

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

УДК 550.4

ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ УГЛЕРОДНОГО И АЗОТНОГО БАЛАНСОВ В ОСНОВНЫХ БИОМАХ РОССИИ

© 2007 г. Б. Н. Моисеев*, И. О. Алябина**

*Всероссийский НИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства

**Институт экологического почвоведения МГУ

Поступила в редакцию 25.04.2006 г.

Представлена картографическая база данных по балансу углерода и азота в экосистемах России. Анализ данных позволил сделать вывод, что ежегодное накопление углерода в растительном покрове страны в целом превосходит эмиссию CO_2 в результате гетеротрофного дыхания. Чистый прирост составляет более 630 млн. т С/год, что на 100 млн. т С/год перекрывает промышленную эмиссию CO_2 . Даны рекомендации по созданию и размещению так называемых “киотских лесов” и “управляемых лесов” в соответствии с Киотским протоколом.

Введение. Исследования последних лет и моделирование климатических процессов показали, что в результате изменения климата изменятся экологическая продуктивность и биоразнообразие, увеличится опасность исчезновения некоторых уязвимых видов. Как ожидается, произойдет существенное нарастание случаев нарушений функционирования экосистем в результате таких негативных явлений как пожары, засуха, нашествие вредителей, инвазия чужеродных видов. Эти процессы создают угрозу значительного ущерба или полного разрушения некоторых уникальных экосистем и вымирания находящихся под угрозой видов. Эффект увеличения концентрации CO_2 в бореальной зоне приведет к повышению чистой первичной продуктивности растительного покрова, однако климатические изменения в аридной зоне могут привести к снижению годовой продукции экосистем. Некоторые глобальные модели позволяют предположить, что чистое связывание углерода земными экосистемами в первой половине XXI столетия будет повышаться, затем стабилизируется или начнет снижаться. Модели производства зерновых культур показывают, что в некоторых районах с умеренным климатом потенциальный сбор урожая увеличится в случае небольшого увеличения температуры, но снизится в случае значительных температурных изменений [12].

В этой связи целью данной работы было создание базы данных по пространственному размещению показателей биологической продуктивности экосистем, данных углеродного баланса с тем, чтобы спрогнозировать возможные последствия изменений климата. Картографирование этих индикаторов выявит территории, где наиболее целесообразно выделить и создание

так называемых “киотских лесов”, т.е. лесных культур, созданных на сельскохозяйственных землях в соответствии с п. 3.3 Киотского протокола (КП) к Рамочной конвенции по изменению климата (РКИК). Кроме того, это поможет выделить “управляемые леса” в соответствии с п. 3.4 КП.

В цели работы входили также расчет и картографирование основных показателей азотного баланса в биоме России, что даст возможность выявить регионы, где недостаток доступных форм азота почв может послужить лимитирующим фактором повышения продуктивности растительного покрова в связи с потеплением климата. Кроме того, это поможет определить районы, где выпадения соединений азота из атмосферы могут вызвать эвтрофирование экосистем и необратимые изменения растительного покрова (снижение видового разнообразия, появление сорных и чуждых видов и т.п.).

Методический подход. В качестве методической основы принят балансовый способ расчетов основных потоков углерода и азота в растительных сообществах, находящихся в квазистационарном состоянии.

По карте растительности масштаба 1 : 4000000 было выделено 10 типов растительности: полярные пустыни, тундры, редкостойные леса и кустарники, леса северной тайги, леса средней тайги, леса южной тайги, смешанные и лиственные леса, луга, пастбища и пашни, болота, земли поселений, водоемы и проч. (рис. 1). Для каждой из 3470 трапедий сети (1×1 градус) была создана база данных на всю территорию России. Площади лесов, болот и сельскохозяйственных угодий были скорректированы по данным Государственно-

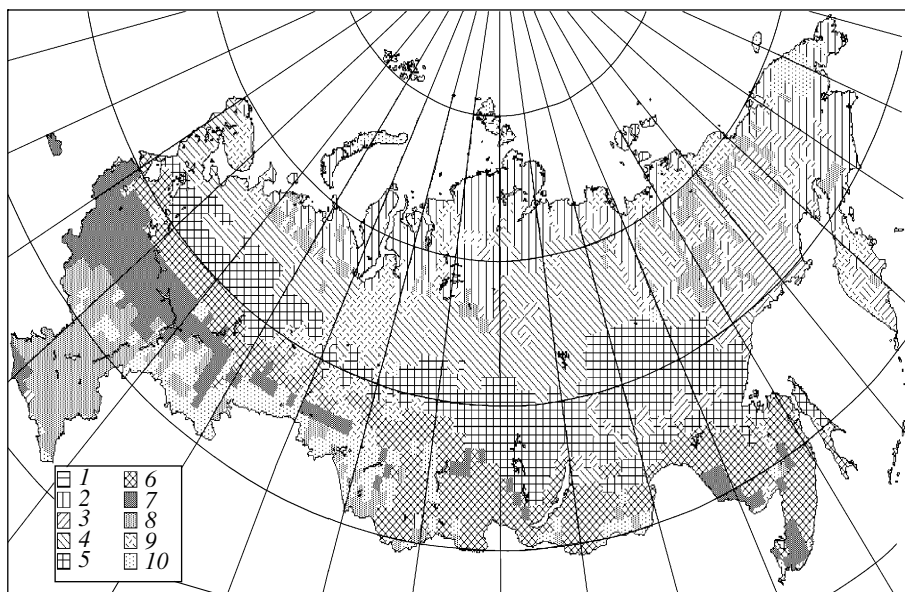


Рис. 1. Преобладающие типы растительности в трапециях сети 1×1 град: 1 – полярные пустыни, 2 – тундры, 3 – редкостойные леса и кустарники, 4 – леса северной тайги, 5 – леса средней тайги, 6 – леса южной тайги, 7 – смешанные и лиственные леса, 8 – луга, пастбища и пашни, 9 – болота, 10 – прочие биомы, включающие земли поселений, водоемы, ледники, пустыни и проч.

го учета лесного фонда и Росземкадастра на 01.01.2003 г.

Расчеты углеродного баланса. В первую очередь рассчитали годовой экосистемный цикл продукции фитомассы:

$$C_{NPP} = C_{Fall} + C_{Live}, \quad (1)$$

где C_{NPP} – углерод чистой первичной продукции фитомассы; C_{Fall} – годичный естественный опад листьев/хвои и опад стеблей, ветвей и стволов; C_{Live} – годичный прирост живой фитомассы в биоме.

Экосистемный углеродный баланс рассчитали как:

$$C_{NEP} = C_{NPP} - C_{Rh}, \quad (2)$$

где C_{NEP} – чистая экосистемная продукция фитомассы; C_{Rh} – гетеротрофное дыхание микроорганизмов/редуцентов (в данной работе – гетеротрофное дыхание почвы). На постоянных пробных площадях по исследованию биологической продуктивности экосистем C_{NEP} обычно находят по формуле:

$$C_{NEP} = C_{Live} + C_{Mort}, \quad (2a)$$

где C_{Mort} – чистый годичный прирост мертвой фитомассы в экосистеме.

Таким образом, годовой экосистемный цикл углерода можно записать в обобщенном виде: $C_{NPP} = C_{Fall} + C_{Live} = C_{Rh} + C_{Live} + C_{Mort}$.

В экосистемный цикл не входят потери фитомассы, вызванные внешними факторами и негативными воздействиями. Поэтому полный углеродный баланс обычно рассчитывают на уровне биомов.

В данной работе биомный баланс для лугов и пастбищ рассчитали без учета гетеротрофного дыхания:

$$C_{NBP} = C_{NPP} - C_{Loss} - C_{Leach}, \quad (3)$$

где C_{NBP} – чистая биомная продукция фитомассы лугов и пастбищ; C_{Loss} – потери фитомассы в виде выноса урожая и потребления консументами; C_{Leach} – потери органического вещества с суммарным стоком воды.

Мы полагаем, что гетеротрофное дыхание в луговых и пастбищных экосистемах осуществляется в основном за счет органического вещества дернины и подземной мортмассы, так как значительная часть надземной фитомассы выносятся с урожаем и не поступает в гетеротрофный блок. В данном случае нас интересует текущий годовой баланс углерода фитомассы, а не баланс углекислого газа.

Следует также отметить, что площадь пашен в данной работе рассматривается в едином типе лугов и пастбищ. Углеродный и азотный балансы этой категории сельскохозяйственных земель требуют более детальных исследований на локальном уровне и в данной работе не обсуждаются.

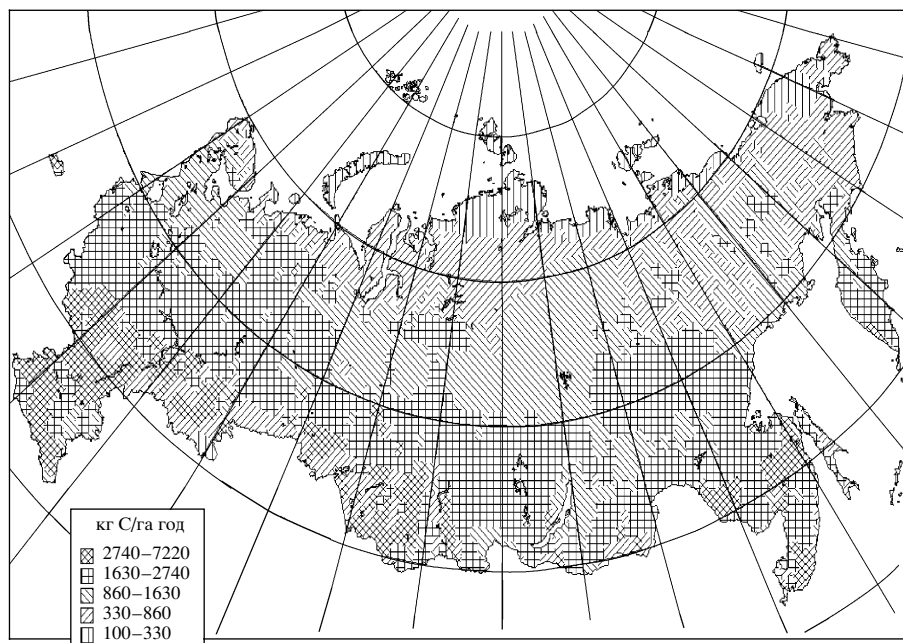


Рис. 2. Плотность чистой первичной продукции – C_{NPP} углерода фитомассы, кг С/га год.

Расчеты углеродного баланса для лесных и других биомов рассчитали по формуле:

$$C_{NBP} = C_{NEP} - C_{Loss} - C_{Leach}, \quad (4)$$

где C_{Loss} – потери фитомассы в результате пожаров, рубок леса, нашествия вредителей и болезней.

При определении C_{NEP} было учтено гетеротрофное дыхание почв.

Содержание углерода в фитомассе ($[C_6H_{10}O_5]_n$) приняли в размере 50% от сухой массы вещества.

Источники данных по биологической продуктивности биомов: C_{NPP} – рассчитали и картографировали (рис. 2) по оригинальной методике, используя исходные данные NASA по приходу и поглощению фотосинтетически активной радиации (ФАР) растительным покровом в трапециях сети 1×1 град [23]. Методика расчета NPP подробно изложена в работе [9].

C_{Fall} – рассчитали по данным Н.И. Базилевич с соавторами, приведенным в виде процентной доли от C_{NPP} в условиях разных экологических регионов России. В зависимости от типа биомов и сукцессионного возраста экосистем доля опада и отпада изменяется от 40% (сукцессии) до 100% (климакс) [2, 8].

C_{Rh} – условно приняли в размере гетеротрофного дыхания почв по данным карты [17].

C_{Loss} – потери в лесах (при рубках, пожарах, в очагах вредителей и болезней леса) рассчитали по официальным отчетным данным Федерального агентства лесного хозяйства МПР России за 2003 г. Для лугов и пастбищ потери за счет урожая приняли в размере от 20% (северные биомы)

до 50% (южные биомы); для других биомов – от 1% (тундра) до 20% (поселения, водные объекты и проч.) от значений C_{NPP} (экспертные оценки).

C_{Leach} – рассчитали по данным суммарного стока воды (база данных NASA по трапециям сети 1×1 град) и по содержанию органического углерода в природных водах: от 1 мг С/л (горные условия) до 100 мг С/л (заболоченные территории) [4].

Расчеты азотного баланса. Известно, что азот в основном поглощается растениями из почвенных растворов непосредственно в форме NH_4^+ - и NH_3 -ионов. Органические соединения азота, образующиеся в процессе усвоения азота растениями, снова попадают в почву в виде растительных остатков или продуктов жизнедеятельности животных. Они минерализуются в почве непосредственно или после гумификации в процессе длительного периода разложения растительных остатков. Продуктом минерализации органического азота является раствор аммиака (процесс аммонификации), который в благоприятных условиях окисляется хемоавтотрофными бактериями до NO_2^- и NO_3^- (процесс нитрификации). Минеральный азот может затем снова усваиваться растениями из почвенного раствора. Эта трансформация азота в экосистеме часто называется “круговоротом” или циклом азота для того, чтобы подчеркнуть тот факт, что азот, содержащийся в экосистеме, может теоретически проходить снова через одни и те же фазы (гумус, живые микроорганизмы, почвенный раствор, растения и

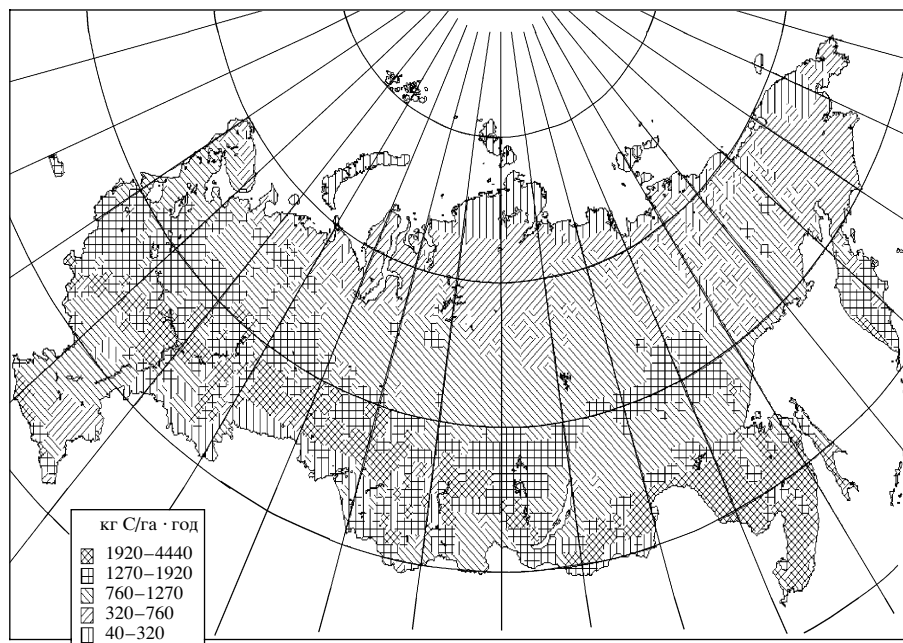


Рис. 3. Плотность фитомассы углерода годичного естественного опада листьев/хвои и отпада ветвей и стволов – C_{Fall} , кг С/га год.

т.д.). Этот внутренний “круговорот” однако незамкнутый. Азот из внешнего цикла поступает в почвы с сухими и влажными атмосферными осадками, фиксируется из атмосферы микроорганизмами, а также происходят потери его в окружающую среду (выщелачивание из почвы с суммарным стоком воды, в процессе денитрификации, эрозии почв и пожаров) [3, 5, 7, 13].

В работе были отдельно учтены внутренний и внешний циклы азотного баланса, которые, взаимно дополняя друг друга, определяют сбалансированность потоков N в экосистеме. Ежегодное поступление азота на поверхность почвы рассчитали как (внутренний цикл):

$$N_{fall} = N_{NPP} - N_{Live}, \quad (5)$$

где N_{fall} – азот, поступающий на поверхность почвы с опадом листьев/хвои и с отпадом отмерших стеблей, веток, стволов деревьев; N_{NPP} – содержание N в чистой первичной продукции; N_{Live} – депонирование N в живой фитомассе.

Азотный баланс внешнего цикла (как разность между входными и выходными потоками для экосистем) рассчитали следующим образом:

$$N_{bal} = (N_{dep} + N_{fix}) - (N_{den} + N_{leach} + N_{loss}), \quad (6)$$

где входные потоки: N_{dep} – выпадения соединений азота из атмосферы на поверхность почвы с сухими и влажными осадками; N_{fix} – фиксация азота в ходе усвоения молекулярного азота атмосферы и построения из него азотистых соединений микроорганизмами почвы; выходные потоки: N_{den} – де-

нитрификация в процессе дыхания микроорганизмов почвы; N_{leach} – выщелачивание из почвы соединений азота с суммарным стоком воды; N_{loss} – потери азота в результате пожаров, рубок, выноса с урожаем и проч.

Параметры внутреннего цикла не вошли в уравнение (6), так как в работе было принято допущение о стационарном состоянии систем, при котором параметры внутреннего цикла не влияют существенно на внешние потоки и не изменяют полный азотный баланс.

Источники данных по азоту: N_{dep} – сухие и влажные выпадения соединений азота приняли по усредненным годовым данным Международного синтезирующего центра Восток за 1987–1991 гг. [21], а также по карто схеме из доклада, сделанного на Всемирном Саммите в Йоханнесбурге в 2002 г. [www.johannesburgsummit.org] (рис. 4).

N_{fix} – приняли по рекомендациям международного семинара по критическим нагрузкам соединений азота [18] в размере 0.5–3 кг N/га · год. Пространственное размещение оценок провели в зависимости от ранга нитрифицирующей способности почв, которая тесно коррелирует с типами почв.

N_{leach} рассчитали по формуле:

$$N_{leach} = 0.001 \text{Runoff} \times C(N), \quad (7)$$

где Runoff – суммарный сток воды по данным NASA, м³/га год [23]; $C(N)$ – концентрация азота в поверхностных водах, г/м³ [4].

По литературным источникам [19, 22, 24] построили уравнение регрессии корреляционной

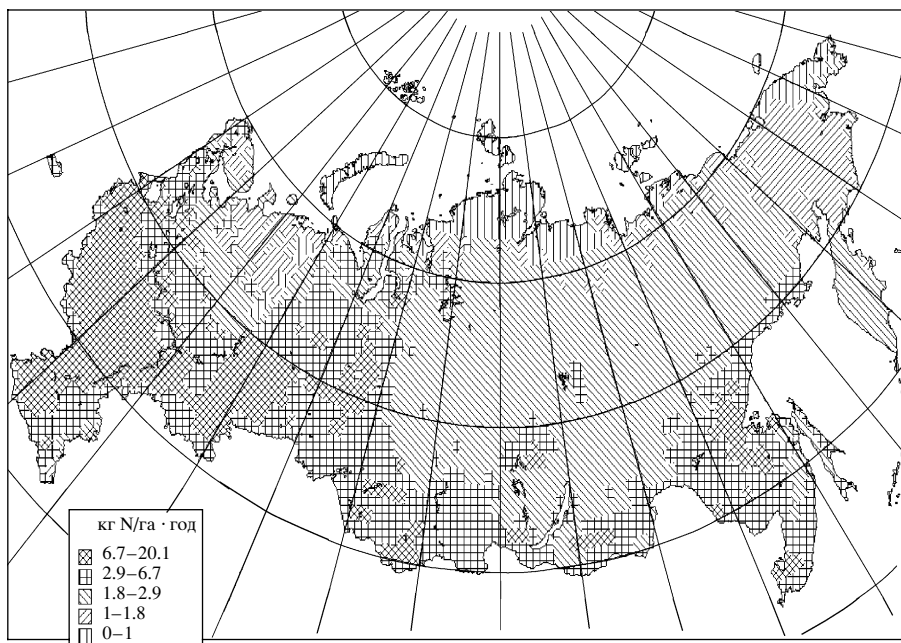


Рис. 4. Плотность сухих и влажных выпадений – N_{dep} соединений азота, кг N/га год.

связи $C(N)$ с суммарными выпадениями азота: $C(N) = 0.06 + 0.072N_{dep}$ ($r = 0.77$; $SEE = 0.13$). Из уравнения следует, что при выпадениях $N = 1 \dots 5 \dots 10 \dots 20$ кг/га средняя концентрация N в поверхностных водах составит: $C(N) = 0.1 \dots 0.4 \dots 0.8 \dots 1.5$ мг/л.

N_{den} рассчитали по экспериментальным данным, приведенным в работе [25]. На их основе составили уравнение регрессии вида: $N_{den} = 0.04 + 0.3N_{dep}$ ($r = 0.86$; $SEE = 0.11$). Из уравнения следует, что при выпадениях $N = 1 \dots 5 \dots 10 \dots 20$ кг/га скорость денитрификации $N_{den} = 0.2 \dots 1 \dots 2 \dots 4$ кг/га год.

N_{NPP} – рассчитали по формуле:

$$N_{NPP} = 0.001NPP \times C(N), \quad (8)$$

где NPP – чистая первичная продукция фитомассы, кг с. в./га*год; $C(N)$ – концентрация азота в фитомассе (по литературным источникам приняли в размере 8–13 гN/кг с.в. (табл. 1).

N_{fall} и N_{loss} рассчитали так же, как N_{NPP} , используя данные по углеродному балансу и содержанию азота в фитомассе.

Результаты и их обсуждение. Баланс углерода.

По нашим расчетам, чистая первичная продукция углерода C_{NPP} во всех биомсах России составляет 2745 млн. тC/год (табл. 2). Ее средняя плотность (без полярных пустынь) изменяется от 0.5 (тундра) до 3.0 тC/га год (смешанные и лиственные леса). Наиболее продуктивны (до 7 тC/га год) оказались биомы лугов и пастбищ лесостепной зоны (см. рис. 2).

Чистая экосистемная продукция C_{NEP} , или чистый прирост живой и мертвой фитомассы, определяется в основном климатическими факторами (рис. 2), однако она во многом зависит от сукцессионного возраста экосистемы. Удельная плотность C_{NEP} максимальна в молодняках и средневозрастных биоценозах и приближается к нулю в фазе климакса. C_{NEP} может иметь и отрицательное значение, но только в случае сильной деградации экосистемы. Таких экосистем немного – они выделяются на локальном уровне в промышленных районах и в нашей работе не рассматриваются. В тех случаях, когда гетеротрофное дыхание почвы

Таблица 1. Концентрация азота в фитомассе, по литературным источникам

Регион	Фракция	$C(N)$, гN/кг	Источник
Лесная зона СССР	Все фракции	13–5	[13]
Сев.-Зап. России	Стволы	2.0	[6]
Швеция	Стволы	1 ... 0.7	[22]
	Ветви	6 ... 2	
	Хвоя	15 ... 10	
Европа	Стволы	1 ... 1.5	[21]
	Ветви	3.5 ... 4.5	
Европа	Стволы	1 ... 0.5	[20]
СССР	Стволы	2.0 ... 3.1	[10]
Зауралье	Стволы	2.0 ... 5.0	[16]

Таблица 2. Основные показатели углеродного баланса в биомех России, млн. тС/год

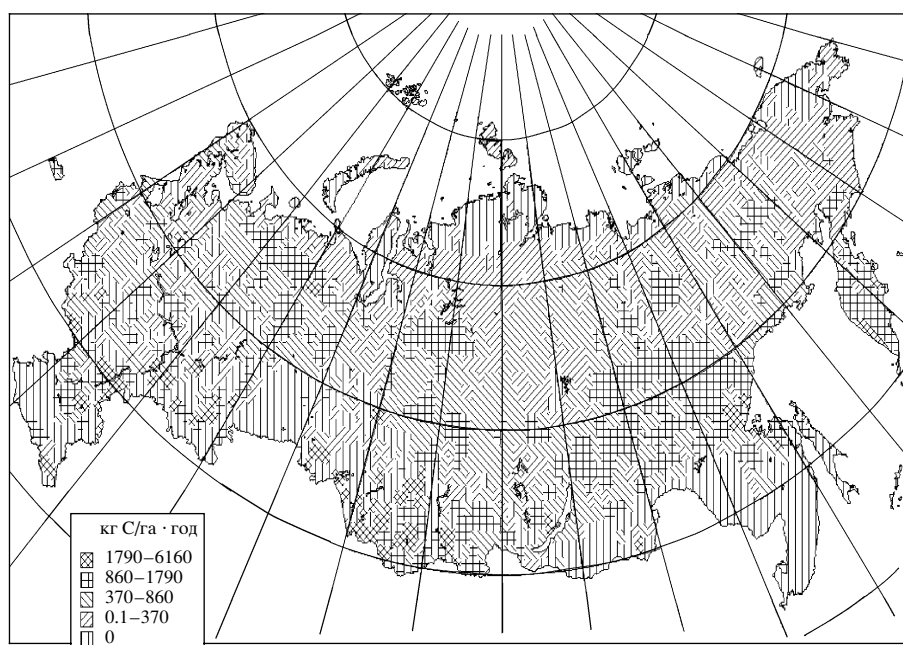
Биомы	Площадь, млн. га	Составляющие приходной части углеродного баланса					Потери углерода			Баланс C_{NBP}
		C_{NPP}	C_{NEP}	C_{Mort}	C_{Live}	C_{fall}	C_{Rh}	C_{Leach}	C_{Loss}	
Полярные пустыни	2.6	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0
Тундра	235.9	109	26	19	7	101	83	4	2	22
Редкостойные леса, кустарники	172.1	143	69	33	36	107	77	2	4	63
Северная тайга	159.2	362	168	73	94	267	198	9	15	144
Средняя тайга	258.3	574	248	75	174	402	331	14	29	206
Южная тайга	194.5	555	129	26	103	453	549	9	33	86
Смешанные и лист- венные леса	99.0	293	48	9	38	256	302	4	15	29
Луга, пастбища, пашни	220.9	447	164	16	147	139	307	2	168	51
Болота	154.2	165	52	25	27	138	127	11	7	35
Прочие земли и водоемы	213.1	97	16	3	13	39	242	1	19	-4
Все биомы	1709.8	2745	919	280	639	1899	2215	56	291	631

R_h было больше значений C_{NPP} , мы приравнивали C_{NEP} к нулю. Таким образом, в балансовых расчетах участвовали только положительные и нулевые значения C_{NEP} .

Нулевые и близкие к нулю удельные значения C_{NEP} отмечены в северной зоне, где много экосистем в фазе климакса, а также в южных лесостепных и степных районах, где гетеротрофное дыха-

ние почвы близко или превосходит значение C_{NPP} . Высокие удельные значения выявлены в таежной зоне в молодняках, формирующихся в местах интенсивных рубок и пожаров 60–70-х годов прошлого века, а также в южных высокопродуктивных средневозрастных насаждениях (см. рис. 5).

В некоторых северных районах ЕТР, Сибири и на Камчатке отмечены довольно высокие значе-

**Рис. 5.** Плотность создания чистой экосистемной продукции – C_{NEP} углерода, кг С/га год.

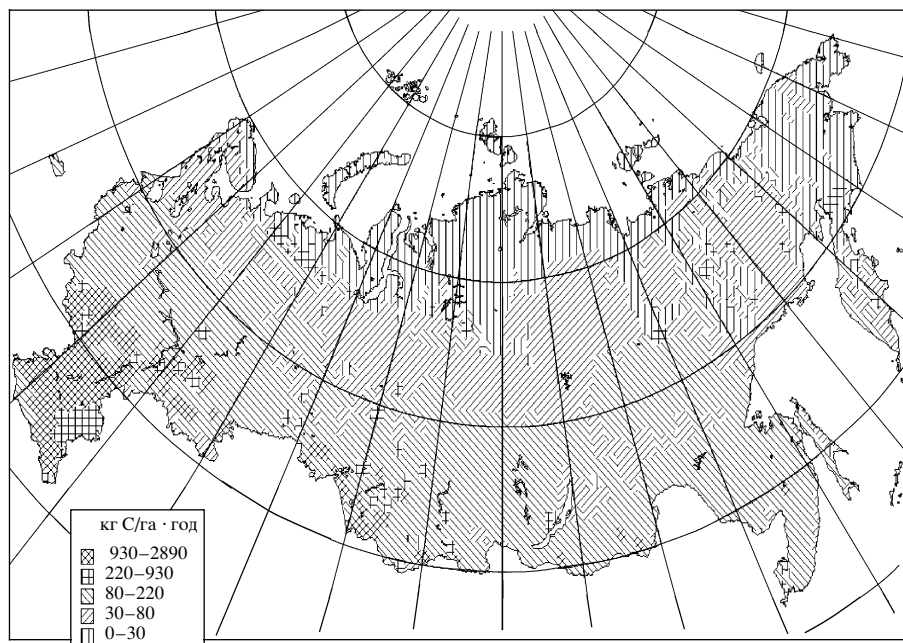


Рис. 6. Средняя плотность потерь фитомассы – C_{Loss} , кгС/га год.

ния C_{NEP} , которые обусловлены низким уровнем гетеротрофного дыхания и характеризуются значительной долей мортмассы. В условиях холодного климата скорость разложения фитомассы уступает скорости поступления растительного опада и отпада, поэтому в северных биоме запас мертвой фитомассы может превосходить запас живой [1, 2, 8].

Значение C_{NEP} в пересчете на всю площадь биомов составляет 919 млн. тС/год, из них 662 млн. тС/год – чистая экосистемная продукция лесов и 164 млн. тС/год – лугов и пастбищ (табл. 2).

Средние ежегодные потери фитомассы C_{Loss} (сенокошение, пастьба скота) наиболее высоки в продуктивных луговых и пастбищных экосистемах (до 3000 кгС/га год) и в сумме составляют 168 млн. тС/год. В лесах суммарные потери достигают 97 млн. тС/год за счет пожаров и рубок в таежной зоне (рис. 6).

Суммарный углеродный баланс биомов – положительный и составляет более 630 млн. тС/год. Наибольший вклад дают леса средней тайги – 206 млн. тС/год. В целом биомы лесов ежегодно накапливают 527 млн. тС/год (табл. 2).

Наибольшие значения плотности биомного углеродного баланса – до 4.6 т С/га год (в эту цифру входит и прирост мортмассы) отмечены в лесной зоне, в местах с преобладанием молодняков и средневозрастных древостоев (рис. 7). В зонах интенсивного сельскохозяйственного воздействия отмечены отрицательные значения углеродного

баланса. Они особенно высоки (до –800 кгС/га год) в южных районах страны.

Отрицательные величины углеродного баланса для значительной части регионов страны объясняются целым рядом причин. Во-первых, потеря некоторой доли органического углерода экосистемами возможна в ходе перестройки их функционирования, например в тундрах в процессе климатических изменений, а также в связи с их промышленным освоением. В литературе имеются данные о возможной трансформации мерзлотных лесных почв из накопителя углерода в источник углекислого газа в результате потепления климата [19].

Другой причиной отрицательных значений биомного баланса может быть деградация почв, характерная для южных регионов страны. Вероятно, в ходе деградации в деструкцию (минерализацию) вовлекаются запасы гумуса, превышающие ежегодное поступление фитомассы опада и отпада.

Третьей причиной, как уже отмечалось, могут быть высокие потери фитомассы в результате пожаров и концентрированных рубок. Такие потери преобладают в зоне интенсивного лесопользования.

Еще одной причиной подобных результатов могут служить неточности исходных данных. В частности, очень приблизительны, согласно указанию авторов, оценки дыхания почв [17]. По нашим расчетам, эта оценка существенно завышена для некоторых районов страны, особенно для регионов с преобладанием болотных почв. Исходя

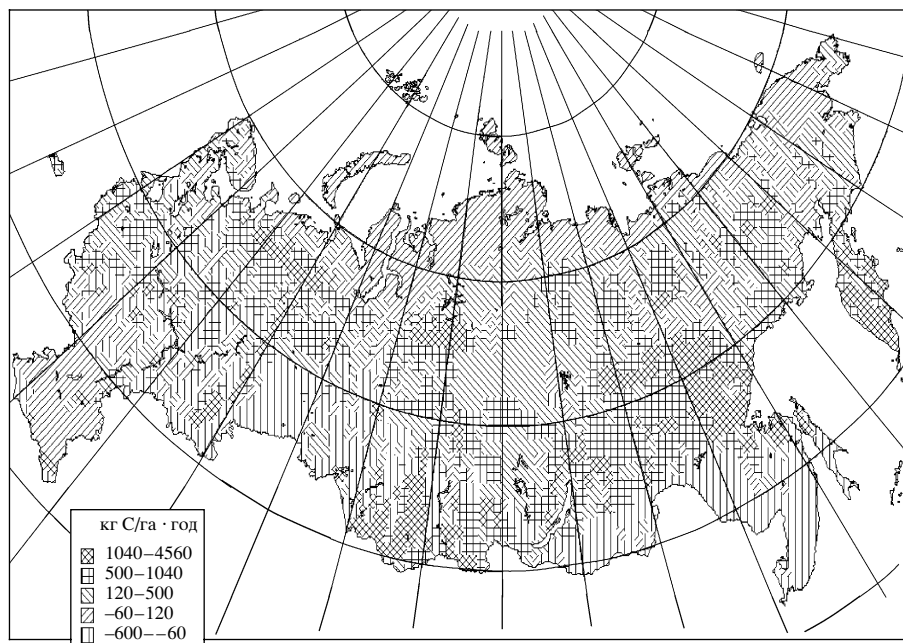


Рис. 7. Плотность углеродного биомного баланса – C_{NBP} , кг С/га год.

из теоретических положений газообмена, в экосистеме, находящейся в стационарном состоянии, гетеротрофное дыхание не должно превышать значений опада и отпада, т.е. $C_{Rh} \approx C_{fall}$. В этом случае гетеротрофное дыхание всех биомов страны будет составлять не более 1900 млн. тС/год.

В.А. Соловьев [14] впервые определил объемы CO_2 , выделяемого в атмосферу в процессе грибного разложения надземного древесного детрита в таежных лесах России. По его данным, эмиссия С– CO_2 при разложении древесины грибами в таежной зоне составляет в среднем 15 кг С/га в год и значительно уступает почвенному гетеротрофному дыханию. Поэтому эта составляющая углеродного баланса в нашей работе не рассматривалась.

Баланс азота. Валовое содержание азота в почве может быть очень высоким, а в черноземах достигает 10 и более тонн N на 1 га [3, 5]. Однако почти 99% его связано в органических соединениях, в том числе и в гумусе, поэтому он недоступен для растений и обычно выступает в качестве основного лимитирующего фактора роста растений. Азот аммонийных и нитратных соединений, поглощенных микробными клетками, включается в органические полимеры и временно выводится из круговорота, так как он становится недоступным для растений. При фиксации азота микроорганизмами происходит его восстановление; разложение органических азотсодержащих соединений (аммонификация) приводит к освобождению азота в форме аммиака, который далее окисляется последовательно до нитритов и нит-

ратов (нитрификация). Окисленный азот вновь восстанавливается до молекулярного в процессе денитрификации. Аммонийные и нитратные формы соединений азота ассимилируются растениями и микроорганизмами, что приводит к временному закреплению азота в органических веществах, его иммобилизации в микробной биомассе [3, 5, 7]. Запасенные в почве соединения азота служат компенсирующей базой для внутреннего и внешнего циклов азота.

Внутренний цикл. Ежегодные суммарные поступления азота на всю поверхность почвы с опадом и отпадом составляют 21.4 млн. т N/год, тогда как долговременное депонирование в живой фитомассе достигает 9.6 млн. т N/год. Таким образом, в чистой первичной продукции содержится около 31 млн. т азота. Среднее соотношение C/N достаточно высокое (табл. 3), что свидетельствует о значительной доли древесины в общей фитомассе и о недостатке азота в бореальной зоне. Отмечено закономерное возрастание показателя C/N с юга на север.

По данным Т. Пристовой [11], между показателями скорости разложения и величиной соотношения C/N существует тесная отрицательная связь. Из этого следует, что чем выше температура окружающей среды, тем быстрее происходит деструкция мортмассы, тем меньше соотношение C/N.

Наибольшая плотность поступления азота на поверхность почвы (до 78 кг N/га год) с опадом и отпадом выявлена в зоне смешанных и лиственных лесов (рис. 8). Однако для чистой первичной

Таблица 3. Средняя плотность содержания азота в фитомассе биомов, кг N/га год

Биомы	Площадь, млн. га	N_{NPP}	N_{fall}	N_{live}	C/N
Полярные пустыни	2.6	1.0	1.0	0.0	100
Тундра	235.9	3.6	3.1	0.5	97
Редкостойные леса	172.1	10.0	7.5	2.5	83
Северная тайга	159.2	10.8	8.0	2.8	83
Средняя тайга	258.3	26.3	18.1	8.2	80
Южная тайга	194.5	36.7	29.9	6.8	80
Смешанные и лиственные леса	99.0	38.0	33.1	4.9	78
Луга, пастбища, пашни	220.9	41.1	12.7	28.4	49
Болота	154.2	11.6	9.7	1.9	93
Прочие земли и водоемы	213.1	6.7	2.6	4.1	66
Итого/Средние значения	1709.8	18.1	12.5	5.6	88

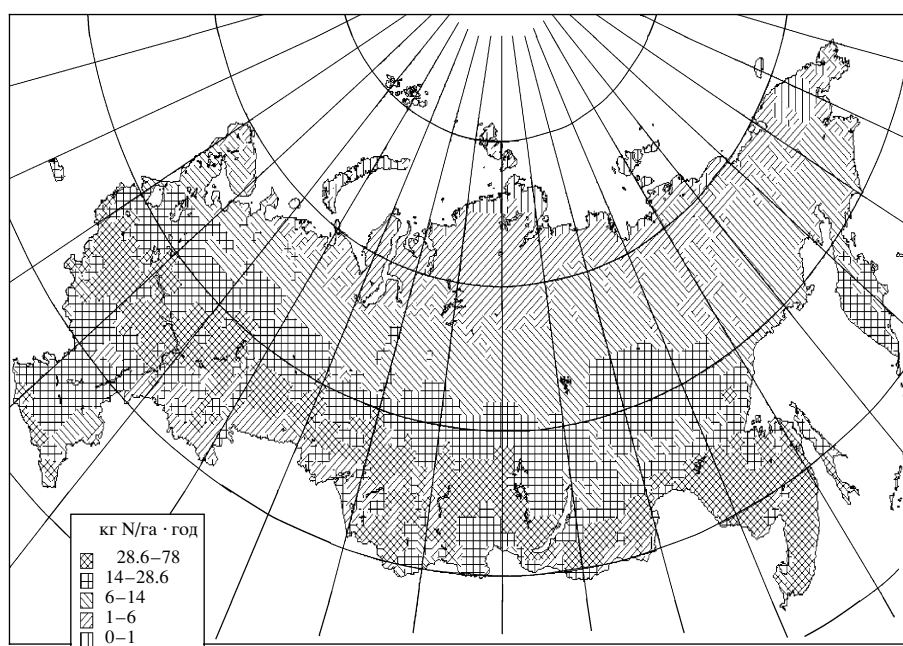
продукции содержание азота наиболее высокое в фитомассе лугов и пастбищ (вместе с северными лугами среднее содержание азота составляет 41.1 кг N/га год, а показатель C/N = 49).

Внешний цикл. Суммарные входные потоки азота составляют 7.4 млн. т N/год, из них сухие и влажные выпадения – 6.0 млн. т N/год, а фиксация – 1.4 млн. т N/год. Наибольшая плотность выпадений азота с осадками достигает 30 кг N/га год и отмечена в местах скопления промышленных предприятий и ТЭЦ. Средние удельные значения фиксации азота не превышают 3 кг/га год, их наибольшие величины расположены в основном в

южных районах страны с преобладанием плодородных почв.

Суммарные потери органического азота N_{loss} составили 4.9 млн. т N/год, из них 3.4 млн. т N/год – потери лугов и пастбищ. Наибольшая плотность потерь (до 52 кг N/га год) отмечена в южных районах с интенсивным ведением сельского хозяйства (рис. 9).

Биомный баланс азота рассчитали как разность между входными и выходными потоками N. Положительная разница означает накопление (иммобилизацию) азота в почве, отрицательное значение – дефицит азота во внешнем цикле, который, возможно, компенсируется за счет запасов в

**Рис. 8.** Плотность поступлений азота на поверхность почвы с опадом и отпадом – N_{fall} , кг N/га год.

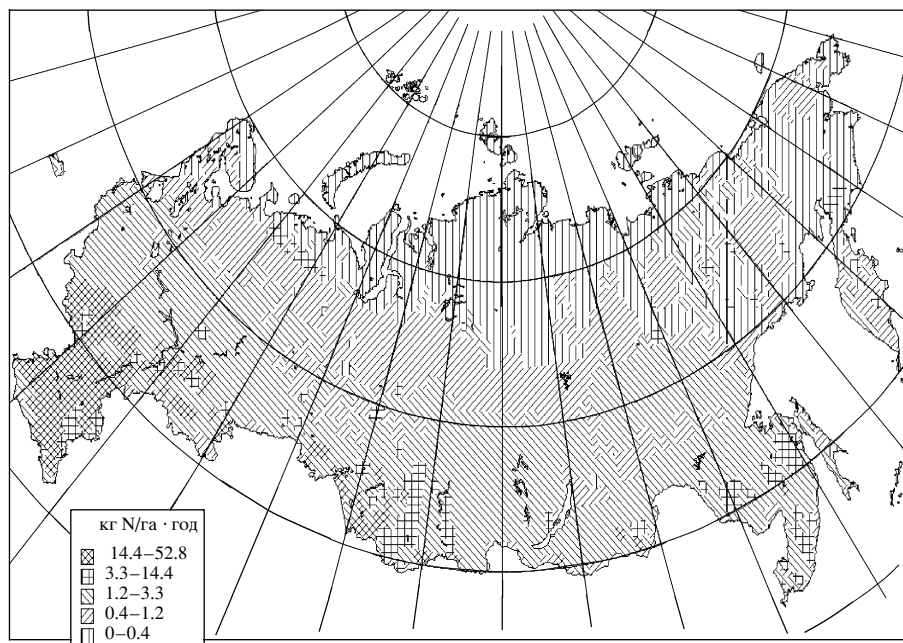


Рис. 9. Средняя плотность потерь органического азота – N_{loss} , кг N/га год.

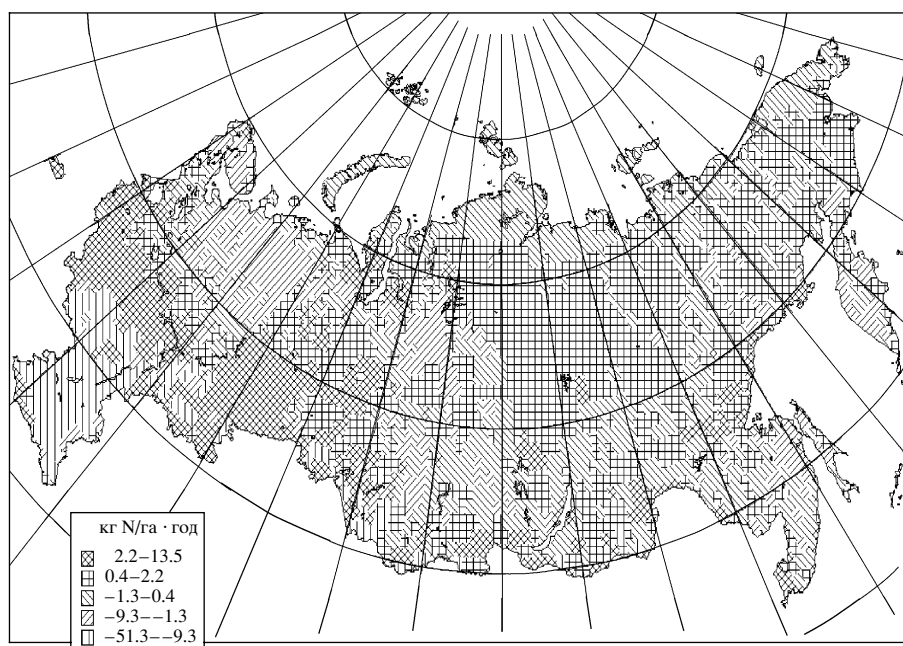


Рис. 10. Удельный годовой баланс органических соединений азота – N_{bal} , кгN/га год.

гумусе почв. Суммарные выходные потоки азота (табл. 4) составляют 8.8 млн. т N/год, из них 2.0 млн. т – потери со стоком воды, 1.9 млн. т – денитрификация и 4.9 млн. т – потери азота с выносом урожая, а также в результате пожаров и рубок леса. Таким образом, общий баланс азота по стране отрицательный и составил – 1.4 млн. т N/год.

Наибольшие отрицательные значения азотного баланса (более 50 кг N/га год) отмечены в районах

интенсивного сельскохозяйственного освоения биомов (рис. 10). В целом дефицит азота в биоме лугов и пастбищ составляет 2.6 млн. т N/год. Обширные районы отрицательных значений баланса выделены также в лесной зоне ЕТР и Центральной Сибири, где распространены лесные пожары и концентрированные рубки. В целом во всех других биомах (кроме луговых и пастбищ) суммарный азотный баланс близок к нулю или слабо положительный.

Таблица 4. Основные удельные показатели азотного баланса биомов, кг N/га год

Биомы	Площадь, млн. га	Входные потоки		Выходные потоки			Баланс, N _{bal}
		N _{dep}	N _{fix}	N _{leach}	N _{den}	N _{loss}	
Полярные пустыни	2.6	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
Тундра	235.9	1.5	0.3	0.6	0.5	0.2	0.5
Редкостойные леса	172.1	2.3	0.5	1.0	0.7	0.3	0.8
Северная тайга	159.2	2.3	0.6	1.5	0.7	0.4	0.3
Средняя тайга	258.3	3.2	1.0	1.4	1.0	1.4	0.4
Южная тайга	194.5	5.0	1.3	1.5	1.5	2.2	1.1
Смешанные и лиственные леса	99.0	7.4	1.9	1.6	2.3	1.9	3.5
Луга, пастбища, пашни	220.9	4.9	0.9	0.9	1.5	15.4	-12.0
Болота	154.2	3.0	0.5	2.1	0.9	0.5	0.0
Прочие земли и водоемы	213.1	3.7	0.7	0.6	1.2	1.3	1.3
Итого/Средние значения	1709.8	3.2	0.8	1.2	1.0	2.0	-0.2

В процессе работы была сделана попытка к объединению внутреннего и внешнего циклов азота. Однако возникли трудности методического характера, например в какую часть экосистемного баланса (приходную или расходную) следует отнести азот, депонированный в живой части чистой экосистемной продукции? Каковы потоки в ходе иммобилизации и минерализации азота в гумусе почв или потоки, выходящие из “внутрипочвенного” цикла? По-видимому, методически более правильно было бы рассмотрение полного баланса, который бы включал и почвенный цикл азота. Однако достаточным количеством данных мы не располагали. Следует отметить, что изучение массообмена азота почв связано с большими трудностями, поэтому количественные оценки баланса и отдельных миграционных потоков азота, выполненные разными исследователями на разных уровнях детализации, сильно различаются [3, 5, 7, 13, 24].

Выводы и предложения. 1. Ежегодное накопление углерода в растительном покрове страны значительно превосходит эмиссию C–CO₂ в результате гетеротрофного дыхания и потерь от внешних негативных воздействий. Чистый прирост углерода (биомный баланс) составляет более 630 млн. тС в год. Судя по опубликованным данным [12, 15], этот прирост углерода перекрывает промышленную эмиссию C–CO₂ в Российской Федерации более чем на 100 млн. тС/год.

2. Создание “киотских лесов” по ст. 3.3 Киотского протокола следует проводить в лесной зоне (в основном, в подзоне смешанных и лиственных лесов), где азотный баланс положительный. Необходимо учитывать, что прирост углерода в таких лесных культурах не превышает 1 тС/га год и будет составлять незначительную долю от общего чистого прироста лесов. Следует уточнить

ст. 3.3 Киотского протокола с целью значительного увеличения углеродной квоты для территорий с аридным климатом, где создание лесных культур связано с большими трудностями и риском.

3. Так называемые “управляемые леса” по ст. 3.4 Киотского протокола должны быть выделены в зоне положительного биомного баланса углерода, главным образом в подзонах северной и средней тайги. В эту категорию должны войти все леса особо охраняемых территорий. Резервные леса следует исключить из рассмотрения.

4. Атмосферные выпадения соединений азота наиболее опасны в северных районах Западной Сибири и в районе г. Норильска. Здесь возможно эвтрофирование тундровых и водных экосистем.

5. Наибольшие потери органического азота происходят в биоме с преобладанием земледелия, удаленных от промышленных центров, где атмосферные выпадения азота на уровне фоновых, а также в лесных биоме, подверженных пожарам и экстенсивным рубкам.

6. Отрицательный годовой баланс азота в естественных экосистемах, не подверженных негативным нагрузкам, можно, по-видимому, объяснить неполным учетом потока соединений азота, поступающего в результате поглощения растениями доступных форм солей азотной кислоты и аммония из органических соединений, запасаемых в гумусе почв прошлых лет. “Внутрипочвенный” баланс соединений азота требует дополнительных исследований и расчетов.

7. Если исключить из рассмотрения луга и пастбища, то в целом по стране годовой баланс азота близок к нулю, т.е. потери компенсируются приходом соединений азота из атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
2. *Базилевич Н.И., Гребенников О.С., Тишков А.А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.
3. *Болотина Н.И.* Запасы гумуса и азота в основных типах почв СССР // *Агрохимическая характеристика почв СССР*. М.: Наука, 1976.
4. *Зенин А.А., Белоусова Н.В.* Гидрохимический словарь. Л., 1988. 239 с.
5. *Ковда В.А.* Биогеохимический круговорот веществ в биосфере. М.: Наука, 1987. 143 с.
6. *Кранкина О., Хермон М.* Запасы питательных веществ и динамика древесного детрита в бореальных лесах Северо-западной России // *Устойчивое развитие бореальных лесов*. М., 1997. С. 46–50.
7. *Кудяров В.Н.* О биогеохимическом цикле азота // *Биогеохимические циклы в биосфере*. М.: Наука, 1976. С. 190–197.
8. Материалы к картам продуктивности восстановленного и актуального растительного покрова СССР, М. 1 : 35 млн. (запас фитомассы, продукция, мортмасса, гумус). Отчет по теме, рук. А.А. Тишков. М., 1991.
9. *Моисеев Б.Н., Алябина И.О.* Оценка потоков и баланс органического углерода в основных биомх России // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. 2004. № 1. С. 61–69.
10. *Оськина Н.В.* Содержание химических элементов в единице надземной фитомассы и годичной продукции в лесах бореального и умеренного поясов (по данным советских и зарубежных исследований) // *Проблемы лесоведения и лесной экологии: Тез. докл. Ч. 1*. М.: Наука, 1990. С. 278–281.
11. *Пристова Т.* Характеристика наземного опада растений и лесной подстилки в лиственно-хвойном насаждении. Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, 2005 [komifor.narod.ru].
12. Рамочная конвенция ООН об изменении климата. Первые десять лет / РКИК ООН, 2004. 101 с.
13. *Родин Л.Е., Базилевич Н.И.* Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности. М.; Л.: Наука, 1965. 253 с.
14. *Соловьев В.А.* Оценка скорости разложения детрита в лесных экосистемах по выделению CO₂ / Отчет о НИР. СПбГЛТА, 2001.
15. Третье национальное сообщение Российской Федерации. Межведомственная комиссия Российской Федерации по проблемам изменения климата. М., 2002. 158 с.
16. *Фирсова В.П., Павлова Т.С., Прокопович Е.В.* Круговорот азота в еловых биоценозах Среднего Урала // *Проблемы лесоведения и лесной экологии. Тезисы докладов. Часть 1*. М.: Наука, 1990. С. 293–295.
17. *Хакимов Ф.И., Деева Н.Ф., Ильина А.А.* Эмиссия CO₂ почвенным покровом // *Природные ресурсы и экология России. Федеральный атлас* / Под ред. Рыбальского Н.Г., Снакина В.В. М.: НИА-Природа, 2002. 278 с.
18. Effects of nitrogen and ozone // Report prepared by the International Cooperative Programme under the Working Group on Effects, 1996. 77 p.
19. *Jenkinson D.S., Adams D.E., Wild A.* Global warming and soil organic matter // *Nature*. 1991. V. 351. P. 304–306.
20. *Kuylenstierna J.C.I., Chadwick M.J.* The relative sensitivity of ecosystems in Europe to the indirect effects of acidic depositions // *Regional Acidification Models*. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
21. Mapping Critical Loads for Europe. CCE technical report. 1991. № 1. 86 p.
22. *Rosen K.* The critical load of nitrogen to Swedish forest ecosystems. SUAS, Upsala, 1991.
23. *Sellers P.J. et al.* A global 1 by 1 degree NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data // *Internat. J. Remote Sensing*. 1994. V. 15(17). P. 3519–3545.
24. *Schlesinger and D. Tilman.* Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences // *Ecol. Appl.* 1997. V. 7. P. 737–750.
25. *Warfvinge P., Sverdrup H., Rosen K.* Calculating critical loads for N to forest soils, 1992. 12 p.

Evaluation and Mapping of Components of Carbon and Nitrogen Balance in the Main Bioms of Russia

B. N. Moiseev*, I. O. Alabina**

*All-Russian Research Institute of Silviculture and Mechanization of Forestry

** Institute of Ecological Soil Science MSU

Cartographic data base on carbon and nitrogen balance in the Russian ecosystems are presented. Data analyses permits to make a conclusion, that annual carbon accumulation in the vegetation cover of the country generally exceed the CO₂ emission as a result of heterotrophic breathing. Net growth composes more than 630 mln. t C/year, which is exceeded the industrial emission of CO₂. The recommendations on creation and placement so called "Kyoto forests" and "managing forests" in accordance of Kyoto Protocol are given.