяют разделить потоки океанического и наземного углерода [10]. Ключом к разделению наземных и океанических углеродных потоков является сильный контраст в количестве тяжелых изотопов углерода в  $\text{CO}_2$ , поглощаемом при наземном фотосинтезе (во время  $\text{C}_3$  фотосинтеза), по сравнению с океаническим. Измерения соотношения  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  в атмосферном  $\text{CO}_2$  помогают оценить интенсивность дыхания наземных экосистем [11]. Моделирование показало, что дыхание и испарение являются основными факторами, отвечающими за пространственные и сезонные изменения содержания  $\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$  в атмосфере [12, 13]. Наблюдения за метаном помогают лучше понять связь между климатом и растительным покровом, так как тренды по метану и его изотопу  $^{14}\text{CH}_4$  являются показателями изменений в дыхании торфяных болот и вечномёрзлых почв.

Строительство высотной мачты в районе среднетаежных лесов (пос. Зотино, Красноярский край) обеспечит проведение измерений энерго- и массообменных характеристик

в режиме реального времени с высоким временным разрешением и оценкой влияния метеорологических условий на обменные процессы.

Исследование параметров углеродного цикла в масштабах всей Сибири вследствие огромности ее территории и труднодоступности многих ее областей невозможно без использования дистанционных методов, исходным этапом которых является получение космических снимков территорий в различных спектральных интервалах. Должная интерпретация космоснимков позволяет провести определение видового состава, возраста насаждений, запасов фитомассы и других характеристик лесных экосистем на больших площадях.

Один из наиболее разработанных подходов к выяснению роли лесов России в глобальном цикле углерода заключается в расчете полного углеродного бюджета лесов с использованием данных периодической лесной инвентаризации. Этот подход можно классифицировать как комбинированный, поскольку в его рамках данных лесной инвентаризации недостаточно и приходится вводить теоретические предположения о значениях некоторых параметров углеродного бюджета, а также привлекать модели, учитывающие возрастной и видовой состав лесных экосистем в различных физико-географических районах. Полный углеродный бюджет лесов России рассчитан в совместной работе российских лесных исследовательских учреждений с Институтом прикладного системного анализа (Австрия). В процессе работ создана специальная информационная база, включающая пространственную интегральную земельную информационную систему. В состав информационной системы входит многослойная ГИС (ландшафты, почвы, растительность, леса, землепользование и др.), соответствующие атрибутивные базы данных (фитомасса, гетеротрофное дыхание, нарушения земель и лесов и т. д.), составленные на основе специальных исследований и инвентаризации лесного фонда, а также ряда вспомогательных моделей [14-16].

Даже самые тщательные измерения и оценки параметров углеродного цикла будут малоценными, если их не увязать между собой в рамках целостного описания фун-

кционирования исследуемых экосистем. Сведение воедино некоторого минимального (но обеспечивающего необходимую полноту описания) набора как прямых, так и косвенных измерений параметров углеродного цикла возможно только в рамках интегрированных моделей (разных пространственных масштабов). Адекватная модель функционирования экосистемы не только связывает полученные разными методами данные измерений, но и способна указать на те процессы, оценки вклада которых имеют наибольшие погрешности. Так, для лесов Сибири одним из основных факторов, приводящих к большой неопределенности в описании цикла углерода, является неточность в оценке его эмиссии вследствие лесных пожаров [17-20]. Существенная вариабельность горимости лесных территорий в отдельные годы в Сибири (от 1 до 10 млн га) значительно изменяет баланс между аккумулярованием и эмиссией углерода [21].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Пространственная изменчивость запасов углерода в лесных экосистемах вдоль Енисейского меридиана*

В течение нескольких лет сотрудники Института леса СО РАН проводили комплексные исследования структуры лесных экосистем Енисейского трансекта, решая задачи оценки их разнообразия и состава, выделения динамических составляющих сукцессионного процесса, а также определения отдельных параметров углеродного, азотного и водного кругооборотов [22]. Наличие на территории трансекта всех подзон бореальных лесов позволяет связать показатели запасов и годичной продуктивности фитомассы, скорости разложения органики, гетеротрофного дыхания, запасов детрита, частоты и интенсивности лесных пожаров, а также потенциальные оценки эмиссии углерода при пожарах и в процессе послепожарной сукцессии с распределением ведущего климатического фактора - температурного режима. Широкие закономерности в лесах Енисейского меридиана можно рассматривать как пространственный аналог изменения структуры растительного покрова при существенных

изменениях климата, например смещения лесорастительных зон при потеплении [1, 23].

Величины запасов фитомассы древостоев и напочвенного покрова показывают закономерные изменения вдоль меридиана и хорошо согласуются с изменениями среднегодовой температуры (равно как и длительности вегетационного периода) [22]. Увеличение запасов стволовой древесины в лесах средней и южной тайги по сравнению с северной тайгой происходит параллельно уменьшению фитомассы напочвенного покрова (мохов, лишайников, трав и мелких кустарников). В более северных экосистемах вклад напочвенного покрова в формирование годичной продукции экосистемы или соизмерим, или превосходит вклад стволовой древесины [24].

Пул углерода в органическом веществе почвенного покрова (в слое почвы, эквивалентном мощности органогенного горизонта и минеральной толщии 0-50 см) лесотундры и бореальных лесов Енисейского меридиана составляет в среднем  $114 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$  и распределяется между лесотундрой, северной, средней и южной тайгой как 17, 23, 39 и 21 %, соответственно. На долю стабильного гумуса приходится  $60,5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ , в подвижном органическом веществе ( $C_{\text{пов}}$ ) сосредоточено  $33,4 \text{ т С га}^{-1}$  и в фитодетрите на поверхности и в толще почвы -  $19,8 \text{ т С га}^{-1}$  (рис. 2).

Максимальной аккумуляцией подвижного и стабильного углерода характеризуется верхний слой почв 0-20 см (табл. 1). По отношению к запасу углерода в этой части профиля почв легкоминерализуемая фракция органического вещества составляет 40 %. С учетом аккумулярования углерода в подстилке доля фракции увеличивается до 50 % общего запаса углерода. В ее составе  $19,8 \text{ т С га}^{-1}$  приходится на углерод фитодетрита, активно участвующего в обменных процессах между фитомассой, гумусом почвы и атмосферой, а  $21,3 \text{ т С га}^{-1}$  составляет ближайший резерв почвенного органического вещества для вовлечения в биокруговорот и возможного быстрого использования при изменении условий окружающей среды, контролирующих соотношение процессов минерализации и гумификации при разложении. Отношение запасов углерода в фитодетрите и в подвижном органическом веществе почвы как ближайшем резерве для использования при из-

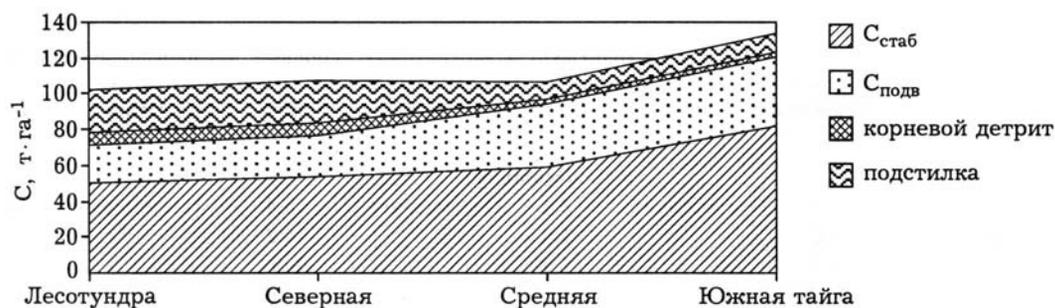


Рис. 2. Запасы углерода в компонентах органического вещества почвы.

менении экологического состояния среды уменьшается от лесотундры к южным бореальным лесам в 5 раз. Отношение запасов  $C_{\text{фитомасса}}/C_{\text{фитодетрит}}$  в широтном диапазоне увеличивается в 6 раз; запас углерода гумуса в минеральной толще почв (0-50 см) изменяется от 72 до 121 т · га<sup>-1</sup>.

В широтном диапазоне четко обозначается максимум запасов фитодетрита в древостоях хвойных видов лесотундры и северной тайги (табл. 2). Наличие вечной мерзлоты, высокое стояние в почвенном профиле фронта мерзлоты, медленное и неглубокое опускание фронта в течение вегетации, низкие температуры и высокая влажность почвы обуславливают формирование специфичной напочвенной растительности - мощного, часто сплошного покрова из зеленых мхов (ро-

дов *Pleurozium*, *Hylocomium*, *Politrichum*) и кустистых лишайников (родов *Cladonia*, *Cladina*, *Cetraria*). Их медленное разложение из-за значительного содержания устойчивых соединений (лигноцеллюлозный комплекс, клетчатка и др.) приводит к накоплению на поверхности почвы в разной степени разложившихся остатков мхов (лишайников), запасы которых в десятки раз превышают массу остатков древесного опада. Криотурбации почвенной массы под воздействием криогенных явлений (пучение, морозобойная трещиноватость и др.) приводят к увеличению массы детрита в верхней минеральной толще почв.

Увеличение запаса фитодетрита к югу от средней тайги связано с изменением состава лесообразователей, повышением продуктив-

Т а б л и ц а 1  
Аккумуляция углерода в почвах лесных экосистем Енисейского меридиана, т · га<sup>-1</sup>

Растительные зоны и подзоны	Фитодетрит		
	на почве	в слое почвы (0-20 см)	всего
Лесотундра	23,4	7,7	31,1
Северная тайга	23,8	6,8	30,5
Средняя »	9,8	2,3	12,1
Южная »	10,7	2,2	12,9
Среднее для территории, т · га <sup>-1</sup>	15,6	4,3	19,8

	Гумус почвы				итого	всего
	0-20 см		0-50 см			
	$C_{\text{пов}}$	$C_{\text{стаб}}$	$C_{\text{пов}}$	$C_{\text{стаб}}$		
Лесотундра	17,5	40,4	21,4	51,4	71,8	102,9
Северная тайга	18,5	42,8	33,4	54,1	87,5	118,0
Средняя »	23,3	35,3	36,3	58,9	95,2	107,3
Южная »	24,0	44,7	39,2	81,8	121,0	133,9
Среднее для территории, т · га <sup>-1</sup>	21,3	39,6	33,4	60,5	93,9	113,8

Запасы фитодетрита в экосистемах основных лесообразователей, С, т · га<sup>-1</sup>

Компонент	Лиственница	Сосна	Кедр	Пихта	Ель	Осина	Береза
<i>Лесотундра</i>							
Подстилка	20,7	Отсутствует	3,4	Отсутствует	18,4	Отсутствует	10,1
Корневой детрит	7,6		1,0		15,2		1,9
Валеж	3,2		2,9		5,0		0,2
Всего	31,5		7,3		18,6		12,2
<i>Северная тайга</i>							
Подстилка	22,4	13,3	7,2	Отсутствует	18,1	Отсутствует	3,9
Корневой детрит	6,9	8,0	1,5		14,7		0,9
Валеж	3,5	2,2	6,7		5,8		0,4
Всего	32,8	23,5	15,4		38,6		5,2
<i>Средняя тайга</i>							
Подстилка	9,0	6,2	4,3	1,8	7,0	2,6	3,2
Корневой детрит	2,5	4,4	1,6	1,0	3,8	1,6	0,7
Валеж	3,7	2,4	5,0	4,1	5,2	1,7	1,2
Всего	15,2	13,0	10,9	6,9	18,0	5,9	5,1
<i>Южная тайга</i>							
Подстилка	6,9	6,0	5,8	8,0	8,6	2,7	3,4
Корневой детрит	1,7	1,5	2,5	5,7	4,0	1,9	0,7
Валеж	10,2	7,0	5,6	4,5	5,9	1,9	1,1
Всего	18,8	14,5	13,9	18,2	18,5	6,5	5,2

ности лесов и, как следствие, массы ежегодного опада. Кроме того, южно-таежные леса характеризуются повышенными запасами мертвой древесины (валежа, пней).

В экосистемах всех лесообразующих пород до V класса возраста древостоев распределение компонентов фитодетрита, согласно их запасам, имеет вид: подстилка > корневой детрит > стволовая древесина. Преобладание перестойных древостоев приводит к накоплению детрита за счет медленно разлагающегося стволового опада. Последнее наглядно проявляется в южно-таежных лиственничниках, сосняках и ельниках (см. табл. 2).

Суммарное аккумуляирование углерода в лесных экосистемах лесотундры и таежной зоны Енисейского меридиана ( в блоках "растительности" и "почвы") составляет около 16 млрд т (156 т С га<sup>-1</sup> лесопокрытой территории), в т.ч. на надземную и подземную фитомассу приходится 26 %, остальное аккумуляировано в органическом веществе верхней 50-сантиметровой толщи почв (39 и 13 % соответственно в стабильном гумусе и подвижном гумусовом веществе и 22 % - в фитодетрите). Подобным соотношением харак-

теризуются лесные экосистемы Нидерландов [25, 26]: 113; 59 и 19 т С га<sup>-1</sup> соответственно в гумусе, фитомассе и мертвых растительных остатках, Финляндии [27]: 34 т С га<sup>-1</sup> в фитомассе и 72 в толще 0-17 см; США [28]: 59 % в почве, 31 - в фитомассе и 9 % в растительных остатках на поверхности почвы.

Запасы углерода в обоих блоках нарастают в меридиональном направлении, характер перераспределения пулов между ними изменяется при переходе от лесотундры к северной тайге: отношение  $C_{\text{soil}}/C_{\text{phytomass}}$  уменьшается с 4,8 до 2,9 и остается одинаковым в экосистемах средней и южной тайги - 2,6 и 2,4 соответственно. По данным А.И. Уткина с соавторами [29], отношение  $C_{\text{soil}}/C_{\text{phytomass}}$  для подзон макрорегионов Западная и Восточная Сибирь составляет 3,3. Из оценок А. Shvidenko, S. Nilsson [16] следует, что это отношение на лесопокрытой территории России изменяется как 6,8, 2,4 и 2,8 соответственно в лесотундре и северотаежных лесах, средней и южной тайге.

Интенсивность минерализационного потока углерода в атмосферу практически на 90 % обусловлена разложением фитодетри-

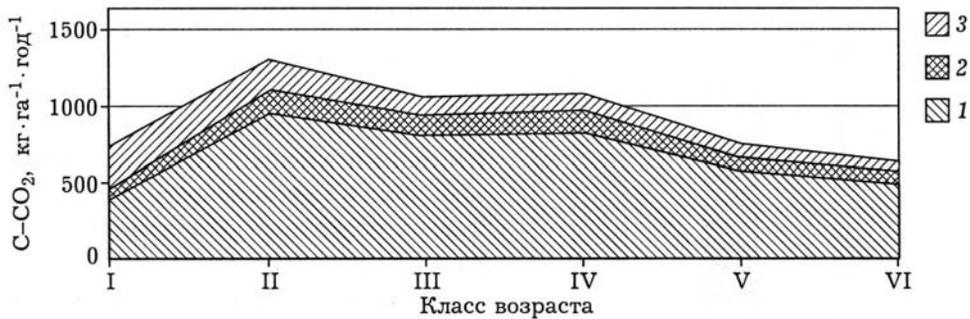


Рис. 3. Участие фитодетрита (1), "молодого" гумуса (2) и подвижного гумуса почвы (3) в формировании потока углерода в атмосферу (на примере сосняка южной тайги).

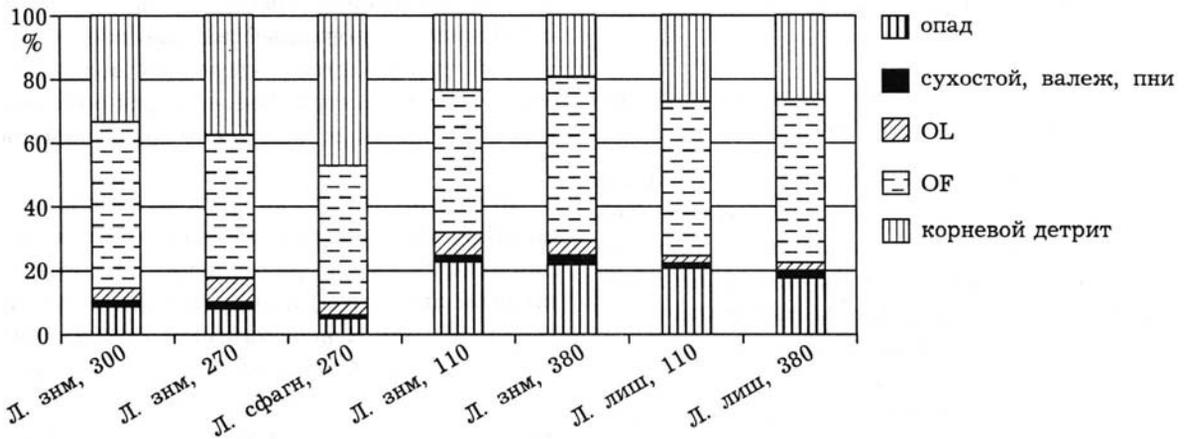


Рис. 4. Вклад компонентов фитодетрита в формирование потока  $C-CO_2$  в атмосферу (лесотундра и северная тайга).

та (рис. 3-4). При этом от 68 % (в южной тайге) до 87 % (в лесотундре) его эмиссия формируется при разложении подстилки. Вклад корневого детрита не превышает 11 - 17 %, участие стволового опада нарастает от лесотундры и северной тайги к средней и южной - от 2-3 до 14-17 %. Минерализация гумуса почвы в экосистемах южной тайги составляет от 3 до 13 %, в северных лесах - от 2 до 6 %. По пути гумификации в южно-таежных лесах уходит 2-5 %, в лесотундре и лиственничниках северной тайги - 0,1-0,2 % запаса разлагающегося детрита.

Полученные в экспериментах показатели скорости разложения фитодетрита, усредненные для лесорастительных зон и подзон Енисейского меридиана, приведены в табл. 3. За период со среднесуточной температурой воздуха выше  $5^\circ C$  удельная скорость разложения фитодетрита в направлении от лесотундры к южной тайге увеличивается в 3 раза (от 0,4 до 1,1  $мг\ C \cdot г^{-1} \cdot сут^{-1}$ ).

Формирующиеся лесные экосистемы (древостои I-II классов возраста) основных лесообразователей Сибири, южно-таежные сосняки и березняки, экосистемы лиственницы

Т а б л и ц а 3

Показатели скорости разложения фитодетрита

Зона и подзона	Лесная подстилка		Корневой детрит	
	$k, год^{-1}$	$T_{1/2}, лет$	$k, год^{-1}$	$T_{1/2}, лет$
Лесотундра, $n = 41$	$0,035 \pm 0,002$	20	$0,036 \pm 0,003$	17
Северная тайга, $n = 35$	$0,046 \pm 0,004$	15	$0,048 \pm 0,007$	14
Средняя », $n = 49$	$0,089 \pm 0,007$	8	$0,072 \pm 0,007$	10
Южная », $n = 44$	$0,211 \pm 0,024$	3	$0,085 \pm 0,011$	8

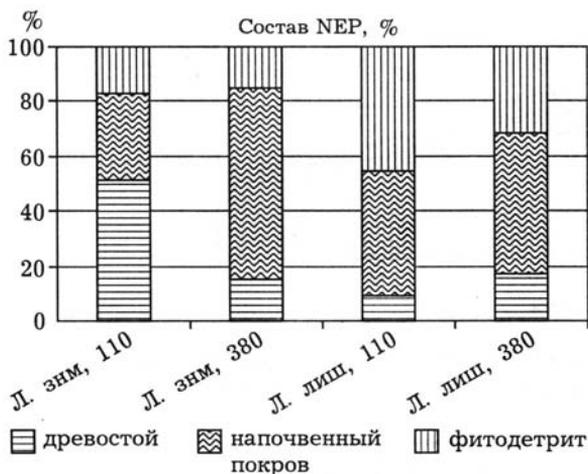


Рис. 5. Чистая экосистемная продукция лиственничников северной тайги.

северной тайги служат стоком для углерода атмосферы. Преобладание перестойных древостоев в составе южно-таежных лиственничников обуславливает их оценку на лесопокрываемой площади подзоны как экосистем с отрицательным балансом продукционных и деструкционных процессов углеродного цикла (источник С в атмосферу). Для экосистем лесотундры установлена сбалансированность интенсивностей продукционных и деструкционных процессов.

Сток углерода (чистая экосистемная продукция) в формирующиеся лесные экосистемы составляет от 50 до 70 % углерода чистой первичной продукции (NPP) и складывается из аккумуляции в фитомассе (73-78 % от величины NEP), консервации в фитодетрите (6-20 %) и гумусе почвы (5-18 %). Южно-таежные сосняки и березняки являются стоком для 16 % фотосинтетической ассимиляции углерода атмосферы в чистой первичной продукции. NEP лиственничников северной тайги составляет 30 % чистой первичной продукции. Основная часть стока приходится на напочвенный покров и аккумуляцию в фитодетрите и лишь 9 % - на биомассу древостоя (рис. 5).

### **Прямые измерения потоков углекислоты методом микровихревых пульсаций**

Оценки пространственного и временного распределения стоков и источников углерода в наземных экосистемах могут быть по-

лучены на основе данных регулярного вертикального зондирования атмосферы [30, 31]. Измерения вертикальных профилей концентрации углекислоты, метана и стабильных изотопов позволяют охарактеризовать сезонный цикл и интенсивность газообмена между земной поверхностью и атмосферой в региональном масштабе [3-5].

Одним из наиболее широко используемых подходов для измерения чистого обмена углекислоты между отдельной экосистемой и атмосферой является микрометеорологический метод микровихревых пульсаций (eddy covariance), основанный на анализе особенностей турбулентного переноса воздушных масс - микровихрей ("eddies") для определения вертикальных компонент воздушных потоков [32-34].

Несмотря на строгие требования к использованию метода (относительная гомогенность ландшафта, высота размещения сенсоров над пологом древостоя) и корректировке данных [2, 33, 35, 36], к неоспоримым преимуществам метода относят возможность непрерывных измерений при сохранении целостности экосистемы, а также высокое разрешение и сглаживание мелкомасштабных флуктуаций потоков. Данный подход позволяет оценить закономерности влияния климатических параметров на поведение экосистемы.

Поскольку метод микровихревых пульсаций регистрирует интегрированные потоки CO<sub>2</sub> между экосистемой и атмосферой, одной из основных проблем, возникающих при оценке отдельных составляющих углеродного обмена, является сложность интерпретации баланса между фотосинтетической ассимиляцией и высвобождением углекислоты в ходе дыхания [37]. Поэтому в качестве одного из альтернативных подходов, позволяющих дать количественную оценку величины потоков CO<sub>2</sub> отдельных компонентов экосистемы (фотосинтеза, дыхания почвы, стволов, кроны), а также регистрировать временную и пространственную вариабельность показателей, используется метод газообменных камер.

Непрерывные исследования углеродного баланса лесной экосистемы проводятся в южной подзоне средней тайги (60°45' с.ш., 89°23' в.д.) с 1998 г. Измерительная система установлена в одновозрастном (200-летнем) однородном сосновом древостое V класса бони-

тета, произрастающем на песчаных почвах. Средняя высота деревьев 22 м, площадь сечения 30 м/га, индекс листовой поверхности 1,5 от проективного покрытия, сомкнутость 0,7.

В напочвенном покрове доминируют лишайники родов *Cladina* spp., *Cladonia* spp. Травяно-кустарничковый ярус представлен в основном *Vaccinium vitis-idaea* (L.) Avror., участие зеленых мхов и *Vaccinium myrtillus* (L.) крайне незначительно.

Потоки  $\text{CO}_2$ , тепла и влаги наряду с основными микрометеорологическими параметрами измеряли непрерывно на высоте 27 м (в 5 м над средней поверхностью кроны). Эмиссию  $\text{CO}_2$  из почвы регистрировали при помощи дополнительной системы микровихревых пульсаций, установленной в 2,5 м над поверхностью почвы. Концентрацию  $\text{CO}_2$ , локализованного в кроне и пространстве между поверхностью почвы и вершиной 27-метровой вышки, определяли, используя профильную систему забора воздуха, на высоте 0,1, 1,0, 2,5, 4,0, 8,0, 10,0, 16,0 и 24,0 м. Дыхание стволов измеряли, используя модификацию метода открытой камеры [38].

Фотосинтетическая активность в экосистеме наблюдалась с начала мая до конца сентября. В течение продолжительного осенне-зимнего периода древостой трансформировался в слабый источник  $\text{CO}_2$  в атмосферу (интенсивность потока углекислоты составляла в среднем  $0,05 \text{ моль С} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут}^{-1}$  [6, 7].

В целом, в течение вегетационного сезона исследуемая экосистема представляла собой "сток"  $\text{CO}_2$ , причем аккумулирующая активность (до  $0,4 \text{ моль С} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут}^{-1}$ ), несмотря на меньший индекс листовой поверхности, была достаточно высокой и вполне сравнимой со значениями, характерными для бореальных лесов Европы и Канады [8, 36, 39].

Величина валовой первичной продукции (GPP) исследуемого древостоя была существенно меньшей в сравнении с лесами Европы: например, величин GPP порядка 100, 85 и  $126 \text{ моль С} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$ , приводимых для лесных экосистем Швеции, Финляндии и европейской части России соответственно [40, 41]. Тем не менее этот показатель, варьируя в экспериментах от 46 до  $53 \text{ моль С} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$  [2, 4, 5], был на уровне значений, полученных для лесов Канады:  $(60 \pm 10) \text{ моль С} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$  [42]. Интересно отметить, что коэффициент «затрат» валовой первичной продукции на автотрофное дыхание ( $\phi = 0,64$ ) также соответствовал расчетам, приведенным для хвойных лесов Канады [35, 42].

Анализ интегрированных потоков  $\text{CO}_2$  показал значительную варибельность значений чистого газообмена экосистемы (NEE), представляющего разницу между величинами валовой первичной продукции экосистемы и суммарного дыхания ее компонентов в течение вегетационного периода (рис. 6). Эти флуктуации отражают комплексное воздействие абиотических факторов (фотосинтети-

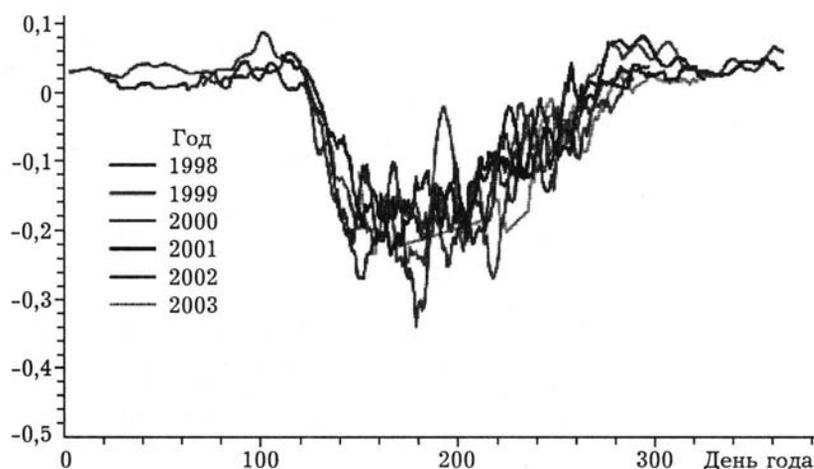


Рис. 6. Углеродный баланс сосняка лишайникового (NEE), измеренный методом микровихревых пульсаций, в период с 1998 по 2003 г. ( $\text{моль С} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут}^{-1}$ ).

чески активной радиации, дефицита упругости водяного пара и температуры воздуха) на активность фотосинтеза [2, 4, 5], которая, кроме того, зависит от времени начала фотоассимилирующей активности древостоя [43]. Интегрированная величина годового чистого газообмена экосистемы варьировала в межгодовом цикле в не столь существенных пределах (от 13 до 15 моль · м<sup>2</sup> · год<sup>-1</sup>).

Считается, что чистый газообмен лесных экосистем определяется в первую очередь интенсивностью дыхания [41]. С этой точки зрения, величина эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы, составляющая по различным оценкам в лесах Сибири до 60-80 % от общего дыхания экосистемы [2, 6, 7, 44, 45], является ключевым компонентом углеродного баланса.

Таким образом, на основании прямых измерений потоков углекислого газа методом микровихревых пульсаций показано, что исследуемый древостой является существенным аккумулятором атмосферного CO<sub>2</sub>. За изуча-

емый период накопление углерода составило в среднем 1,8 т · год<sup>-1</sup> на 1 га лесной площади.

### Расчет полного бюджета углерода лесов России

Определяющими в углеродном бюджете России являются два основных потока - чистая первичная продукция (с плюсом - аккумулярование) и гетеротрофное дыхание (с минусом - эмиссия углерода) [14, 46] (рис. 7). Чистая продукция на 49 % обусловлена продуктивностью зеленых частей фитомассы, при этом около 26 % продукции сосредоточено в надземной древесной массе и около 25 % - в подземной. Гетеротрофное дыхание в основном определяется дыханием почвенного покрова и на 15 % - разложением надземного и подземного детрита. Оценки потоков эмиссии углерода вследствие нарушений в

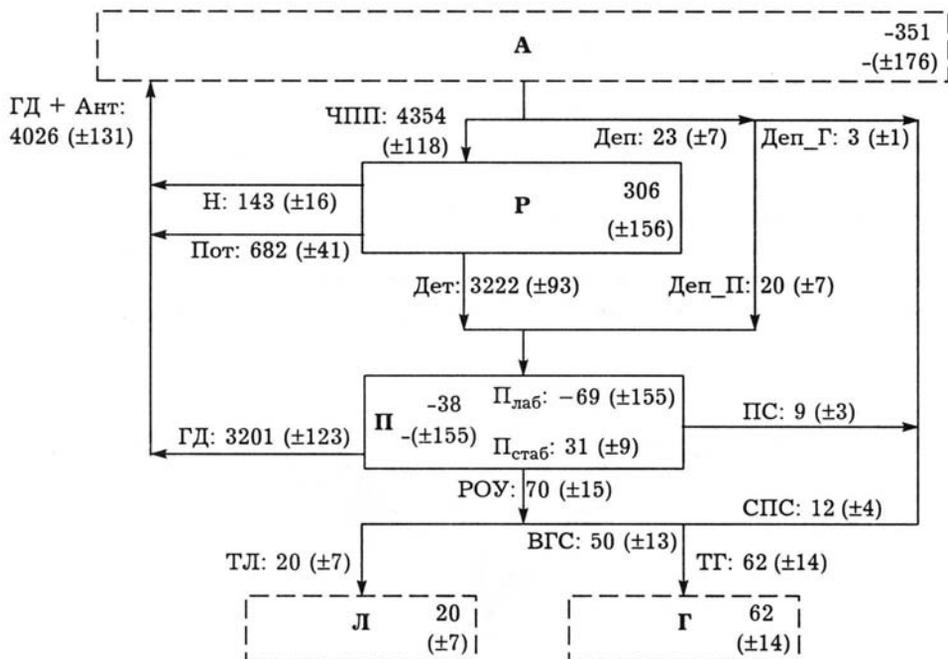


Рис. 7. Полный углеродный бюджет растительных экосистем России (годовые средние потоков и изменения резервуаров за период 1988-1992 гг.). Все величины даны в Тг С · год<sup>-1</sup>. Резервуары: А - атмосфера, Р - растительность, П - почва (разделенная на два резервуара - С лабильного и стабильного органического вещества), Л - литосфера, Г - гидросфера. Потоки: ЧПП - чистая первичная продукция, Деп - сухое и влажное осаждение, ГД - гетеротрофное дыхание, Н и Пот - потоки, обусловленные нарушениями и потреблением растительных продуктов; Дет - детрит; ВТ (водный транспорт С) как сумма поверхностного стока ПС и внутригрунтового стока ВГС; РОУ - растворимый органический углерод; ТЛ и ТГ - С транспорт в атмосферу и гидросферу соответственно. Неопределенности ошибок (в скобках) приведены для доверительной вероятности 0,9.

экосистемах на 37 % определяются пожарами растительности и на такую же величину - биотическими факторами (наиболее значимые - массовые размножения лесных насекомых). Сток углерода в гидро- и литосферу составляет не более 2,2 % от чистой первичной продукции. Это означает, что примерно за 40-45 лет годичный объем органического вещества, усвояемый растительностью в течение года, практически удаляется из биологического кругооборота. Это не столь значительная величина в масштабах характерных времен биологического кругооборота, но значимая - в масштабах геологического времени. Суммирование пулов и потоков дает оценку чистой биомной продукции (поглощения углерода из атмосферы) лесами России в размерах 7,6 % от чистой первичной продуктивности.

Расчет полного углеродного бюджета показал, что в среднем за период 1961-1997 гг. лесные земли России поглощали из атмосферы ( $430 \pm 70$ ) Тг (млн т) углерода в год, из которых треть была обусловлена изменениями земельного покрова. Суммарный поток вследствие нарушений в лесных экосистемах варьировал от 90 до 400 Тг углерода в год. Усредненная по пятилетиям чистая биомная продукция показывает меньшие вариации: от 240 до 320 млн т углерода в год. За период с 1988 по 1992 г. лесные земли России поглощали из атмосферы около ( $240 \pm 70$ ) млн т углерода в год. Сейчас известно, что "управляемая" (лесохозяйственными мероприятиями) часть углеродного бюджета практически ограничена нарушениями и возможными превращениями не покрытых лесом земель в покрытые (лесоразведение и лесовосстановление). Немаловажным результатом оценок полного углеродного бюджета в рамках подхода [14, 46], основанного на использовании лесоинвентаризационных данных, является подтверждение результатов прямых измерений потоков  $\text{CO}_2$  на небольших лесных участках с помощью метода микровихревых пульсаций (см. предыдущий раздел), а именно того, что естественные леса (в массе своей разновозрастные) служат стоком атмосферного углерода.

Оценки полного углеродного бюджета показывают, что: 1) леса России являются в настоящее время огромными резервуарами

дополнительного секвестра углерода, приблизительно 200-600 млн т углерода в год; 2) оцениваемый потенциальный секвестр углерода может быть получен только для значительных территорий и при реализации устойчивого управления лесами; 3) реализация устойчивого управления при целевой функции повышения секвестра углерода требует новой государственной политики в управлении лесным сектором и не противоречит традиционным направлениям деятельности лесного хозяйства, направленным на поддержание высокой продуктивности лесов, усиление защитных функций леса, поддержание разнообразия лесных экосистем и т. д.

***Лесные пожары и эмиссия углерода - основной источник неопределенности в оценке параметров углеродного цикла лесных экосистем Сибири***

Официальная статистика показывает, что в России ежегодно происходит от 20 до 40 тыс. пожаров, поражающих от 2 до 3 млн га лесов и других земель [47]. Обнаружение и борьба с пожарами осуществляются только в так называемых "охраняемых лесах" и на лугопастбищных угодьях. Однако использование спутниковых систем, таких как NOAA/AVHRR и Terra/Aqua/MODIS, ENVISAT/MERIS и Terra/ASTER, повысило эффективность обнаружения пожаров, а также точность оценки пройденных огнем площадей и последствий пожаров в пределах, соответствующих практическим целям [48].

До 80-х гг. прошлого века считалось, что в среднем на территории бывшего СССР ежегодно огнем проходило 1,5 млн га бореальных лесов. Недавние спутниковые изображения показали, что масштабы воздействия пожаров недооценивались. Исследования с применением дистанционного зондирования показали, что в бореальной зоне ежегодно поражалось огнем в среднем 8 млн га, со значительными колебаниями по годам [20]. Например, в 1987 г. по данным спутниковой съемки установлено, что общая площадь бореальных лесов и других угодий, пройденная огнем в Восточно-Азиатских регионах России, составляет примерно 14 млн га [49].

Станции приема спутниковой информации, установленные в Институте леса им. В. Н. Су-

качева СО РАН и СРЦ МЧС, способны принимать и обрабатывать данные двух спутников NOAA/AVHRR и Terra/MODIS. Они обозревают всю азиатскую часть России, что составляет примерно 1 млрд га территории, покрытой растительностью, от Урала на западе до о. Сахалин на Дальнем Востоке. Исследуемая территория включает все типы растительности (лес, тундру, степь и т. д.) [50].

Динамика итоговой площади (а) и числа пожаров (б) на территории азиатской части России по данным космического мониторинга за период 1996-2003 гг. показана на диаграммах рис. 8 [51]. Пожарные сезоны в 2002 и 2003 гг. были особенно катастрофическими в Восточной Сибири [51, 52]. В табл. 4 представлены сравнительные данные о масштабах воздействия пожаров на территории Российской Федерации, полученные из сводок государственных ведомств и из данных дистанционного зондирования.

Очевидны расхождения между данными, полученными на основе наземных или воздушных наблюдений, и результатами космического мониторинга лесных пожаров. При этом данные Авиалесоохраны также не дают полного представления о ситуации.

Нами проведено сопоставление спутниковых данных, полученных различными организациями. Например, сравнение данных Института леса СО РАН о пожарах за 2002 г. по Иркутской области с результатами Института солнечно-земной физики СО РАН свидетельствует об одинаковом уровне плотности пожаров: Красноярская лаборатория обнаружила 882 пожара, которые действовали на 554 665 га, тогда как Иркутская лаборатория зарегистрировала 1055 пожаров,

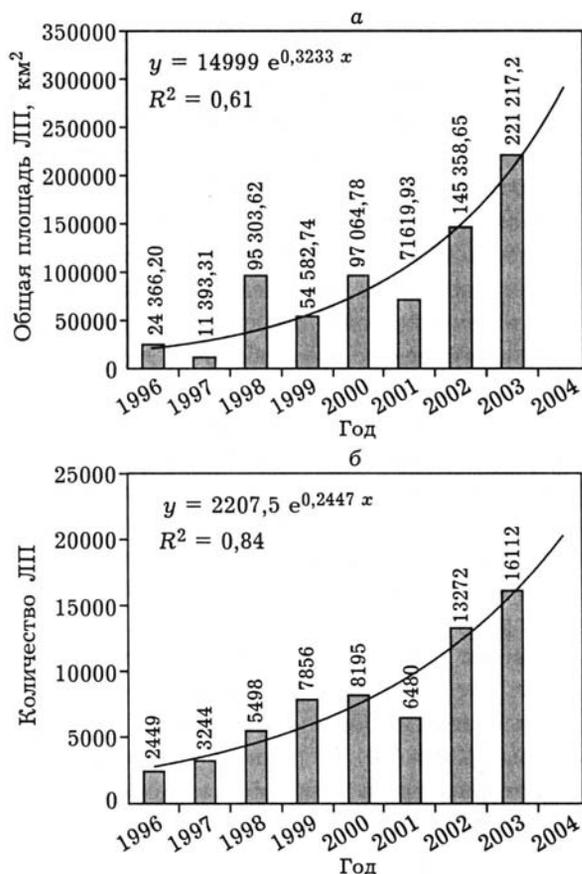


Рис. 8. Динамика итоговой площади (а) и числа пожаров (б) на территории азиатской части России и Казахстана по данным космического мониторинга [Sukhinin et al., 2004b].

действовавших на 625 800 га. Заметим, что Красноярская лаборатория использует наиболее консервативный алгоритм обнаружения пожаров, при котором все высокотемпературные явления идентифицируются как пожар с вероятностью 95 % [48].

Принимая во внимание существенные различия между спутниковыми данными, с од-

Т а б л и ц а 4

Сравнение данных по лесным пожарам для Российской Федерации (сообщения агентств и спутниковые данные)

Год	Сводки от государственных ведомств, основанные на наземных и авиационных наблюдениях			Спутниковые данные (NOAA/AVHRR)		
	Число пожаров, указанных в сводках	Общая площадь пожара, га	Лесная площадь, пройденная огнем, га	Число исследованных пожаров	Общая площадь пожара, га	Лесная площадь, пройденная огнем, га
2002	35 000	1 834 000	1 200 000	10 300	11 767 000	Нет данных
2003	28 000	2 654 000	2 074 000	15 440	21 527 000	18 862 000

ной стороны, и традиционно собранными данными о пожарах - с другой, получаем, что вопрос абсолютной точности спутниковых данных не имеет существенного значения. Наиболее важным представляется сокращение исключительно большого разрыва между статистиками лесных служб и организаций, представляющих данные дистанционного зондирования.

Совместное воздействие чрезвычайной засухи 2003 г. на территории Иркутской, Читинской областей и Бурятии, снижения уровня охраны лесов, а в некоторых случаях - последствий обширных сплошных рубок привело к пожарному сезону, который может вызвать серьезную деградацию лесов.

Для оценки воздействия пожаров 2003 г. в указанных регионах использовались три метода:

1) анализ официальных сообщений Авиалесоохраны;

2) анализ спутниковых данных (NOAA AVHRR) по числу и площади пожаров, полученных Институтом леса им. В. Н. Сукачева СО РАН [51];

3) анализ аэросъемки в сентябре 2003 г. районов, наиболее нарушенных лесными пожарами.

Аэротаксационные наблюдения показали, что доля лесов, пораженных верховыми пожарами, в Иркутской области составляла 17,4%, в Бурятии - 11,9 и в Читинской области - 1,5 %, что в сумме составляет 66 900 га в этих трех регионах.

Согласно спутниковым данным, общая площадь лесов, пройденных огнем, в этом же регионе почти в 10 раз больше, чем по оценкам воздушных наблюдений. Согласно результатам авиационных обследований и аэросъемки, специально проведенных в Бурятии и Чите в сентябре 2003 г., сделан вывод, что около 20 % от сгоревших лесных территорий в Иркутской области и Бурятии и по крайней мере 10 % в Чите подвержены верховым пожарам из-за чрезвычайно сухой погоды [53].

В табл. 5 представлены оценки выделения углерода в атмосферу пожарами различной интенсивности и длительности воздействия на экосистемы. Оценка основана на результатах обработки спутниковых данных Институтом леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, а

также на оценках количества сгоревших материалов [54, 55] с учетом вариантов восстановления экосистем в зависимости от типа растительности и степени поражения пожаром. Данный вариант основан на следующих допущениях [53]:

1. Предположительно половина из 7 756 000 га лесов пройдена низовым огнем с низкой интенсивностью горения исключительно в травяных типах леса, не вызывавшим гибели древостоя. Остальные 50 % пройдены низовыми пожарами с интенсивностью горения от средней до высокой, уничтожившими большое количество наземного горючего материала. Несмотря на адаптацию таких лесов к регулярно возникающим низовым пожарам, воздействие огня в результате засухи 2003 г. приведет к гибели 20-25 % насаждений, которые затем подвергнутся распаду.

2. Половина насаждений, пройденных высокоинтенсивными пожарами, полностью уничтожившими древостой, подвергается санитарной рубке и восстанавливается естественным путем вследствие близости к источникам обсеменения. Допускаем предположение, что методы лесозаготовки позволяют исключить вырубку неповрежденных деревьев. Другая половина насаждений подвергается санитарной рубке, однако ее качество ухудшается до открытых лугопастбищных угодий из-за отсутствия источников обсеменения и/или последующих, часто повторяющихся пожаров.

3. Выделение углерода через деструкцию вследствие послепожарной гибели насаждения, которое затем подвергалось санитарной рубке (примерно не более 50 %), считается равным среднему значению разложения порубочных остатков (в диапазоне запасов: 50-150 Т /га).

4. Нетто-выбросы углерода рассчитываются с учетом утраты возможностей по снижению содержания углерода на площади, подвергшейся деградации в результате таких факторов, как пожар, изменение климата и вмешательство человека. Расчет упрощенно базируется на предположении, что 50 % сухой сгоревшей фитомассы высвобождается в атмосферу. В действительности значительная часть этого углерода осаждается в земных и водных экосистемах в форме практически не разлагающегося элементарного углерода.

**Выделение углерода природными пожарами в Иркутской и Читинской областях и Бурятии в течение пожароопасного сезона 2003 г.**

Тип горючего материала и пожара	Площадь пожара в 2003 г., га	Топливо, поглотенное пожаром (F) и образованное в результате оппада (M), т/га	Период восстановления лесных запасов и горючих материалов, лет	Текущее выделение углерода в пожаре на единицу площади, т/га, и всего за 2003 г., Тг <sup>(4)</sup>	Послепожарное выделение углерода из-за гибели деревьев и его разложения, т/га. Итого за период восстановления	Нетто-выброс углерода из-за уменьшения потенциала секвестрации <sup>(5)</sup> , Тг <sup>(6)</sup>
Луговые, степные уголья. Низовые пожары	583-000	F: 4-6 M:-	F: 1	2-3 т/га - 1,17-1,75 Тг	- -	-
Низовые пожары в сосняках разнотравных (Pine-Glass) <sup>(1)</sup>	3 878 000	F: 4-6 M:-	F: 1 -	- 7,76-11,63 Тг 4-15 т/га	- -	-
Низовые пожары в сосняках <sup>(1)</sup>	3 878 000	F: 8-30 M: 40-75	F: 10-25 M: 100+	- 15,51-58,17 Тг	155,12-290,85 Тг	-
Породосменный пожар в сосновом лесу, долговременное восстановление <sup>(2)</sup>	728 000	F: 30-40 M: 50-150 <sup>2</sup>	100-200+	F: 15-20 т/га M: 25-75 т/га 10,92-14,56 Тг	18,2-54,6 Тг	-
Породосменный пожар в сосновом лесу, без восстановления <sup>(2)</sup>	728 000	F: 30-40 M: 50-150 <sup>(2,3)</sup>	Нет восстановления (зеленая пустыня)	F: 15-20 т/га M: 25-75 т/га 10,92-14,56 Тг	18,2-54,6 Тг	18,2-54,6 Тг
Общее количество выбросов углерода			Результатирующее выделение углерода в атмосферу	Выделение углерода в период действия пожаров в 2003 г. 46,28-100,67 Тг	Последующее выделение (различные периоды восстановления) 191,52-400,05 Тг	Нетто-выбросы углерода 18,2-54,6 Тг

Такой сценарий эмиссий углерода в 2003 г. представляет собой приблизительный подход к оценке влияния пожара на эмиссию углерода и возможные модели динамики уменьшения его содержания (секвестра). Наиболее важным источником ошибок в оценке пожарных эмиссий является неизученность запасов комплекса лесных горючих материалов и полноты их сгорания в зависимости от погодных и природных условий.

### ***Роль лесоболотных и болотных экосистем в аккумуляровании углерода на территории Сибири***

Несмотря на значительные усилия ученых привести в известность параметры участия болот Сибири в глобальном круговороте органического углерода, эта проблема остается по-прежнему актуальной и еще далека до приемлемого решения. В настоящее время можно констатировать лишь процесс интенсивного накопления и обновления необходимых сведений, с появлением время от времени промежуточных версий в обсуждении данной проблемы [56-66].

К основным причинам, препятствующим получению объективных оценок участия болот Сибири в глобальном круговороте органического углерода, можно отнести следующие:

а) отсутствие тотального и, главное, надежно дифференцированного учета заболоченных и заторфованных площадей; б) географически неравномерный и в количественном отношении совершенно недостаточный разброс промеров глубин торфяных отложений; в) фрагментарный характер сведений о групповом и фракционном составе органического вещества торфов и трансформации в них форм углерода в связи с динамикой тепловлагообеспеченности и окислительно-восстановительного потенциала условий среды; г) слабая экспериментальная база для ретроспективной, текущей и прогнозной оценок депонирующего эффекта болот и заболоченных лесов Сибири по природным ландшафтам.

В наибольшей степени отмеченные ограничения присущи болотам криолитозоны и горных территорий Сибири, где необходи-

мые объемы исследований либо вовсе не проводились, либо эпизодически и фрагментарно. В относительно приемлемом, но далеко не полном объеме может быть охарактеризован углеродный пул торфяных болот Западной Сибири. Здесь начиная с 30-х и до конца 80-х гг. XX в. с различной степенью регулярности и подробности проводились торфоразведочные работы, главным образом в южно- и среднетаежной подзонах Западно-Сибирской равнины. Комплексные биогеоэкологические исследования болот и заболоченных лесов были развернуты с 1960 г. в рамках Международной биологической программы, многие разделы которой, будучи актуализированы под новые задачи биосферных программ, продолжают реализовываться и в настоящее время.

В соответствии с лесорастительным районированием И. А. Короткова [67], в Западно-Сибирский континентальный сектор входят две лесорастительные области - горная Алтае-Саянская и равнинная Западно-Сибирская, каждая из которых дифференцирована на лесорастительные провинции (ЛП). Первая область содержит 7, вторая - 3 провинции, причем в последнем случае две из них разграничены на 5 округов.

В генерализованном виде соотношение площадей, запасов торфа и депонированного углерода для торфяных болот региона приводится в табл. 6. Видно, что решающее значение играют равнинные территории, а в них - зона таежных лесов со специфическим распределением показателей по подзонам. Причем здесь наблюдается контрастное возрастание с севера на юг общих запасов торфа и органического углерода при более "сглаженной" дифференциации площади болот.

Детальная оценка исторически сложившейся ситуации может быть сделана на основании табл. 7, в которой, исходя из степени разведанности торфяных ресурсов и оценки их химического состава, дано определенное представление о географической согласованности количественных и качественных параметров депонирования органического вещества в болотах различных природных зон Западной Сибири. Отметим лидирующую аккумулятивную роль олиготрофных гидроморфных образований, к которым приближаются,

## Соотношение площадей, запасов торфа и депонированного углерода в торфяных болотах Западной Сибири по лесорастительным зонам, %

Экорегion	Доля от		
	общей площади болот	общих запасов торфа	общих запасов углерода
Зауральско-Енисейская ЛП пред- тундровых лесов и редколесий:	15,3	3,6	3,5
тундра	4,8	0,1	0,05
лесотундра	10,5	3,5	3,5
Зауральско-Енисейская ЛП та- ежных лесов:	77,8	90,4	90,6
северная тайга	22,1	18,7	18,6
средняя   »	24,8	28,1	28,1
южная    »	30,9	43,6	43,9
Равнинная степь и лесостепь	4,6	3,6	3,6
Всего по равнинной части	97,7	97,6	97,7
Горная и предгорная часть	2,3	2,4	2,3
Всего по Западно-Сибирскому природному макрорегиону	100	100	100

но не перекрывают показатели по евтрофным болотам, доминирующим по захвату атмосферного углерода в южных равнинных и горных лесорастительных провинциях. Показатели по мезотрофным болотам ниже таковых для олиготрофных и евтрофных, что соответствует генетическим условиям и этапам формирования торфяных залежей.

В иерархии лесоболотно-торфяных комплексов Западно-Сибирской равнины особое значимое место по масштабам депонированного органического вещества, запасам углерода и стационарных пресных вод занимает Большое Васюганское болото (БВБ). Это один из самых крупных в мире аккумулятивных лесоболотно-торфяных бассейнов бореальной зоны Евразии, эволюционировавших на протяжении голоцена в условиях благоприятного сочетания климатических, литологических и ландшафтно-экологических факторов. В современном виде БВБ состоит из 158 относительно обособленных безлесных, лесных и слабооблесенных массивов. Суммарная площадь БВБ с учетом заболоченных и болотных лесов, а также переувлажненных редколесий составляет 6,78 млн га. БВБ характеризуется строго согласованной географической и топоэкологической субординацией гидро- и полугидроморфных экосистем, которая реализована в специализированной иерархии сопряженных таксонов болот и заболоченных лесов, типов, подтипов, групп

и видов торфяных залежей многоцелевого назначения.

Запасы депонированного торфа в пересчете на абсолютно сухое органическое вещество (АСВ) в границах БВБ достигают почти 18 млрд т, из которых на долю олиготрофных видов торфа приходится 50,2 %, мезотрофных - 18,1, евтрофных - 31,7 %. Захват и современное удержание БВБ атмосферного углерода составляет 9,3 млрд т, при этом олиготрофные залежи аккумулировали 49,4%, мезотрофные - 18,2, евтрофные - 32,4 % органического углерода. Расчеты свидетельствуют, что биосферный вклад БВБ в С-депонирующие показатели лесоболотно-торфяных комплексов Западно-Сибирской равнины в обобщенном виде может быть представлен следующим образом, %: по площади - 6,7, по депонированному АСВ - 16,5, по органическому углероду торфяных залежей - 17,2.

Прогрессирующее потепление климата приведет к безусловному прогреву торфяных залежей, падению уровня почвенно-грунтовых вод и улучшению режима аэрации в болотных экосистемах, вследствие чего возрастает микробиологическая и ферментативная активность почв. Это повлечет ускоренное разложение органического вещества торфов и их гумификацию, в первую очередь за счет полисахаридов. Но трансформацией неизбежно будут охвачены все группы и фракции

Площади, запасы торфа и депонированного углерода в различных типах торфяных болот Западно-Сибирского природного макрорегиона по лесорастительным зонам\*

Площадь болот, тыс. га		Абсолютно сухая масса, млн т					
в том числе по типам торфяных болот		Торф			Углерод		
Всего	евтрофный	мезотрофный	олиготрофный	В том числе по типам торфяных болот		В том числе по типам торфяных болот	
				евтрофный	мезотрофный	олиготрофный	евтрофный
<u>15 700</u>	<u>9 544</u>	<u>1 620</u>	<u>4 536</u>	<u>4 033</u>	<u>2 044</u>	<u>1 521</u>	<u>1 943</u>
100	60,8	10,3	28,9	100	50,7	37,7	100
<u>79 580</u>	<u>27 500</u>	<u>10 525</u>	<u>41 555</u>	<u>100 606</u>	<u>36 868</u>	<u>13 770</u>	<u>49 916</u>
100	34,6	13,2	52,2	100	36,6	13,7	100
				<i>Зона тайги</i>			
				<i>Зона тундры и лесотундры</i>			
<u>47 53</u>	<u>4 689</u>	<u>25</u>	<u>25</u>	<u>4 033</u>	<u>3 918</u>	<u>76</u>	<u>1 916</u>
100	98,7	0,8	0,5	100	97,1	1,0	100
				<i>Зона равнинных степей и лесостепи</i>			
<u>100 033</u>	<u>41 733</u>	<u>12 184</u>	<u>46 116</u>	<u>108 672</u>	<u>42 830</u>	<u>14 314</u>	<u>53 836</u>
100	41,7	12,2	41,6	100	39,4	13,2	100
				<i>Всего по равнинной части</i>			
				<u>51 528</u>	<u>47,4</u>		<u>21 127</u>
				<u>39,3</u>			<u>13,1</u>
				<i>Горные и предгорные районы</i>			
<u>2 305</u>	<u>2 065</u>	<u>72</u>	<u>168</u>	<u>2 628</u>	<u>2 388</u>	<u>181</u>	<u>1 260</u>
100	89,6	3,1	7,3	100	90,9	6,9	100
				<i>Всего по Западно-Сибирскому природному макрорегиону</i>			
<u>102 338</u>	<u>43 798</u>	<u>12 256</u>	<u>46 284</u>	<u>111 300</u>	<u>45 218</u>	<u>14 373</u>	<u>55 096</u>
100	42,8	12,0	45,2	100	40,6	2,9	100
				<u>22 266</u>	<u>40,4</u>		<u>7 096</u>
				<u>46,7</u>			<u>2,9</u>

\*Числитель - в единицах измерения, знаменатель - % от общего количества в пределах зоны.

органических соединений, включая даже наиболее устойчивые компоненты - лигнин, гумин, воскосмолы. Ранее установившиеся в равновесном состоянии пропорции в групповом и фракционном составе гумуса будут смещаться и стабилизироваться на другом уровне, соответствующем новой окислительно-восстановительной обстановке.

Грубые оценки показывают, что при условии прогрессирующего потепления наиболее "восприимчивые" к климатогенной трансформации группы и фракции органического вещества торфяных болот Западно-Сибирского региона совокупно вовлекут в первоочередной круговорот около 30 млрд т углерода. Сейчас трудно рассчитать, какая масса углерода возвратится в атмосферу в результате деструкции органогенной основы торфяных залежей. Но бесспорно, что потепление климата спровоцирует запуск этого механизма.

Представляется, что основные исследования углеродного цикла лесов и болот Сибири будут фокусироваться на следующих направлениях:

- выяснение причин расхождения в оценке пулов или потоков углерода, определенных для некоторых регионов или участков меньших территорий разными методами;

- влияние климатических изменений на динамику пулов и потоков с разным временным и пространственным разрешением;

- более точная оценка эмиссий углерода в результате нарушения лесных территорий, вызванных рубками, пожарами, землепользованием, вспышками массового размножения насекомых, техногенными выбросами;

- разработка системы моделей круговорота углерода на различных пространственных уровнях;

- исследование моделей для оценки сценариев аккумуляции эмиссий углерода при различных изменениях климата;

- разработка эколого-экономических моделей бюджета углерода для лесных и болотных территорий.

#### ЛИТЕРАТУРА

I.V. V. Furyaev, E. A. Vaganov, N. M. Tchebakova, E. N. Valendik, *Eurasian J. For. Res.*, 2001, 2, 1-15.

2. О. Б. Шибистова, Д. Ллойд, О. Колле и др., *ДАН*, 2002, 3, 425-429.
3. I. Levin, P. Ciais, R. Langenfelds, et al., *Tellus*, 2002, 54 B, 696-712.
4. J. Lloyd, R. Langenfelds, R. J. Francey, et al., *Ibid*, 749-767.
5. J. Lloyd, O. Shibistova, D. Zolotukhine et al., *Ibid.*, 590-610.
6. O. Shibistova, J. Lloyd, G. Zrazhevskaya et al., *Ibid.*, 568-589.
7. O. Shibistova, J. Lloyd, S. Evgrafova, et al., *Ibid.*, 589-592.
8. E.-D. Schulze, J. Lloyd, F. Kelliher et al., *Global Change Biology*, 1999, 6, 703-722.
9. P. S. Bakwin, P. P. Tans, D. F. Hurst and C. Zhao, *Tellus*, 1998, 50B, 401-15.
10. R. F. Keeling, S. C. Piper, M. Heimann, *Nature*, 1996, 381, 218-221.
11. B. Mortazavi, J. P. Chanton, *Global Biogeochem. Cycles*, 2002, 16(1), 10.1029/2000GB001390.
12. P. Ciais, A. S. Denning, P. P. Tans et al., *J. Geophys. Res.*, 1997, 102, 5857-5872.
13. P. Peylin, <sup>18</sup>O isotopic composition in atmospheric CO<sub>2</sub>: A new tracer to estimate photosynthesis at global scale. PhD Dissertation, Paris IVUniversity, 1999.
14. А. З. Швиденко, Е. А. Ваганов, С. Нильссон, *Сиб. экол. журн.*, 2003, 10: 6, 649-658.
15. S. Nilsson, A. Z. Shvidenko, A. Stolbovoi et al., Full Carbon Account for Russia, IIASA, Laxenburg, Austria, 2000.
16. A. Shvidenko, S. Nilsson, *Tellus*, 2003, 55B, 391-415.
17. М. К. Арбатская, Е. А. Ваганов, *Экология*, 1997, 28: 6, 330-336.
18. Е. А. Ваганов, М. К. Хьюс, В. А. Шашкин, М. К. Арбатская, Цикл углерода на территории России, М., 1999, 96-123.
19. S. G. Conard, G. A. Ivanova, *Environmental Pollution*, 1997, 98: 3, 305-313.
20. S. G. Conard, A. I. Sukhinin, B. J. Stocks et al., *Climatic Change*, 2002, 55: 1-2, 197-211.
21. А. С. Исаев, Г. Н. Коровин, Г. А. Заварзин (ред.), Круговорот углерода на территории России, М., РАН, 1998, 63-95.
22. Лесные экосистемы Енисейского меридиана, Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2002.
23. M. Tchebakova, R. A. Monserud, D. I. Nazimova, *Can. J. For. Res.*, 1994, 24, 1597-1607.
24. А. А. Кнорре, Использование регистрирующих структур при оценке годичной продукции компонентов фитоценозов в лесных и болотных экосистемах Приенисейской Сибири, Автореф. дис...канд. биол. наук, Красноярск, 2003.
25. G. J. Nabuurs, G. M. J. Mohren, *Netherlands J. Agricultural Sci.*, 1993, 41, 309-326.
26. G. J. Nabuurs, G. M. J. Mohren, *Can. J. For. Res.*, 1995, 25: 7, 1157-1172.
27. P. E. Kauppi, M. Posch, H. M. Hänninen et al., *Silva Fennica*, 1997, 31: 1, 13-25.
28. R. A. Birdsey, USDA Forest Service. General Technical Report WO-59, 1992.
29. А. И. Уткин, Д. Г. Замолотчиков, О. В. Честных и др., *Лесоведение*, 2001, 5, 8-23.
30. P. P. Tans, P. S. Bakwin, D. W. Guenther, *Global Change Biol*, 1996, 2, 309-318.

31. M. Gloor, S.-M. Fan, S. W. Pacala, J. L. Sarmiento, *Global Biogeochem. Cycles*, 2000, 14, 407-428.
32. Ю. Л. Раунер, Тепловой баланс растительного покрова, Л., Гидрометеиздат, 1972.
33. M. Aubinet, A. Grelle, A. Ibrom et al., *Advances in Ecological Research*, 2000, 30, 113-175.
34. S. C. Wofsy, J. W. Goulden, et al., *Science*, 1993, 260, 1314-1317.
35. D. Baldocchi, C. A. Vogel, B. Hall, *Agric. For. Meteorol*, 1999, 83, 147-170.
36. M. L. Goulden, B. C. Daube, S.-M. Fan et al., *J. Geophys. Research*, 1997, 102, 28987-28996.
37. J. Grace, Y. Malhi, J. Lloyd et al., *Global Change Biol.*, 2, 209-218.
38. B. E. Low, M. G. Ryan, P. M. Anthoni, *Global Change Biology*, 1999, 5, 169-182.
39. P. G. Jarvis, J. M. Massheder, S. E. Hale et al., *J. Geophys. Research*, 1997, 102, 28953-28986.
40. I. Milyukova, O. Kolle, A. Varlagin et al., *Tellus*, 2002, 54B, 621-629.
41. R. Valentini, G. Metteucci, A. J. Dolman et al., *Nature*, 2000, 404, 861-865.
42. M. G. Ryan, L. B. Lavigne, S. T. Gower, *J. Geophys. Research*, 1997, 102, 28871-28883.
43. T. Suni, F. Berninger, T. Vesala et al., *Global Change Biology*, 2003, 9, 1410-1426.
44. D. Y. Hollinger, F. M. Kelliher, E.-D. Schulze et al., *Agric. Forest. Meteorol*, 1998, 90, 291-306.
45. F. M. Kelliher, J. Lloyd, A. Arneth et al., *Ibid.*, 1999, 94, 217-232.
46. С. Нильсон, Е. А. Ваганов, А. З. Швиденко и др., *ДАН*, 2003, 394: 4, 267-270.
47. E. P. Davidenko, V. V. Furyaev, A. I. Sukhinin et al., J. G. Goldammer, Fire management needs in Russia's boreal forest zone. Paper presented at the 3rd International Wildland Fire Congress, Sydney, Australia, 3-6 October 2003. <http://www.wildlandfire03.com/home.asp>.
48. A. I. Sukhinin, N. H. F. French, E. S. Kasischke et al., *J. Remote Sensing of Environment*, 2004a, 93, 546-564.
49. D. R. Cahoon, B. J. Stocks, J. S. Levine et al., *J. Geophys. Res.*, 1994, 99 (D9), 18627-18638.
50. A. J. Soja, A. I. Sukhinin, D. R. Cahoon et al., *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25: 10, 1939-1960.
51. A. I. Sukhinin, *Int. Forest Fire News*, 2004b, 29, 113-118.
52. A. I. Sukhinin, V. V. Ivanov, E. I. Ponomarev et al., *Ibid.*, 2003, 28, 18-28.
53. Й. Г. Гольдаммер, А. И. Сухинин, И. Чисар, Управление лесными пожарами на экорегиональном уровне, М., 2004, 26-66.
54. A. J. Soja, W. R. Cofer III, H. H. Shugart et al., *J. Geophys. Research*, 2004, 109(D14S06), doi:10.1029/2004JD004570.
55. E. S. Kasischke, E. J. Hyer, P. C. Novelli et al., *Global Biogeochem. Cycles*, 2005, 19: GB1012, doi:10.1029/2004GB002300.
56. С. Э. Вомперский, О. П. Цыганова, А. Г. Ковалев и др., Круговорот углерода на территории России. Избр. науч. тр. по проблеме: "Глобальная эволюция биосферы. Антропогенный вклад", М., 1999, 124-145.
57. С. Э. Вомперский, Чтения памяти академика В. Н. Сукачева. XI: Биогeoценотические особенности болот и их рациональное использование, М., Наука, 1994, 5-38.
58. С. П. Ефремов, Т. Т. Ефремова, Н. В. Мелентьева, Углерод в экосистемах лесов и болот России, Красноярск, 1994, 128-140.
59. Т. Т. Ефремова, С. П. Ефремов, Н. В. Мелентьева, *География и природ. ресурсы*, 1998, 2, 79-84.
60. Т. Т. Ефремова, С. П. Ефремов, Н. В. Мелентьева, *Почвоведение*, 1997, 12, 1470-1477.
61. Г. А. Махов, Н. М. Бажин, Т. Т. Ефремова, Химия в интересах устойчивого развития, 1994, 2, 619-622.
62. А. В. Наумов, Т. Т. Ефремова, С. П. Ефремов, *Сиб. экол. журн.*, 1994, 1: 3, 269-274.
63. А. В. Наумов, Там же, 1997, 4: 4, 385-391.
64. Н. С. Паников, А. А. Титлянова, М. В. Палеева и др., *ДАН*, 1993, 330: 3, 388-390.
65. Н. И. Пьявченко, Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение, М., Наука, 1985.
66. Торфяные ресурсы РСФСР, М., Торфгеология, 1991.
67. И. А. Коротков, Углерод в экосистемах лесов и болот России, Красноярск, 1994, 29-48.

## Forests and Swamps of Siberia in the Global Carbon Cycle

E. A. VAGANOV, E. F. VEDROVA, S. V. VERKHOVETS, S. P. EFREMOV, T. T. EFREMOVA,  
V. B. KRUGLOV, A. A. ONUCHIN, A. I. SUKHININ, O. B. SHIBISTOVA

Results of measurements and calculations of carbon budget parameters of forests and swamps of Siberia are presented. Characteristics of the zonal variability of resources (and increment of resources) of carbon in forest and swamp ecosystems are given, results of direct measurements of carbon dioxide flows by means of microeddy pulsations are presented, estimates of uncertainty brought into the calculation of carbon budget parameters by forest fires are given.