

ISSN 2072-4845

ЛЕСНАЯ ТАКСАЦИЯ И ЛЕСОУСТРОЙСТВО

1(41)' 2009

Международный научно-практический журнал



**КРАСНОЯРСК
2009**

УДК 553.1:543/504.06

*ШВИДЕНКО А. З.**МКАЛЛУМ И.**Международный институт прикладного системного анализа (Австрия)**СОКОЛОВ В. А.**ВЕДРОВА Э. Ф.**ВТЮРИНА О. П.**Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН**ЧУПРОВА В. В.**Красноярский государственный**аграрный университет**ШМУЛЛИУС К.**Университет им Ф. Шиллера (Иена, Австрия)*

АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЙ КИОТСКОГО ПРОТОКОЛА В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ

Среди глобальных вызовов, стоящих перед человечеством, изменение климата рассматривается наряду с такими проблемами как проблемы войны и мира, возрастание численности населения, борьба с бедностью, ухудшение среды обитания человека. Климатические изменения уже не являются предметом научных дискуссий. Из последних двенадцати лет одиннадцать были самыми теплыми за период существования документированных измерений (с 1850 года). Меняется также режим осадков. Увеличивается число и концентрация засушливых дней и дней со значительными осадками. Существенно увеличивающаяся изменчивость региональной погоды и значительное возрастание опасных гидроклиматических явлений (в 2007 году на территории России их было зарегистрировано 406) становится более опасным, чем трендовые изменения температуры и осадков. Согласно общепринятым прогнозам наиболее драматические изменения климата в XXI веке ожидаются в бореальных районах Северной Евразии, к которым и принадлежит территория Красноярского края.

Антропогенная природа климатических изменений в целом поддерживается мировым научным сообществом, в частности, выводами Третьего и Четвертого докладов Межправительственной группы экспертов об изменении климата (МГЭИК). Необходимость противодействия нежелательным изменениям климата привела к принятию важных международных соглашений – Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК) и Киотского протокола. После ратификации Протокола Россией (2006) он вступил в силу. По Протоколу Россия взяла на себя обязательства не превысить уровень антропогенных выбросов парниковых га-

зов, достигнутый к 1990 году. По состоянию на 2006 год объемы выбросов парниковых газов в России были примерно на треть меньше, чем уровень 1990 года. Это создает особые возможности для России, поскольку Киотский протокол и последующие решения Конференций сторон, подписавших Протокол, создали значительные специальные экономические механизмы получения выгод за счет перевыполнения принятых национальных обязательств по сокращению выбросов.

В силу развитой индустрии и громадных территорий лесов и иной природной растительности Красноярский край имеет значительные возможности для реализации положений Киотского протокола. Принципиально важным является также то, что весь международный переговорный процесс по климатическим изменениям увязывается с необходимостью перехода к устойчивому развитию. Поэтому разработка Региональной программы по реализации положений Киотского протокола, своевременность создания которой очевидна, не может сводиться только к преследованию сиюминутных экономических выгод от реализации тех или иных мероприятий. Она должна рассматриваться как важное эколого-экономическое средство оздоровления окружающей среды в тесной взаимосвязи со всей системой действий, направленных на экономическое и социальное развитие края, успешность которого в значительной мере зависит от того, насколько своевременными и действенными будут меры по адаптации социально-экологических систем края к климатическим изменениям и смягчению нежелательного воздействия последних.

Методические подходы по оценке влияния экосистем края на глобальный бюджет основных парниковых газов

Наши результаты относятся ко всей территории объединенного края в его современных административных границах.

В качестве основного подхода к количественной оценке бюджета основных парниковых газов (углекислоты CO_2 , окиси углерода CO , метана CH_4 , окислов азота N_2O и NO_x и летучих неметановых органических соединений VOC) растительных экосистем края был выбран метод, развиваемый Международным институтом прикладного системного анализа (Австрия) совместно с Институтом леса им. В. Н. Сукачева СО РАН. Метод основан на последних научных достижениях по проблеме. Метод был модифицирован для условий края и включает следующие основные положения.

Последовательное использование системного анализа и новейших научно-методических результатов по исследованию бюджета основных парниковых газов растительности на территории края положено в основу работы. В качестве методического базиса используется ландшафтно-экосистемный метод [8, 41], представляющий детальные и обоснованные результаты и позволяющий надежно оценить погрешности промежуточных и окончательных результатов. Ландшафтно-экосистемный метод используется в двух основных его формах. Первый из них базируется на оценке изменения запасов углерода в экосистемах:

$$\Delta(C) = C_{\text{sys}, t + \Delta t} - C_{\text{sys}, t} \quad (1)$$

где $\Delta(C)$ обозначает изменение резервуаров углерода на конец $C_{\text{sys}, t + \Delta t}$ и начало $C_{\text{sys}, t}$ некоторого периода Δt с последующим представлением оценок на годичной основе. Резервуары органического углерода оцениваются для фитомассы растительности (биомассы живых растений экосистем), биомассы детрита (мертвой растительной массы, в частности, крупных древесных остатков) и почвы (включая подстилку, углерод органогенных и минеральных горизонтов почвы). В настоящем исследовании фитомасса разделена на 7 фракций. Руководящими документами Межправительственной группы по глобальным изменениям климата (IPCC) метод изменения запасов углерода во времени рассматривается как основной. В условиях края этот метод позволяет получить некоторые важные результаты (например, изменение количества углерода в фитомассе экосистем), однако он не дает надлежащей точности, например, для оценки изменения углерода почв.

Второй метод базируется на измерении потоков биофильных элементов и сводится к оценке чистой биомной продукции экосистем (т. е. количества углерода, поглощенного экосистемами на больших территориях за период не менее года):

$$\begin{aligned} NBP &= NEP - DC, \\ NEP &= NPP - HSR = DEC - FLIT - FHYD, \end{aligned} \quad (2)$$

где NBP , NEP , NPP обозначают, соответственно, чистую биомную продукцию, чистую экосистемную продукцию и чистую первичную продукцию, HSR – гетеротрофное дыхание почв, DEC – поток углерода вследствие разложения крупных древесных остатков, $FLIT$ – поток в литосферу, $FHYD$ – поток в гидросферу и DC – поток вследствие природных и антропогенных нарушений (например, лесных пожаров или вспышек размножения насекомых).

Основой методологии служит системный подход. Растительная экосистема рассматривается как система взаимодействующих блоков «растительность» – «почва». Каждый из них взаимодействует с атмосферой и, в свою очередь, подразделяется на субблоки: надземная и подземная биомасса древостоя и нижних ярусов леса; легкоминерализуемая и стабильная фракции органического вещества почвы. Пул органического вещества (по углероду) в блоках формируется и поддерживается взаимодействием таких основных потоков, как продуцирование (чистая первичная продукция, NPP) и отмирание фитомассы, разложение мертвого органического материала (фитодетрита), минерализация и гумификация разлагающихся остатков, минерализация гумуса почвы и др. Запас (плотность) органического вещества в блоках (размерность $\text{Mg} (= \tau) \text{C га}^{-1}$) и интенсивность потоков ($\text{Mg C га}^{-1} \text{год}^{-1}$) – ключевые параметры углеродного цикла. Его определяющими характеристиками служат чистая первичная продукция (NPP) – вход углерода из атмосферы в экосистему и гетеротрофное дыхание ($R_h = HSR + DEC$) – возврат углерода в атмосферу. Их соотношение определяет величину чистой экосистемной продукции (NEP). Величина NEP имеет первостепенное значение для биосферных балансовых расчетов, поскольку количественно характеризует статус лесной экосистемы в биосфере (сток для CO_2 атмосферы или его источник в атмосферу).

Для определения показателей углеродного бюджета с использованием уравнений (1) и (2) были разработаны специальные базы данных и модели. В процессе работы оценка полного бюджета основных биофильных элементов произведена на основе объединения методов

(1) и (2) с разработкой необходимой информационной основы, эмпирических моделей и алгоритмов.

Использование других методов оценки бюджета парниковых газов (в основном углекислого газа и, частично, метана), применяемых в настоящее время в мировой практике (динамические модели функционирования растительности; метод непосредственного измерения потоков, в частности eddy covariance; инверсное моделирование), для территории края ограничено в силу отсутствия необходимых экспериментальных данных. Перечисленные методы были частично использованы для сравнительного анализа и оценки неопределенности получаемых результатов.

Информационная база учета основных парниковых газов

Разработка информационной базы, необходимой для учета основных парниковых газов, представляется в виде Интегральной земельной информационной системы (ИЗИС) на территорию края. ИЗИС состоит из многослойной геоинформационной системы, включающей картографическую компоненту (учитывая обширную территорию края принят масштаб 1:1000000) и соответствующие атрибутивные базы данных. Базовые слои ИЗИС включают различные карты – ландшафтную, почвенную и другие, результаты дистанционного зондирования земли из космоса, многочисленные экологические, биологические и иные показатели непосредственных измерений и оценок, а также результатов деятельности человека. Исходя из необходимости: 1) учета природного разнообразия территории края, 2) оценки многочисленных показателей, зависящих от региональных особенностей внешней среды, и 3) необходимости разработки территориально распределенных моделей различной природы, территория края разделена на 12 экологических районов (экорайонов, рис.) [4–6].

Учитывая, что данные учета земельного фонда по краю основаны на измерениях и оценках, проводимых в течение длительного периода времени, и точность их неизвестна (например, более половины данных учета лесного фонда получены на основе лесоинвентаризационных работ, проведенных более 15 лет назад), в целях обеспечения качества информации, соответствующего международным нормам, была проведена проверка надежности данных земельного и лесного учета в части распределения территории края по основным классам земельного покрова. С этой целью было проведено сравнение с данными спутниковых измерений и иных доступных исполнителям наземных данных.

Официальным источником по распределению земель по их функциональному назначению являются данные учета земельного фонда. Земельный фонд Красноярского края на 01.01.2006 года составляет 72367,1 тыс. га (табл. 1), Эвенкийского автономного округа (ЭАО) – 76319,7 тыс. га, Таймырского (ТАО) – 87992,9 тыс. га.

Распределение земельного фонда в Эвенкийском автономном округе приведено в таблице 2. Основную территорию занимают земли лесного фонда (98 %). Земли сельскохозяйственного назначения занимают незначительную площадь – 8,0 тыс. га или 0,01 % от общей территории. Они предоставлены 22 крестьянским хозяйствам, 1 акционерному обществу, 1 кооперативу, 3 личным подсобным хозяйствам. Площадь сельскохозяйственных угодий составляет 5,7 тыс. га или 0,007 % всего земельного фонда округа. Из них пашни – 0,2 тыс. га, залежи – 0, многолетних насаждений – 0, сенокосов – 3,7, пастбищ – 1,8 тыс. га.

Площадь нарушенных земель в ЭАО на 01.01.2006 г. составляет 482 га, в т. ч. геологоразведочные предприятия имеют 427 га нарушенных земель, предприятия угольной промышленности – 44, а строительных дорог – 11 га.

Таблица 1

Распределение земельного фонда Российской Федерации и Красноярского края по категориям на 01.01.2006 г. Данные официальной статистики

Наименование категорий земель	Россия		Красноярский край	
	млн га	%	млн га	%
Земли лесного фонда	1103,1	64,6	58,0	80,2
Земли сельскохозяйственного назначения	400,8	23,4	8,6	11,8
Земли запаса	107,9	6,3	3,8	5,3
Земли особо охраняемых территорий и объектов	34,2	2,0	0,9	1,2
Земли водного фонда	27,8	1,6	0,6	0,8
Земли поселений	18,9	1,1	0,3	0,4
Земли промышленности и иного специального назначения	17,1	1,0	0,2	0,3
Итого земель	1709,8		72,4	

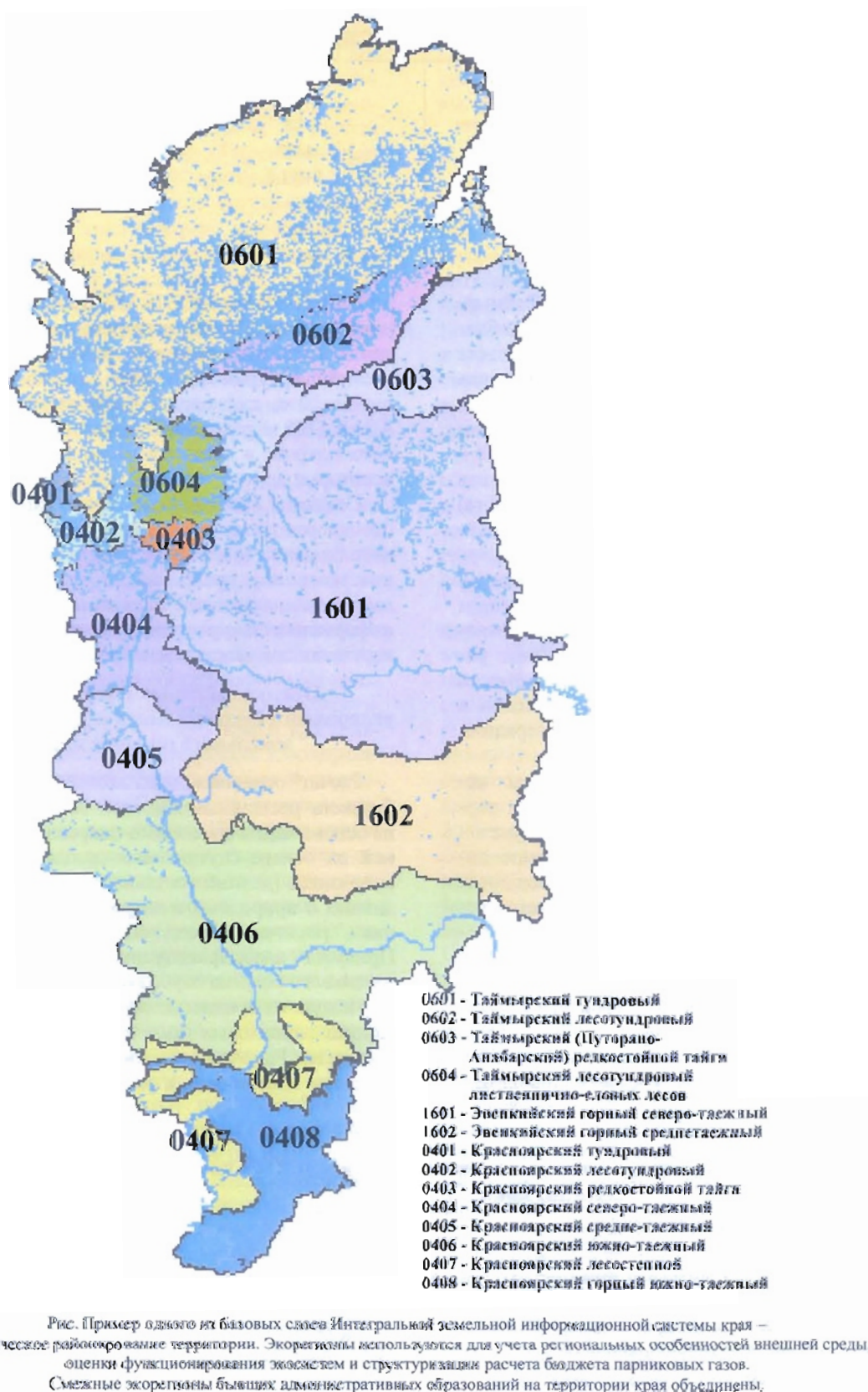


Таблица 2

Земельный фонд Эвенкийского автономного округа, тыс. га. Данные официальной статистики

Категории земель	На 01.01.2005 г.	На 01.01.2006 г.
Земли сельскохозяйственного назначения	8,0	8,0
Земли поселений	1,7	4,0
Земли промышленности и иного специального назначения	0,8	0,8
Земли особо охраняемых территорий и объектов	1377	1377
Земли лесного фонда	74891,5	74889,2
Земли водного фонда	–	–
Земли запаса	40,7	40,7
Итого	76319,7	76319,7

Распределение земельного фонда в Таймырском автономном округе приведено в таблице 3. Земли сельскохозяйственного назначения в округе составляют 31246,8 тыс. га. Площадь сельскохозяйственных угодий – 13,7 тыс. га: сенокосов – 4,5, пастбищ КРС – 9,2 тыс. га. Количество сельскохозяйственных предприятий – 243. Площадь оленьих пастбищ достигает 40319,1 тыс. га, большая часть (26265,3 тыс. га) которых размещается на землях сельскохозяйственного назначения.

Общая площадь нарушенных земель в округе составляет 0,7 тыс. га. Нарушения допущены при разработке месторождений полезных ископаемых, проведении геологоразведочных работ. Кроме того, на площади 57262,5 тыс. га находятся земли резерва, полигоны отходов и свалок, овраги, пески, территории консервации и других неиспользуемых земель.

Сравнение доступных информационных источников показало, что для южной части территории объединенного края данные учетов земельного и лесного фондов достаточно надежны. Некоторые расхождения наблюдаются по лесам высоких широт, что объясняется устаревшими данными учета, применением неточных методов инвентаризации в резервных лесах, а также наличием покрытых лесом земель за северным пределом территорий Государственного лесного фонда.

Использованные спутниковые наблюдения включают продукты оптического диапазона

MODIS TERRA и MODIS VCF (500 м разрешение), Landsat TM (30 м разрешение, использован для части территории), радары с синтетической апертурой JERS, ERS-1 и ERS-2 (разрешение 20 м, для южной части края), MERIS-ASAR (150 м разрешение, для оценки земельного покрова в северной части края), а также некоторые другие.

Созданы необходимые базы данных для оценки основных компонентов учета углеродного бюджета (фитомасса и первичная продукция экосистем, древесный детрит и т. д.). Существенное внимание уделено сбору и оценке информации о природных и антропогенных нарушениях в экосистемах края.

Оценка основных показателей углеродного бюджета лесов и других классов земельного покрова края

Расчет основных показателей углеродного бюджета растительности края был произведен на основе карты земельного покрова, составленной на основе спутниковых данных и других источников (данных земельного и лесного учета, данных о природных и антропогенных нарушениях, различного рода обследований и др.). Принятая классификационная схема классов земельного покрова опубликована ранее [6].

Исходя из предпосылки, что только полный бюджет парниковых газов соответствует конечным целям Рамочной конвенции ООН по климатическим изменениям, в расчет были включены

Таблица 3

Земельный фонд Таймырского автономного округа по состоянию на 01.01.2006 г. Данные официальной статистики

Категория земель	га
Земли сельскохозяйственного назначения	31246775
Земли населенных пунктов	17057
Земли промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения и иного специального назначения	12578
Земли особо охраняемых природных территорий и объектов	7314086
Земли лесного фонда	23689760
Земли водного фонда	–
Земли запаса	25712609
Итого	87992865

все классы земельного покрова края, которые были разделены на следующие основные группы: (1) непродуцирующие земли (воды, пески, крутосклоны, другие земли без почвенного покрова); (2) сельскохозяйственные земли, включая пахотные земли, сенокосы и пастбища, многолетнюю растительность; (3) леса; (4) переувлажненные земли (болота); (5) (естественные) травяные сообщества и (6) кустарники. Мы не выделяли «управляемые» и «неуправляемые» земли, как это предусмотрено некоторыми решениями Конференций партий (КОП) по Киотскому протоколу, исходя из того, что 1) для оценки потенциальных возможностей края по секвестру углеродосодержащих газов необходимо иметь полную характеристику всех земель и 2) только земли Таймырского АО (до некоторой степени) могут считаться неуправляемыми, что делает несложным выделение категории «неуправляемых» земель, если такая необходимость возникнет.

Процесс разделения земель по классам земельного покрова проводился в следующем порядке. На первом этапе пространственного разделения территории продуцирующие (покрытые почвами) земли были отделены от непродуцирующих. На следующем этапе выделялись обобщенные классы земельного покрова, базируясь на спутниковых данных грубого разрешения – земли с.-х. назначения, леса, переувлажненные территории, травяные и кустарниковые сообщества. Последующая классификация производилась, базируясь на всей доступной наземной информации и спутниковых данных высокого разрешения. Поскольку принятый масштаб рассмотрения был достаточно мелок – 1:1 млн, для классов, представленных многочисленными мелкими контурами, которые не выделяются при такой степени обобщения, были введены «виртуальные полигоны» – суммарные площади по данному классу в пределах экорегионов. В конечном счете, территория края была разделена на ~27000 полигонов, для которых проводился расчет бюджета основных парниковых газов.

Сравнение площадей по классификации, принятой в настоящей оценке, с данными учета земель затруднительно в силу различных определений категорий земель. По категориям с близкими определениями категорий земель (в частности покрытые лесом земли лесного фонда) данные по площадям различаются несущественно.

В процессе работы были получены оценки основных составляющих полного углеродного бюджета растительных экосистем, таких как фитомасса (по фракциям), чистая первичная продукция, гетеротрофное дыхание почв, пото-

ки, обусловленные природными и антропогенными нарушениями и т. д. В рамках этой работы были использованы ряд результатов, полученных Международным институтом прикладного системного анализа и Институтом леса им. В. Н. Сукачева СО РАН.

Основные резервуары углерода и азота в растительных экосистемах края

Леса являются одним из важнейших природных образований, обеспечивающих секвестр углерода. На большей части территории края – это основной класс земельного покрова (по данным учета лесного фонда 2003 года лесистость Красноярского края – 72.1 %, Эвенкии – 66.5 %, и только Таймырский АО имеет низкую лесистость – 3.7 %). Поэтому оценке влияния лесов края, лесного хозяйства и лесной промышленности на бюджет основных парниковых газов уделялось особое внимание. Леса определялись соответственно действующей лесоустроительной инструкции, т. е. кустарники, растущие в условиях, где «высокие» леса не могут расти по природным условиям, рассматривались как покрытые лесом земли.

Для лесов дополнительно определялись показатели, имеющие значение для оценки бюджета основных парниковых газов (древесный детрит, текущие приросты по наличному запасу и общей продуктивности, другие). Некоторые важные показатели определялись повторно независимыми методами. Так, фитомасса лесов определялась по методу и моделям, приведенным в [42] по данным учета лесного фонда 2003 года и по карте земельного покрова края, составленной на основе спутниковых наблюдений и различного рода вспомогательной информации. Расчет по данным ГУЛФ проводился по каждому из лесных предприятий края. Сводные данные по административным регионам приведены в таблицах 4 и 5.

В целях оценки динамики фитомассы за последнее десятилетие аналогичный расчет был сделан по материалам ГУЛФ 1993 года (табл. 5).

В целом, основываясь на данных ГУЛФ, леса Красноярского края содержат 9.6 млрд т фитомассы в сухом веществе (или свыше 2 % запаса фитомассы лесов мира), что делает их явлением глобального значения. За последние 10 лет запас фитомассы уменьшился на 3.4 %, что объясняется, в основном, уменьшением покрытых лесом земель и запасов древесины в течение десятилетия (соответственно, на 1.9 и 4.1 %).

Используя данные по наличию в лесах края древесного детрита – сухостой, валеж, шиш и сухие ветви растущих деревьев – был определен запас углерода в этой категории органического вещества. С этой целью использованы

Таблица 4

Фитомасса лесов Красноярского края в 2003 г. Используются сводные данные ГУЛФ по лесным предприятиям края. Данные в Тг = 10⁶ т сухого вещества

Породы и группы пород	Фракции фитомассы, Тг, сухой вес органического вещества							Фито масса, всего	в т.ч. ЗЧ
	Ствол	в т.ч. кора	Ветви кроны	Листья / хвоя	Корни	Подрост, подрост	ЖНП		
Красноярский край									
Хвойные	2792.4	360.1	441.0	184.0	980.4	105.1	190.0	4693.0	291.5
Сосна	754.2	73.0	118.5	46.5	270.4	16.6	80.4	1286.6	83.6
Ель	337.1	49.9	56.4	29.9	195.4	24.6	29.2	672.5	49.0
Пихта	405.3	51.6	79.1	44.6	92.3	13.2	15.6	650.1	54.8
Лиственница	553.0	93.7	66.2	13.6	218.3	16.8	26.3	894.3	29.2
Кедр	742.9	91.9	120.8	49.5	204.0	34.0	38.5	1189.6	75.1
МЛП	777.4	130.4	165.8	32.8	271.5	36.4	57.5	1341.4	66.7
В т.ч. береза	605.0	103.2	129.2	27.1	211.3	30.6	47.9	1050.9	55.4
осина	171.8	27.0	36.5	5.6	59.9	5.8	9.5	289.2	11.1
Прочие	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
Кустарники	0.0	0.0	5.2	2.3	4.1	0.0	3.1	14.7	3.5
Всего	3569.8	490.5	612.1	219.2	1256.0	141.6	250.6	6049.2	361.9
Таймырский АО									
Хвойные	46.6	8.9	7.5	1.8	25.3	5.2	12.8	99.2	8.5
Ель	5.5	0.9	1.1	0.6	3.7	1.0	1.4	13.2	1.5
Лиственница	41.1	8.0	6.4	1.2	21.6	4.2	11.4	86.0	7.0
МЛП	0.8	0.1	0.2	0.0	0.4	0.2	0.3	1.8	0.2
Береза	0.8	0.1	0.2	0.0	0.4	0.2	0.3	1.8	0.2
Кустарники	0.0	0.0	4.1	1.8	3.2	0.0	7.4	16.5	4.8
Всего	47.4	9.1	11.8	3.7	28.9	5.4	20.5	117.6	13.5
Эвенкийский АО									
Хвойные	1878.5	315.9	249.1	68.4	745.2	85.7	187.0	3214.0	168.9
Сосна	202.2	23.5	24.0	15.5	43.6	5.5	29.3	320.1	28.9
Ель	43.8	6.5	7.4	3.8	25.4	5.1	5.8	91.4	7.7
Пихта	1.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	1.9	0.2
Лиственница	1505.0	269.5	197.5	41.2	640.7	67.6	143.6	2595.6	118.9
Кедр	126.4	16.2	20.0	7.8	35.3	7.4	8.2	205.1	13.3
МЛП	88.4	16.5	19.6	4.2	38.8	8.3	12.9	172.3	11.9
В т.ч. береза	84.9	15.8	18.7	4.1	37.6	8.1	12.6	165.9	11.6
осина	3.6	0.6	0.9	0.1	1.3	0.2	0.4	6.4	0.3
Кустарники	0.0	0.0	10.7	4.7	8.3	0.0	24.8	48.5	14.6
Всего	1966.9	332.3	279.4	77.4	792.4	94.0	224.7	3434.8	195.5

Примечание: Сокращения в таблицах 4 и 5: ЖНП – живой напочвенный покров, ЗЧ – зеленая часть (ассимиляционный аппарат) экосистем.

данные лесоустройства в лесах края, а также опубликованные результаты ряда исследований [2; и многие другие].

Запасы органического углерода в других типах растительности определялись на основе оценок, полученных спутниковыми методами, и баз данных экспериментальных наблюдений, проведенных на территории края и смежных регионов. Запасы углерода в фитомассе сельскохозяйственных земель были рассчитаны по фактической продуктивности сельскохозяйственных культур с учетом субпродуктов (на-

пример, таких как солома и корни для зерновых культур).

Запасы органического углерода в почвах оценивались по почвенной карте на основе базы данных типичных профилей почв, составленных по типам почв. Для минеральных почв база данных включала подстилку и слой почв в 1 м; для органогенных почв приведены данные для верхнего 1 м слоя.

Наиболее важные агрегированные данные содержания углерода и азота в растительных экосистемах приведены в таблице 6.

Таблица 5

Фитомасса лесов Красноярского края в 1993 г. и сравнение с данными 2003 г.
Данные в Тг = 10⁶ т сухого вещества.

Породы и группы пород	Фракции фитомассы, Тг, сухой вес органического вещества						Фито масса, всего	в т.ч. ЗЧ	
	Ствол	в т.ч. кора	Ветви кроны	Листья / хвоя	Корни	Подрост, подрост			ЖНП
Красноярский край в границах 1993 г.									
Хвойные	4902.5	710.4	729.7	274.3	1807.6	209.5	414.1	8337.8	502.8
Сосна	989.6	103.3	147.0	69.0	314.6	23.4	120.0	1663.5	124.0
Ель	441.5	65.7	74.2	39.2	257.0	32.5	38.6	883.0	64.4
Пихта	457.1	58.1	88.8	50.1	104.3	15.1	17.6	733.0	61.7
Листвен-ца	2069.3	365.2	268.5	55.4	871.0	91.3	184.8	3540.3	156.7
Кедр	945.0	118.1	151.3	60.7	260.7	47.2	53.1	1517.9	96.1
МЛП	861.3	148.1	185.6	37.4	316.7	45.3	71.7	1518.1	79.7
В т.ч. береза	690.8	120.8	148.8	31.7	256.9	39.4	62.1	1229.7	68.4
осина	170.0	27.1	36.7	5.6	59.6	5.8	9.5	287.2	11.1
Кустарники	0.0	0.0	20.5	9.1	16.0	0.0	35.7	81.3	23.4
Всего	5763.8	858.5	935.9	320.9	2140.3	254.8	521.5	9937.1	605.9
Красноярский край 2003 г. (итоги табл. 1)									
Всего	5584.1	831.9	903.3	300.3	2077.3	241.1	495.8	9601.6	570.9
Откл. %%, 2003 к 1993	-3.1	-3.1	-3.5	-6.4	-2.9	-5.4	-4.9	-3.4	-5.8

Из приведенных данных можно сделать следующие выводы:

- запас органического углерода в фитомассе растительных экосистем края составляет 6.6 Пг (млрд т) углерода; основной запас фитомассы (порядка 85 %) сосредоточен в лесах края;

- на территории края, в основном на лесных землях, находится значительный запас древесного детрита (35.4 % к запасу фитомассы), что объясняется значительной долей разновозрастных лесов, частыми низовыми пожарами, приводящими к частичному отпаду, и низкими темпами разложения органического вещества, особенно в северных районах региона;

- запас углерода в почвах края оценивается в 40.3 Пг углерода, т.е. соотношение углерода почв к углероду растительности составляет 4.5:1. Для лесов Красноярского края эта величина составляет 2.46:1, Эвенкии 3.58:1 и Таймыра 5.23:1;

- запасы общего азота в почвах ценены в 2.7 Пг, т.е. среднее отношение содержания углерода к азоту в почве составляет 14.8:1.

Значительные запасы углерода в почвах (приведенные выше результаты включают также мерзлотную часть профиля на вечной мерзлоте до указанной глубины) и детрите создают предпосылку увеличения углеродных эмиссий при потеплении и таянии вечной мерзлоты и значительных эмиссий вследствие растительных пожаров.

Данные по количеству азота в растительности оказались близкими к таковым, сообщаемым в публикациях для бореальной растительности. Отношение С:N фитомассы, вычисленное для всех классов растительности, составило 175 для надземной древесины, 39 для зеленых частей, 91 для подземной фитомассы и 117 для всей фитомассы в целом. Изменчивость этих показателей велика, хотя в целом полученные результаты соответствуют ранее опубликован-

Таблица 6

Содержание органического углерода и азота в растительных экосистемах края

Показатели	По административным регионам			Итого	Среднее, Мг С га ⁻¹
	Красноярский край	Эвенкийский АО	Таймырский АО		
Площадь продуцирующих земель, млн га	69.157	75.470	76.159	220.786	
Фитомасса, Тг С	3703.4	2201.4	730.5	6635.3	30.1
в т.ч. лес	3542.1	1871.1	230.1	5643.3	50.7
Древесный детрит, Тг С	735.2	823.0	790.7	2348.9	10.6
Органический углерод почв, Тг С	13814.9	12732.4	13742.4	40289.7	182.5
Содержание азота в почве, Тг	996.1	924.5	801.2	2721.8	12.3
Отношение С раст./ С почвы	0.32	0.24	0.11	0.22	
Отношение С:N почв	13.9	13.8	17.2	14.8	

ным данным для бореальной зоны. Так, соотношение C:N растительности, измеренные в различных районах высоких широт, составили 18 до 70 в тундре и 50 до 180 – в бореальных лесах (средние для растительной фитомассы).

Основные потоки углерода и азота

Чистая первичная продукция. Два основных потока определяют углеродный бюджет экосистем – чистая первичная продукция (ЧПП) и гетеротрофное дыхание (ГД).

ЧПП лесов определена по специально разработанному моделирующему алгоритму, который позволяет избежать систематических ошибок, свойственным многим методам определения ЧПП [42].

Величина ЧПП лесного покрова края значительна. В таблице 7 приведены данные ЧПП лесных экосистем, определенные с использованием данных Государственного учета лесного фонда 2003 года. Как следует из таблицы 7, леса края производят порядка 321 Тг С (млн т органического углерода) в год, запасаемого в фитомассе лесного покрова. Это составляет 327 г С м⁻² год⁻¹ на территории собственно Красноярского края, 166 г С м⁻² год⁻¹ на Таймыре и 285 г С м⁻² год⁻¹ в Эвенкии.

Необходимость разработки нового метода определения ЧПП лесов была вызвана тем, что многочисленные результаты измерений, содержащиеся в опубликованных работах, содержат систематические ошибки значительной величины

Таблица 7

Чистая первичная продукция лесов Красноярского края, определенная по данным ГУЛФ (Тг С год⁻¹)

Породы и группы пород	ЧПП по фракциям фитомассы, Тг С/год							ЧПП, всего	в т. ч. ЗЧ
	ствол	ветви кроны	листья / хвоя	корни	подрост, подлесок	ЖНП	всего		
Красноярский край									
Хвойные	10.7	4.1	31.3	36.8	11.9	23.9	118.7	316	44.4
Сосна	4.4	0.9	6.5	6.2	1.6	9.3	28.9	286	10.7
Ель	1.0	0.6	4.3	7.9	2.6	3.5	19.9	323	6.5
Пихта	2.0	0.9	4.5	4.4	1.8	2.4	16.0	267	6.0
Лиственница	1.1	0.5	7.4	6.8	1.3	2.7	19.9	302	8.9
Кедр	2.3	1.2	8.5	11.4	4.6	5.9	34.0	389	12.2
МЛП	8.6	2.3	13.2	12.4	5.0	9.1	50.6	362	18.3
В т.ч. береза	7.0	1.9	11.3	9.9	4.2	7.6	41.9	366	15.6
осина	1.5	0.4	1.9	2.5	0.8	1.5	8.6	346	2.7
Прочие	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	457	0.0
Кустарники	0.0	0.3	0.4	0.2	0.0	0.2	1.1	183	0.5
Итого	19.3	6.8	44.9	49.4	17.0	33.2	170.5	327	63.3
Таймырский АО									
Хвойные	0.1	0.0	0.5	0.6	0.4	0.9	2.6	144	1.0
Ель	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.6	321	0.2
Лиственница	0.1	0.0	0.4	0.4	0.3	0.7	2.0	124	0.8
МЛП	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	290	0.0
Береза	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	290	0.0
Кустарники	0.0	0.9	1.1	0.4	0.0	0.5	2.8	189	1.3
Итого	0.1	0.9	1.6	1.1	0.5	1.4	5.5	166	2.3
Эвенкийский АО									
Хвойные	11.4	4.4	44.3	39.2	7.8	20.5	127.8	298	54.8
Сосна	1.1	0.2	1.5	1.6	0.3	2.9	7.7	201	2.8
Ель	0.1	0.1	0.9	1.5	0.7	0.9	4.2	331	1.5
Пихта	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	211	0.0
Лиственница	10.0	4.0	40.7	34.5	5.8	15.6	110.5	307	48.7
Кедр	0.2	0.1	1.2	1.7	1.0	1.2	5.3	321	2.0
МЛП	0.9	0.2	1.5	1.6	1.2	2.1	7.5	255	2.7
В т.ч. береза	0.8	0.2	1.4	1.6	1.1	2.1	7.3	253	2.6
осина	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	304	0.0
Кустарники	0.0	2.9	3.5	1.3	0.0	1.6	9.4	189	4.1
Итого	12.3	7.6	49.4	42.2	9.0	24.2	144.7	285	61.8
Всего по краю	31.7	15.3	94.9	92.7	26.5	58.8	320.7	302	127.4

ны [7, 17, 47]. Отрицательные систематические ошибки, видимо, свойственны и измерениям ЧПП в иных классах земельного покрова, в частности, болотам. Однако, достаточно полные измерения последних лет немногочисленны и несколько противоречивы. Так, предыдущие данные ЧПП для болот дают ЧПП переувлажненных территорий от 100 до 280 г С м⁻² год⁻¹ с долей ЧПП, размещенной в подземных органах 15–20 %. В течение последних лет результаты тщательных измерений в болотах Западной Сибири дали в среднем 270 г С м⁻² год⁻¹ и долю подземной ЧПП между 40 и 52 %. Для южной тайги данные для ЧПП болот еще выше – от 350 до 520 г С м⁻² год⁻¹. В то же время, в ряде экспериментов были получены значительно меньшие величины – так для олиготрофных болот Томской области среднее измерений в 1998–2000 гг. было оценено в 145 г С м⁻² год⁻¹. В целом, ЧПП нелесных классов земельного покрова были получены на основании данных полевых измерений, исходно собранных в базу данных Н. И. Базилевич [48], и дополненную нами измерениями последнего десятилетия.

Чистая первичная продукция сельскохозяйственных земель была определена, предполагая их однолетний цикл, т. е. в качестве ЧПП были использованы максимальные значения фитомассы в течение вегетационного периода.

Дыхание почв представляет собой второй по величине поток в глобальном углеродном цикле растительных экосистем [37]. Дыхание зависит от типа почвы и растительности, температуры и влажности почв [18], химического и физического состава почвенного субстрата [38], уровня продуктивности экосистем [22, 26], предыдущей истории землепользования и нарушений [11].

Данные измерений дыхания почв по району относительно немногочисленные и в основном ограничены летним периодом, в связи с чем были также использованы данные из сходных районов бореальной зоны. Согласно современным представлениям, зимний поток CO₂ составляет примерно 60 % потока в течение вегетационного периода. Прямая зависимость между величиной зимнего потока и температурой почв достаточно надежно не параметризована, но критический порог активного дыхания находится между –7 и –5°C; выше этого порога, зимний поток CO₂ положительно коррелирует с количеством лабильного органического вещества почвы [14, 30, 35]. Однако данные очень варьируют. Например, в лиственном лесу умеренной зоны на Хоккайдо, общее почвенное дыхание за 4 зимних месяца со снегом составило только 7.7 % годичной величины [21]. Базируясь на зональных оценках доли вклада зим-

него дыхания, были рассчитаны годичные величины почвенного дыхания.

Дополнительные неопределенности в оценках вносит необходимость разделения общего дыхания на автотрофное и гетеротрофное. Эти компоненты реагируют различно на изменение климатических параметров, в частности, возрастания температуры, хотя численные показатели этого плана немногочисленны. Доступные сводки данных свидетельствуют, что доля ГД зависит от температуры и типа растительности. Мы использовали средние данные, базируясь на опубликованных результатах исследований [20, 22, 23, 38, 43; и многие другие].

Результаты измерений для других классов растительности также существенно варьируют. Так, по оценкам (напр., 1, 3] эмиссии CO₂ из болот варьируют от 20 до 700 мг С м⁻² час⁻¹, с температурой как основным регулирующим фактором в бореальной зоне. Оценки общего, автотрофного и гетеротрофного дыхания для сельскохозяйственных угодий, болот, травяных и кустарниковых ассоциаций были проведены, основываясь на опубликованных экспериментальных данных.

Разложение детрита и потоки в гидросфере и литосфере. Существенное количество крупных древесных остатков (КДО), включающих валеж, сухостой и сухие ветви живых деревьев (диаметром свыше 1 см в тонком конце), определяет целесообразность расчета потока вследствие разложения КДО (эмиссии вследствие разложения мертвых корней включаются в ГД). Запасы КДО оценивались на основании многочисленных публикаций и данных лесоустройства [2, 40]. Для оценки потоков были использованы зональные коэффициенты разложения для двух подразделений КДО – диаметром в верхнем конце свыше 8 см и для диаметра 1 < d < 8 см [41].

Потоки в гидросферу и литосферу были оценены на основе опубликованных данных и материалов, приведенных на СД РОМ «Земельные ресурсы России» [49]. Экспериментальные данные для расчета этих потоков очень ограничены и точность полученных результатов невысока.

Результаты оценки углеродного бюджета. Суммарная аккумуляция углерода в растительных экосистемах лесотундры и таежной зоны края (блоки «растительность» и «почва») составляет 16819 млн т (160 т С га⁻¹). Основным депо углерода служит органическое вещество почв: в целом для территории края, масса углерода в нем в 4.5 раза выше, чем в фитомассе.

Результаты оценки основных потоков углеродосодержащих парниковых газов (CO₂ и CH₄) в сокращенном виде даны в таблицах 8 и 9.

Таблица 8

**Основные потоки парниковых газов,
обусловленными растительными экосистемами края (Тг С)**

КЗП	ЧПП	ГД	ДЕК	ГИД+ЛИТ	ЧЭП	N ₂ O	CH ₄
<i>Красноярский край</i>							
Итого	224.7	159.1	11.3	3.8	50.5	0.020	0.078
в т.ч. с.-х. земли	21.4	12.0	0.0	0.2	9.2	0.001	-0.004
леса	187.6	135.4	10.9	3.1	38.2	0.018	-0.137
болота	7.6	5.1	0.0	0.2	2.1	0.000	0.221
травы	2.2	1.9	0.0	0.1	0.2	0.000	-0.000
кустарники	0.7	0.5	0.0	0.0	0.2	0.000	-0.000
<i>Эвенкийский АО</i>							
Итого	177.2	120.7	8.3	7.1	41.1	0.013	0.358
в т.ч. леса	126.2	83.5	5.5	3.8	33.4	0.090	-0.061
болота	18.0	13.6	0.0	0.8	4.0	0.000	0.430
травы	5.6	4.2	0.0	1.1	0.3	0.001	-0.003
кустарники	12.1	8.3	0.0	0.6	3.2	0.001	-0.004
<i>Таймырский АО</i>							
Итого	92.0	65.3	1.7	6.5	18.5	0.005	0.950
в т.ч. леса	20.9	14.7	1.6	1.4	3.2	0.001	-0.005
болота	25.4	16.8	0.0	3.8	4.8	0.000	0.965
травы	41.6	30.7	0.0	3.7	7.2	0.003	-0.009
кустарники	2.4	1.7	0.0	0.1	0.6	0.000	-0.000
Всего по краю	493.9	345.1	21.3	17.4	110.1	0.038	1.316

Как следует из приведенных данных, чистая первичная продукция растительности края по состоянию на 2003 год составила 493.9 млн т углерода в год, из которых 334.7 Тг приходится на лесные экосистемы. Разница между ЧПП лесных экосистем, полученная на основе данных ГУЛФ (320.7 Тг С в табл. 9), и оценками, основанными на карте земельного покрова, невелика (+4.4 %). По существу это расхождение еще меньше, поскольку данные ГУЛФ не включают лесов за пределами территории лесного фонда. Самая высокая величина ЧПП отмечена на землях сельскохозяйственного назначения – 4.573 Мг (= т) С га⁻¹ год⁻¹. На втором месте находятся лесные экосистемы со средней ЧПП 3.350 Мг С га⁻¹ год⁻¹ в лесах Красноярского края, 2.789 Мг С га⁻¹ год⁻¹ в лесах Эвенкии и 2.248 Мг С га⁻¹ год⁻¹ – на Таймыре.

Гетеротрофное дыхание составляет около 70 % ЧПП, что объясняется невысокими темпами разложения органического вещества в высоких широтах. Величина потоков, обусловленных декомпозицией древесного детрита и транспортом углерода в гидросферу и литосферу, относительно невелика, вместе они составляют около 8 % ЧПП. В конечном счете, чистая экосистемная продукция (ЧЭП) оценена в 110.1 Тг (млн т) углерода, из которых 45.9 % приходится на территорию Красноярского края, 37.3 % – Эвенкийского АО и 16.8 % – Таймырского АО.

Средние величины потоков зависят от региона и класса земельного покрова. В среднем для края, ЧЭП составляет около 50 г С м⁻² год⁻¹, или 22.3 % от ЧПП.

Интенсивность продуцирования органического вещества всеми растительными системами нарастает в широтном направлении. Для лесов чистая первичная продукция нарастает от 1.8 т С га⁻¹ год⁻¹ в редкостойных лиственничниках тундры и лесотундры до 4.0 т С га⁻¹ год⁻¹ в высокопродуктивных лесах южно-таежной зоны. Структура ЧПП также меняется. Лесотундровые и северо-таежные леса, на 93–84 % представленные лиственничниками зеленомошной и липайниковой групп типов леса, характеризуются преимущественным (до 50–60 %) участием почвенного покрова в продуцировании растительной биомассы. В лесных экосистемах средней и южной тайги основная роль в продукционных процессах (70–80 % углерода чистой первичной продукции) принадлежит древесному ярусу.

Особенности деструкции фитодетрита в зональном аспекте обусловлены как разной длительностью периода биологической активности деструкторов, так и разной массой и соотношением компонентов в составе разлагающегося фитодетрита.

Интенсивность возвратного потока углерода в атмосферу практически на 90 % определяется минерализацией фитодетрита (сухостой, валеж, подстилка, корневой детрит). Основная его

Таблица 9

Плотности (средние значения, Мг С га ⁻¹) потоков углерода и азота в экосистемах							
КЭП	ЧПП	ГД	ДЕК	ГИД+ЛИТ	ЧЭП	N ₂ O	CH ₄
<i>Красноярский край</i>							
Итого	3.249	2.300	0.16376	0.0554	0.730	0.00029	0.00112
в т.ч. с.-х. земли	4.573	2.557	0.00119	0.0447	1.970	0.00024	-0.00081
леса	3.350	2.418	0.19430	0.0556	0.682	0.00032	-0.00244
болота	2.033	1.360	0.00409	0.0587	0.610	0.00002	0.05904
травы	1.179	0.987	0.00028	0.0646	0.064	0.00008	-0.00022
кустарники	2.349	1.745	0.00000	0.0673	0.537	0.00010	-0.00099
<i>Эвенкийский АО</i>							
Итого	2.347	1.599	0.11014	0.0940	0.544	0.00017	0.00474
в т.ч. с.-х. земли							
леса	2.739	1.811	0.11966	0.0836	0.725	0.00020	-0.00131
болота	2.405	1.816	0.00000	0.1091	0.480	0.00002	0.05757
травы	0.698	0.525	0.0000	0.1352	0.038	0.00007	-0.00031
кустарники	1.838	1.258	0.0000	0.0880	0.492	0.00014	-0.00056
<i>Таймырский АО</i>							
Итого	1.208	0.857	0.02267	0.0854	0.263	0.00006	0.01248
в т.ч. с.-х. земли							
леса	2.248	1.587	0.17555	0.1513	0.334	0.00015	-0.00056
болота	1.678	1.106	0.00000	0.0788	0.493	0.00002	0.06371
травы	0.840	0.620	0.00000	0.0742	0.146	0.00006	-0.00018
кустарники	1.939	1.412	0.00023	0.0650	0.462	0.00008	-0.00024
Всего	2.237	1.563	0.096	0.078	0.499	0.00017	0.00596

Примечание: Сокращения в таблицах 5 и 6: ЧПП – чистая первичная продукция, ГД – гетеротрофное дыхание; ДЕК – декомпозиция КДО; ГИД+ЛИТ – поток в гидросферу и литосферу; ЧЭП – чистая экосистемная продукция.

часть – до 90 % в лесотундре и 70 % в южной тайге – формируется при разложении лесной подстилки. Вклад гумуса почвы в формирование потока С – СО₂ в лесах южной тайги не превышает 13 %, в северных лесах – 3–6 %. Анализ соотношения интенсивности двух основных потоков углеродного цикла – продуцирование органического вещества в процессе фотосинтетической ассимиляции атмосферного углерода и его освобождение при разложении органического вещества с последующим возвратом в атмосферу показал, что леса Красноярского края в широтном диапазоне от 56° до 70° с. ш. и меридиональном – от 80° до 110° в. д. служат стоком углерода. Чистая экосистемная продукция (ЧЭП) различна для различных классов растительности и в среднем (для всего растительного покрова) составляет 0,50 т С га⁻¹ год⁻¹.

Чтобы оценить чистый сток (секвестр) углерода, необходимо из величины ЧЭП вычесть потоки, обусловленные природными и антропогенными нарушениями (пожары, массовые вспышки размножения насекомых и др.). Эмиссии вследствие пожаров были оценены, используя методы, описанные в Shvidenko and Nilsson [40] и Kajii et al. [24]. Площади, пройденные пожарами, были оценены на основе спутниковых данных. Площади ежегодных

растительных пожаров на территории объединенного края очень варьируют, от 0.1 до 1.1 млн га. Официальная статистика приводит данные только для активно охраняемых земель лесного фонда, которые существенно занижают реальные площади. В 2003 году (год высокой пожарной опасности) общая площадь всех растительных пожаров на территории края была оценена в 1214 тыс. га с суммарной эмиссией 14.0 Тг углерода.

Данные по другим нарушениям, в частности, вследствие массовых вспышек насекомых, неполны. Последняя значительная вспышка сибирского шелкопряда в южно-таежных лесах края привела к значительному повреждению лесов на площади свыше 1 млн га. Размножение сибирского шелкопряда в северных лиственничниках 2001–2002 гг. на территории, оцениваемой для всей России в 11 млн га (из которых около 2 млн га приходится на территорию края), не привело к существенным повреждениям лесов. В целом, наша оценка прямых эмиссий вследствие повреждения насекомыми в 2003 году составляет 2 Тг С.

Таким образом можно заключить, что чистая биомная продукция растительных экосистем края составила в 2003 году около 94 млн т углерода или 43 г С м⁻² год⁻¹. Эта величина не включает потоков, обусловленных потреблени-

Таблица 10

Поглощение метана сухоходольной растительностью
(кг CH₄ га⁻² год⁻¹)

Зона	Поглощение метана на сухоходах по классам растительности		
	леса	кустарники	травы
Тундра	0.3	0.22	0.15
Лесотундра	0.5	0.38	0.25
Редкостойная тайга	0.6	0.45	0.30
Северная тайга	0.7	0.52	0.35
Средняя тайга	2.0	1.5	1.0
Южная тайга	2.7	2.02	1.35
Лесостепь	3.5	2.62	1.75
Степь	3.8	2.85	1.90

ем растительных продуктов сельского и лесного хозяйства. Приближенный расчет показывает, что включение в расчет потоков вследствие потребления продуктов сельского хозяйства и заготовленной древесины, снижает значение ЧБП примерно на треть.

Эмиссии метана и закиси азота. Две противоположные группы процессов определяют величину эмиссий метана (CH₄). Метаногенез происходит при анаэробных условиях. Если торф заполнен водой, образующийся CH₄ поступает в атмосферу. Если уровень грунтовых вод ниже поверхности, аэробные условия верхнего слоя существенно увеличивают окисление CH₄, произведенного в более глубоких анаэробных слоях. Наличие анаэробных условий и отсутствие значительной аэробной зоны – два важнейших условия, обеспечивающих устойчиво высокий CH₄ поток [39], хотя и другие факторы влияют на этот процесс.

Данные о величине эмиссий из разных почв и земельных классов разнообразны и существенно варьируют. Наличие значимых корреляций между интенсивностью потока CH₄ и температурой субстрата [25, 27], уровнем грунтовых вод [31, 32], особенностями климата [39] позволяет разработать обобщенные модели влияния основных факторов на величину эмиссий метана. Такие модели были разработаны на основе многочисленных публикаций и результатов измерений [10, 16, 33, 34, 44–46; и многие другие]. Так, для оценки поглощения метана сухоходольными почвами в зависимости от температуры была использована модель

$$[CH_4] = 3.0 + 0.3T - 0.025 T^2,$$

где [CH₄] – поглощение CH₄ (кг CH₄ га⁻¹ yr⁻¹) и T – средняя годовая температура. Для расчета была составлена специальная матрица поглощения метана в зависимости от биоклиматических зон и трех обобщенных классов растительности (леса, кустарники и травяные сообщества) (табл. 10).

Расчет эмиссий метана из болот был произведен на основе измерений, выполненных в основном в Западной Сибири. Данные эти существенно варьируют – от 1.8 г CH₄ м⁻² год⁻¹ [36] до 5.1 г CH₄ м⁻² год⁻¹ [9, 19]. В расчете были использованы следующие усредненные данные (кг С – CH₄ га⁻¹ год⁻¹): тундра и лесотундра 70, редкостойная тайга 65, северная тайга 55, средняя тайга 45, южная тайга 35, лесостепь 25 и степь – 20 кг С – CH₄ га⁻¹ год⁻¹.

Детальные результаты расчетов приведены в таблицах 8 и 9. Как следует из этих данных, эмиссии метана в атмосферу из болот оцениваются в 1.616 Тг С – CH₄. В целом, учитывая поглощение метана сухоходольными экосисте-

мами, суммарная эмиссия составляет 1.316 Тг С – CH₄ га⁻¹ год⁻¹.

Закись азота обеспечивает примерно 5 % ожидаемого глобального потепления и почва рассматривается как главнейший источник N₂O. Эмиссии N₂O в основном образуются при микробной нитрификации и денитрификации минерального азота почв. Эмиссии N₂O зависят от многих факторов. Доступные данные сильно варьируют [12, 13, 15, 28, 29, 33, 34, 44; многие другие]. Даже для средних данных оценки существенно различаются. Так, средняя оценка для бореального лесного биома по оценке Potter [50] равна 0.18 кг N₂O га⁻¹ год⁻¹, а по другой 0.27 кг N₂O га⁻¹ год⁻¹ [51].

Согласно нашим расчетам, эмиссии закиси азота составили в 2003 году 0.038 млн т N₂O.

Полученные результаты использованы в последующем анализе влияния отдельных секторов на бюджет парниковых газов.

Заключение

Как показано выше, суммарная аккумуляция углерода в растительных экосистемах края на площади 220.8 млн га (территория производящих земель в крае) составляет 49274 Пг (= млрд т) органического углерода, или 223 Мг С га⁻¹, из которых 18.3% находится в растительном веществе и 81.7% в почвах. Из 6.635 Пг С в фитомассе 85% находится в лесных экосистемах. Для лесов отношение органического углерода почвы к углероду растительности составляет от 2.4:1 (Красноярский край) до 5.23:1 (Таймыр). Основная масса углерода сосредоточена в почвах, которые содержат в 1 м верхнем слое 182.5 т С га⁻¹ (на минеральных почвах эта величина включает дополнительно верхний органогенный слой). Это создает возможность значительного увеличения эмиссий при потеплении и таянии вечной мерзлоты в высоких широтах. Значительное количество фитодетрита (2.349 Пг) является потенци-

альным источником увеличения эмиссий при растительных пожарах.

Два основных потока влияют на С – CO₂ баланс растительности: чистая первичная продукция и гетеротрофное дыхание: ЧПП растительности края определена в 494 млн т углерода в год, что в среднем составляет от 3,249 т С га⁻¹ год⁻¹ для экосистем Красноярского края до 1,208 т С га⁻¹ год⁻¹ в экосистемах Таймырского АО. Продуктивность различных классов земельного покрова уменьшается в следующей последовательности: сельскохозяйственные земли – леса – кустарники – болота – травяные сообщества. Низкая продуктивность травяных сообществ определяется большими территориями тундровой и высокогорной растительности.

Потоки углерода, обусловленные разложением крупных древесных остатков (21,3 млн т С в год) и выносом в гидросферу и литосферу (17,4 млн т в год) составляют около 5 % ЧПП, но более трети (35 %) чистой экосистемной продукции экосистем.

Потоки вследствие нарушений (пожары и насекомые) очень сильно варьируют в зависимости от погодных условий вегетационных сезонов. Оценка для 2003 года (год высокой пожарной опасности) составила 16 млн т углерода, из них порядка 85 % эмиссий были обусловлены лесными пожарами.

Таким образом, растительные экосистемы края обеспечили в 2003 году чистый сток углерода в 94 млн т углерода, или 43 г С м⁻² год⁻¹, что свидетельствует о значительных возможностях биоты региона в части поглощения парниковых газов. Эта величина не учитывает эмиссий вследствие потребления сельскохозяйственных и лесных продуктов. Расчеты эмиссий вследствие лесозаготовок и использования древесины (включая разложение древесных продуктов, полученных из заготовок предыдущих лет) оценивается в 10 млн С год⁻¹.

Все предыдущие расчеты проведены для наземной растительности края. Определенный вклад в суммарные выбросы парниковых газов обеспечивают процессы жизнедеятельности и деструкции биоты водоемов. Ресурсы поверхностных вод Красноярского края огромны и сосредоточены в 200 тыс. рек, 183 тыс. озер, 4 зарегулированных водохранилищах каскада ГЭС на крупных реках, 1064 водохранилищах и прудах на малых реках, болотах и составляют около 933 км³ в год (22 % от общероссийских). Распределение поверхностных вод на территории края неравномерное, обусловленное в основном условиями орографии и климата.

Плотность бактериопланктона, например, на акватории только Красноярского водохранилища достигает 2,8–4,2 млн кл./м³. В составе

фитопланктона этого водохранилища насчитывается 188 видов и форм. Доминируют диатомовые (50–60 % видового разнообразия). Плотность фитопланктона варьирует в пределах 840–89500 млн кл./м³, биомассы – 500–6000 мг/м³. Предельно высокие значения плотности обусловлены массовым развитием сине-зеленых водорослей. В составе зоопланктона зарегистрировано 109 видов и форм. Плотность зоопланктона изменяется от 9 до 5,2 тыс. экз./м³, а биомасса – от примерно 2000 мг/м³ до 1,15 г/м³. В донных сообществах формируются структурообразующие комплексы с плотностью до 3,8 тыс. экз./м² и массой до 3 г/м². Эти данные представляют достаточное свидетельство того, что во всех поверхностных водах Красноярского края аккумулированы большие запасы органического вещества биоты, продуцирующей CO₂.

Другим значительным резервуаром водорастворимого органического вещества является речной сток. Терригенное органическое вещество в общей сумме водорастворенных органических соединений преобладает в опресненных водах. Северные реки отличаются повышенным содержанием органического углерода и составляет в среднем 10 мг С/литр. Содержание растворенного CO₂ в зоне опресненных вод уменьшается от поверхности до дна в 1,5–2 раза.

Как было показано выше, вынос органического углерода реками оценивается на уровне 17 млн т в год, что составляет почти 16 % чистой экосистемной продукции растительности края.

Источником углекислого газа служат также карбонатные отложения (лессы, лессовидные суглинки), являющиеся почвообразующими породами для многих почв суббореального пояса (лесостепная и степная природные зоны) Красноярского края. Процессы выветривания этих пород сопровождаются возвращением CO₂ в атмосферу по реакции: $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$.

Метан – CH₄ – в балансе углерода представляет вторую по значимости составляющую. Его парниковый эффект почти в 20 раз выше, чем у углекислоты. Главным источником метана служат болота, площадь которых на территории Красноярского края по нашим оценкам, базирующимся в основном на спутниковых данных, составляет 26,358 млн га (литературные данные дают близкую величину – 25,114 млн га). Основными производителями метана являются анаэробные бактерии, перерабатывающие образовавшуюся в результате фотосинтеза органику. Интенсивность образования метана в болотах очень варьирует, что порождает значительные сложности в надежной оценке его эмиссий. Метан нестабилен в современной окислительной

атмосфере, в верхних слоях атмосферы при участии гидроксил ионов он реагирует с кислородом, образуя углекислый газ и воду.

Наша оценка суммарной эмиссии метана, включающая как его выделение переувлажненными территориями, так и поглощение суходольными растительными экосистемами, составляет 1.316 Тг CH_4 в год, что эквивалентно примерно 25 Тг CO_2 -экв. в год.

Большим парниковым потенциалом обладает закись азота (N_2O). Она образуется в почве при нитрификации и денитрификации. В природных условиях закиси азота образуется мало, эмиссия происходит в основном из агроценозов, особенно если последние получают большие дозы минеральных и органических удобрений. Интенсивность денитрификации возрастает обычно в ризосфере растений за счет постоянного поступления органических веществ в форме корневых выделений. Еще более выражена денитрификация в водных ландшафтах (болота, озера, пруды и т. д.). Наша оценка эмиссий закиси азота природными экосистемами (без учета влияния удобрений в сельском хозяйстве) составила 0.038 Тг N_2O в год, что примерно соответствует парниковому эффекту, производимому эмиссиями метана в регионе.

Красноярский край имеет огромные потенциальные возможности в выполнении Россией Протокола Киото как в области сокращения промышленных эмиссий, так и, особенно, в биосфере, в части регулирования землепользования, ведения лесного и сельского хозяйства.

Существующая система учета парниковых газов, предусмотренная Конвенцией, Протоколом и последующими решениями Конференции Сторон сложна и содержит ряд положений, требующих усовершенствования и уточнения. В настоящее время практически все решения (например, по проектам совместного осуществления) принимаются на федеральном уровне. Такая централизация представляется излишней, может приводить к неэффективным решениям и требует длительного времени.

Вместе с тем, сегодняшняя (существенно неполная) нормативно-регулирующая база, практика рассмотрения и утверждения проектов совместного осуществления не отвечают особенностями долгосрочных проектов, например, в области лесовосстановления, и требует модификации.

Представляется необходимым системный анализ и разработка опережающей региональной нормативно-справочной базы мероприятий по противодействию климатическим изменениям, который могли бы учитываться в рамках механизмов Киотского протокола. Задачи такой работы достаточно обширны – от создания

и внедрения системы контроля эмиссий парниковых газов на промышленных предприятиях до законодательного определения видов деятельности в области землепользования, лесного и сельского хозяйства, которые могли бы быть включены в экономические механизмы Протокола, и методов оценки эмиссий вследствие этих мероприятий.

Вместе с тем, отдельные научные разработки не могут полностью обеспечить потребности непрерывного учета эмиссий и поглощений парниковых газов из всех источников. Крайне нужна постоянно действующая система инвентаризации эмиссий как антропогенных (в области энергетики, промышленности, транспорта), так и так и природных, во всех классах земельного покрова. Такая система могла бы быть объединена с мониторингом загрязняющих веществ и состояния внешней среды. Радикальное решение проблемы видится в создании специальной интегральной системы наблюдений, для чего существуют достаточные научные и технологические предпосылки.

Библиографический список

1. Инишева Л. И., Белова Е. В., Дементьева Т. В. и др. Эмиссия CO_2 из болот подзоны южной тайги Западной Сибири. Доклады конференции, ГЕОС. – Москва, 1999. – С. 188–191.
2. МПР. Методика определения запасов и массы древесного детрита на основе данных лесоустройства. Министерство природных ресурсов Российской Федерации. – Пушкино, 2002. – 44 с.
3. Наумов А. В. и др. К вопросу об эмиссиях углекислоты и метана из болотных почв Южного Васюганья // Сибирский экологический журнал. – 1994. – № 3. – С. 269–274.
4. Соколов В. А. Основы управления лесами Сибири. – Красноярск: Изд-во СО РАН, 1997. – 308 с.
5. Соколов В. А., Фарбер С. К. Возобновление в лесах Восточной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 219 с.
6. Швиденко А. З., Страхов В. В., Нильссон С. и др. Продуктивность лесов России. 3. Пространственный масштаб оценки продуктивности лесов России // Лесохозяйственная Информация. – Москва: Федеральная служба лесного хозяйства России, 2000. – Вып. 1–2. – С. 7–23.
7. Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Ваганов Е. А., Нильссон С. Чистая первичная продукция лесных экосистем России: новая оценка // Доклады АН, 2008. – Т. 421. – № 6. – С. 822–825.

8. Швиденко А., Нильссон С. Полный углеродный бюджет наземных экосистем на национальном и региональном уровнях // Бюллетень Российского национального комитета по Международной геосферно-биосферной программе. – Новосибирск: СО РАН, 2005. – № 4. – С. 40–44.
9. Alm J., Saarnio S., Nykänen H., Sivola J. and Matikainen P. J. Winter CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeochemistry*, 1999. – V. 22. – P. 163–186.
10. Arnold von K., Weslien P., Nilsson M., Svensson B. H., Klemmedtsson. Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from drained coniferous forests on organic soils. *Forest Ecology and Management*, 2005. – V. 210(1–3). – P. 239–254.
11. Bond-Lamberty B., Wang C. and Gower S. T. Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal spruce chronosequence. *Tree Physiology*, 2004. – V. 24. – P. 1387–1395.
12. Bouwman A. F. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, in A. F. Bouwman (ed.) *Soils and the Greenhouse Effect*. 1990. John Wiley, New York. – P. 61–127.
13. Bowden R. D., Steudler P. A., Melillo J. M. and J. D. Aber. Annual nitrous oxide fluxes from temperate forest soils in the northeastern United States. *Journal of Geophysical Research*, 1990. – V. 95. – P. 13997–14005.
14. Brooks P. D., McKinight D. and Elder K. Carbon limitation of soil respiration under winter snowpacks: potential feedbacks between growing season and winter carbon fluxes. *Global Change Biology*, 2004. – V. 11. – P. 231–238.
15. Brumme R. and F. Beese. Effect of liming and nitrogen fertilization on emission of CO₂ and N₂O from a temperate forest. *Journal of Geophysical Research*, 1992. – V. 97. – P. 12851–12858.
16. Bubier J., Moore T., Savage K. and Crill P. A comparison of methane flux in a boreal landscape between a dry and a wet year. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005. – V. 19, GB 1023, doi: 10.1029/2004GB 002351.
17. Crow S. E. and Wieder R. K. Assessing the role of roots and root exudation in CO₂ emission from the peat surface: Preliminary results. In S. V. Vasiliev, A. A. Titlyanova, A. A. Velichko (eds.) *West Siberian Peatlands: Past and Present*, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk. 2001. – P. 74–78.
18. Dilustro J. J., Collins B., Duncan L. and Crawford C. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southern mixed pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2005. – V. 204. – P. 85–95.
19. Dise N. D. Winter fluxes of methane from Minnesota peatlands. *Biogeochemistry*, 1992. – V. 17. – P. 71–83.
20. Hanson P. J., Edwards N. T., Garten C. T. and Andrews J. A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000. – V. 48. – P. 115–146.
21. Hirano T. Seasonal and diurnal variations in topsoil and subsoil respiration under snowpack in a temperate deciduous forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005. – V. 19, GB 2011, doi: 10.1029/2004GB002259.
22. Högberg P., Nordgren A., Buchmann N. et al. Large-scale forest gridding shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, 2001. – V. 411. – P. 789–792.
23. Högberg P., Nordgren A., Ågren G. I. Carbon allocation between tree root growth and root respiration in boreal pine forests. *Oecologia*, 2002. – V. 132. – P. 579–581.
24. Kajii Y., Kato S., Streets D. et al. Vegetation Fire in Russia in 1998: Estimation of area and emissions of pollutants by AVHRR satellite data. 2003. *Journal of Geophysical Research*, 108, doi:10.1029/2001JD001078.
25. Khali M. A. K. and Rasmussen R. A. Climate-induced feedbacks for the global cycles of methane and nitrous oxide. *Tellus B.*, 1989. – V. 41. – P. 554–559.
26. Kuzyakov Y. and Cheng W. Photosynthesis control of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. *Soil Biol. Biochemistry*, 2001. – V. 33. – P. 1915–1925.
27. Lashof D. A. The dynamic greenhouse: Feedback processes that may influence concentrations of atmospheric trace gases and climate change. *Climatic Change*, 1989. – V. 14. – P. 213–242.
28. Martikainen P. J., Nikaenen H., Lang K., Alm J. and Silvola J. Emissions of methane and nitrogen oxides from peatland ecosystems. In M. Kanninen and P. Heikinheimo (eds) *The Finnish Research Programme on Climate Change*, Pinatuskeskus Oy, Helsinki, 1995. – P. 286–291.
29. Martikainen P. J., Nikaenen H., Crill P. and Silvola J. Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. *Nature*, 1993. – V. 366. – P. 51–53.
30. Moonson R. K., Turnipseed A. A., Sparks J. P. et al. Carbon sequestration in a high-elevation, subalpine forest. *Global Change Biology*, 2002. – V. 8. – P. 459–478.
31. Moore T. R., Roulet N. T. and Knowels R. Spatial and temporal variation of methane flux from subarctic/northern boreal fens. *Global Biogeochemical Cycles*, 1990. – V. 4. – P. 29–46.

32. Moore T. R. and Roulet N. T. Methane flux: water table relations in northern wetlands. *Geophysical Research Letter*, 1993. V. 20. P. 587–590.
33. Mosier A. R., Schimmel D. S., Valentine D., Bronson K. F. and Parton W. J. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature*, 1991. – V. 350. – P. 330–332.
34. Mosier A. R., Klemedtsson L. K., Sommerfeld R. A. and Musselman R. C. Methane and nitrous oxide flux in a Wyoming subalpine meadow. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993. – V. 7, No 4. – P. 771–784.
35. Oechel W. C., Vourlitis G. L., Hastings S. J. et al. Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Nature*, 2000. – V. 406. – P. 978–981.
36. Panikov N. S., Titlianova A. A., Paneeva et al. *Doklady of RAS*, 1993. – V. 330(3). – P. 388–390.
37. Raich J. W. and Schlesinger W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992. – V. 44B. – P. 81–99.
38. Reich J. W. and Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000. – V. 48. – P. 71–90.
39. Roulet N. T., Ash R., Quinton W. and Moore T. Methane flux from drained northern peatlands: Effect of persistent water table lowering on flux. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993. – V. 7(4). – P. 749–769.
40. Shvidenko A. Z., Nilsson S. Fire and Carbon Budget of Russian Forests. Chapter 16 in E. S. Kasischke, B. J. Stock (eds.) *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Springer Verlag, Ecological Studies, 2000. – V. 138. – P. 289–311.
41. Shvidenko A. and Nilsson S. A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998, 2003 // *Tellus* 55B. – P. 391–415.
42. Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., and Bouloui Y. Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests // *Ecological Modelling*, 2007. – Vol. 204. – P. 163–179.
43. Sivola J., Alm J., Ahlholm U., Nykänen and Martikainen P. J. The contribution of plant roots to CO₂ fluxes from organic soils. *Biology and Fertility of Soils (Historical Archive)*, 1996. – V. 23 (2). P. 126–131.
44. Sommerfeld R. A., Moiser R. and Musselman R. C. CO₂, CH₄ and N₂O flux through a Wyoming snowpack and implications for global budgets. *Nature*, 1993. – V. 361. – P. 140–142.
45. Steudler P. A., Bowden R. D., Melillo J. M. and Aber J. D. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature*, 1989. – V. 341. – P. 314–316.
46. Striegl R. G., McConaughy T. A., Thorstenson D. C., Weeks E. P. and Woodward J. C. Consumption of atmospheric methane by desert soils. *Nature*, 1992. – V. 357. – P. 145–147.
47. Vogt K. A., Grier C. C., and Vogt D. J. Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. *Adv. Ecol. Res.*, 1986. – V. 15. – P. 303–377.
48. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии // Москва: Наука, 1993. – 293 с.
49. Stolbovoi V. and McCallum I. (ed.). *Land resources of Russia (CD ROM)*. – Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis. 2002 (available at [http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/Download/Data/Russian Land Resources](http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/Download/Data/Russian%20Land%20Resources)).
50. Potter C. Predicting climate change effects on vegetation, soil thermal dynamics, and carbon cycling in ecosystems of interior Alaska. *Ecological Modelling* 175 (1), 2004. – P. 1–24.
51. Brumme R. and Beese F. Effect of liming and nitrogen fertilization on emission of CO₂ and N₂O from a temperate forest. *Journal of Geophysical Research*, 1996. – V. 97. – P. 12851–12858.