



# Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах<sup>1</sup>

Д. Замолодчиков, д-р биол. наук, ЦЭПЛ РАН

Окончание. Начало — в № 4 (29) за 2011 год

## Информационная система определения и картирования депонируемого лесами углерода УГЛТУ

Современная версия собранной и опубликованной В. А. Усольцевым базы данных продукционных характеристик лесных насаждений насчитывает 8 000 записей по фитомассе и 1 200 записей по чистой первичной продукции [9]. Эта информация использована автором базы данных для формирования системы оценки фитомассы и чистой первичной продукции в лесах по данным ГУЛФ. Сначала были идентифицированы модели, описывающие зависимость фитомассы каждой фракции (стволы, ветви, хвоя, корни, нижние ярусы) от возраста и объемного запаса насаждения в дифференциации по древесным породам и классам возраста. Для чистой первичной продукции (которую автор часто называет депонированием углерода лесами) найден набор функций от логарифма фракций фитомассы.

Полученные уравнения применяются для расчета фитомассы и чистой первичной продукции по данным ГУЛФ в разрезе лесохозяйственных предприятий (ныне эта структура лесопромышленного управления именуется лесничеством). Для оцениваемых лесхозов формируются таблицы-матрицы распределений покрытой лесом площади и запаса стволовой древесины по лесобразующим породам и классам возраста. С учетом возраста главной рубки, назначенного лесоустройством по каждой породе, группы возраста переведены в классы возраста. Путем табулирования моделей по объемному запасу древесины и возрасту насаждений каждой ячейки таблиц-матриц по лесхозам вначале оцениваются запасы фитомассы на единицу площади, затем умножением их на покрытую лесом площадь, соответствующую каждой ячейке, рассчитываются запасы фитомассы на всей площади. Суммирование результатов по классам возраста дает итоговые запасы фитомассы по каждой фракции отдельно для каждой породы, дальнейшее суммирование последних по фракциям и породам приводит к итоговым запасам фитомассы на всей площади каждого лесхоза. Алгоритм совмещения моделей чистой первичной продукции с матрицами данных по лесхозам аналогичен таковому для фитомассы с той лишь разницей, что при табулировании моделей в них подставляются величины не только возраста и запаса стволовой древесины, но и найденные ранее массы хвои, корней и нижних ярусов. В качестве примера итогового результата приведем карту распределения средних значений фитомассы в лесных насаждениях Уральского федерального округа (рис. 1).

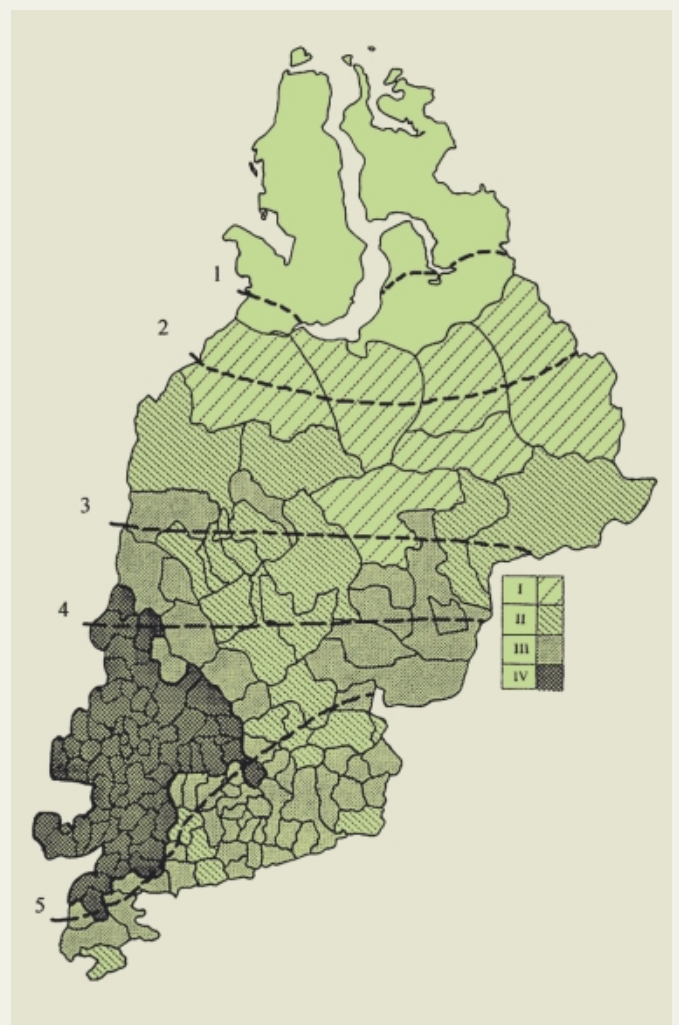


Рис. 1. Распределение запасов углерода в фитомассе насаждений в пределах Уральского федерального округа в расчете на общую (в границах лесхозов) площадь [9]:

градации запасов углерода, т С · га<sup>-1</sup>: I — 0–10; II — 10–25; III — 25–40; IV — 40–100;

южные границы биоклиматических зон: 1 — тундры, 2 — лесотундры, 3 — северной тайги, 4 — средней тайги, 5 — южной тайги

<sup>1</sup> Материал подготовлен в рамках проекта «Интенсивное и устойчивое лесопользование в России», который осуществляется при поддержке Агентства США по международному развитию (USAID).



Реализация обсуждаемой системы оценки углерода лесов России осуществлена в среде СУБД<sup>1</sup> ADABAS и редактора приложений Natural [3, 4]. ADABAS является профессиональной промышленной СУБД, предназначенной для создания информационных систем и решающей ряд прикладных задач. Она обеспечивает высокую производительность при работе с большими и сверхбольшими базами данных, обладает развитыми средствами контроля, поддержания и восстановления целостности баз данных. К настоящему времени на базе ADABAS автоматизирована деятельность таких организаций, как РАО «Газпром», ОАО «Аэрофлот» и многих других. Приоритет в приложении данной СУБД к автоматизации деятельности предприятий лесопромышленного комплекса принадлежит цитируемым авторам. Потенциальное применение Информационной системы определения и картирования депонируемого лесами углерода сторонними пользователями связано с решением вопросов, обеспечивающих авторские права разработчиков СУБД ADABAS и самой системы.

Резюмируя, отметим, что Информационная система определения и картирования депонируемого лесами углерода использует конверсионный подход в отношении запасов фитомассы, которые, в свою очередь, служат основой для вычисления чистой первичной продукции. Оценка бюджета углерода лесов данной системой не предусматривается, поскольку расчеты ведутся лишь для входящего потока углерода.

### FORRUS

В основе системы FORRUS<sup>2</sup> лежит эколого-физиологическая модель, описывающая процессы внутри- и межвидовой конкуренции древесных растений за световые ресурсы [12, 23]. Основным лимитирующим фактором полагается доступная фотосинтетически активная солнечная радиация. Моделируются процессы роста, изреживания, естественного возобновления. Модель позволяет прогнозировать динамику основных показателей на таксационном выделе или их совокупности с шагом в 5 лет. В качестве исходных используются стандартные данные, получаемые при лесоустройстве. Эти данные включают планы насаждений, таксационные описания, таблицы хода роста, характеристики условий местобитания исследуемого лесного массива, биологические характеристики пород. Для формирования пространственно-распределенных массивов данных и последующего моделирования модель снабжена оболочкой, разработанной в среде CommonGIS. Использование FORRUS сторонними пользователями возможно при условии организации совместных исследований либо на платной основе [28].

Система FORRUS позволяет прогнозировать развитие крупных многовидовых разновозрастных лесных массивов (до 100 тыс. га), выдавая на каждом шаге моделирования (5 лет) видовой состав древостоя, полноту, характеристики отдельных пород древостоя (возраст, запас, густота, средняя высота и диаметр) и другие сведения. Система построена по блочному типу. Основной блок характеризует естественное развитие лесных насаждений. Блок экзо- и антропогенных воздействий позволяет моделировать различные сценарии ведения лесного хозяйства, такие как

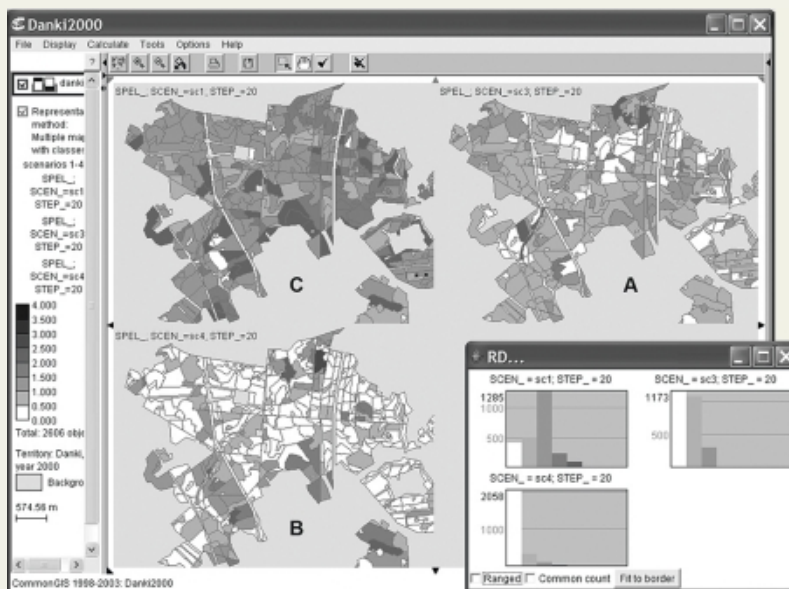


Рис. 2. Прогноз возрастного состава лесных насаждений Данковского лесничества в системе FORRUS [42] при применении в течение 100 лет определенных лесохозяйственных практик (А — нормативная, В — нелегальная, С — охранная). Темный фон заливки полигонов соответствует более высокому возрасту доминирующих древесных пород

естественное развитие, учет лесохозяйственных мероприятий (рубок ухода, обновления, переформирования, лесовосстановления). Система позволяет прогнозировать динамику древостоя при проведении различных лесохозяйственных мероприятий с учетом пространственной структуры лесных насаждений [13]. Примером такого исследования служит прогнозный анализ породного состава и возраста лесных насаждений Данковского лесничества Опытного лесного хозяйства «Русский лес» (рис. 2).

В отличие от большинства рассматриваемых в обзоре систем FORRUS предназначена для комплексной оценки динамики структуры лесных насаждений, включая вопросы биоразнообразия, устойчивого лесопользования, экономической эффективности лесохозяйственной деятельности и т. д. Публикации, в которых бы рассматривались углеродные приложения FORRUS, к настоящему времени отсутствуют. Потенциально высокие возможности FORRUS по осуществлению оценки динамики углерода в лесах может продемонстрировать ее приложение к анализу влияния различных режимов рубок ухода и сохранения подроста при главных рубках на объемные запасы ельников Ляскульского лесничества Республики Карелии (рис. 3). Напомним, что объемные за-

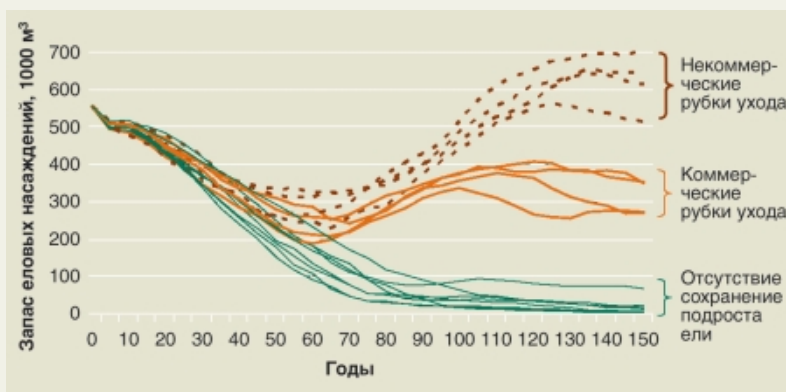


Рис. 3. Прогноз динамики суммарных запасов древесины в еловых насаждениях Ляскульского лесничества в системе FORRUS [24] при различных режимах рубок ухода и сохранения подроста в процессе главных рубок

<sup>1</sup> Система управления базами данных (прим. ред.).

<sup>2</sup> Forest of Russia — Российский лес.



пасы древесины легко пересчитать в углерод фитомассы с использованием конверсионных коэффициентов.

## EFIMOD

Система имитационных моделей EFIMOD была разработана для анализа сопряженного описания динамики почвы и растительности в лесных экосистемах. EFIMOD состоит: из индивидуально-ориентированной модели древостоя, позволяющей моделировать динамику разновозрастных и смешанных древостоев; из блока моделирования динамики органического вещества почвы ROMUL; из статистического генератора температуры и влажности почвы SCLISS.

Модель динамики древостоя EFIMOD детально описана в ряде научных публикаций [21, 32]. Это индивидуально-ориентированная модель с точными позициями деревьев, располагаемых в ячейках квадратной решетки. Согласно модельному описанию каждое дерево состоит из пяти компонентов (ствол, ветви, листва, толстые корни, тонкие корни) и обладает своей собственной зоной питания, зависящей от возраста. Дерево взаимодействует с ближайшим окружением посредством затенения и корневой конкуренции за доступный азот почвы, причем прирост дерева зависит от ресурса, находящегося в дефиците (солнечная радиация или доступный азот). Модель позволяет описывать круговорот углерода и азота в системе «древостой — почва».

Блок моделирования динамики органического вещества почвы ROMUL, сопряженный с моделью EFIMOD через поток опада, базируется на следующих основных допущениях:

- разложение органического вещества происходит в результате сукцессионных изменений комплексов организмов-деструкторов, соответствующих используемым в лесном почвоведении типам гумуса (грубый гумус, модер, мульч);
- видовой состав и количество организмов-деструкторов зависит от температуры и влажности подстилки и почвы, содержания азота и зольности когорты напочвенного (внутрипочвенного) опада;
- скорость минерализации элементов соответствует скорости разложения органического вещества, за исключением кинетики азота, которая происходит значительно медленнее и обладает рядом специфических особенностей;
- минерализованный азот полностью потребляется растениями, избыточный азот иммобилизуется в органическом веществе почвы.

Влияние климатических факторов (температуры и влажности лесной подстилки и собственно почвы) на процессы минерализации и гумификации опада учитывается в блоке ROMUL при помощи генератора почвенного климата SCLISS, который позволяет имитировать среднемесячные показатели этих факторов по известным статистическим характеристикам многолетних данных и пересчитывать стандартные метеоданные в температуру и влажность органических и минеральных горизонтов почвы [2].

Инициализация модели осуществляется путем оценки начальных значений пулов органического вещества и азота в почве разных типов местообитания и типов леса. Входными параметрами EFIMOD являются: для каждого вида и возрастной когорты (элемента леса) в каждом древостое средние диаметр и высота, сумма площадей сечений, запас, количество деревьев на 1 га; пулы углерода и азота лесной подстилки и почвы, включая древесные остатки; среднемесячные температура воздуха и количество осадков, гидрологические параметры почвы; тип и возраст рубок. Все данные по элемен-

там леса берутся из данных лесоустройства. Связь с почвенными данными более сложная и требует специальной процедуры калибровки. В основе привязки данных лежит понятие типов леса, для которых почвенные пулы углерода и азота могут быть оценены либо из опубликованных данных, либо с помощью ряда предположений о месте данного типа леса в сукцессионном ряду растительности.

Выходными параметрами системы моделей являются: для каждого вида и возрастной когорты в каждом древостое средние диаметр и высота, сумма площадей сечений, запас, количество деревьев на 1 га; 2) биомасса, углерод и азот в каждом дереве и напочвенном покрове; углерод и азот почвы, включая древесные остатки; биомасса, углерод и азот вырубленной древесины.

Система EFIMOD применялась для описания различных экологических процессов в лесных территориях локального или мелкорегionalного масштаба: Данковского лесничества ОЛХ «Русский лес» [7, 11], Мантуровского лесничества Костромской области [14], Ленинградской области [22], лесов на песчаных почвах Голландии [41], выборки лесных насаждений Канады [45]. В качестве примера результатов, получаемых с применением системы EFIMOD, приведем прогнозную динамику запасов углерода в почвах Данковского лесничества ОЛХ «Русский лес» при различных сценариях лесопользования (рис. 4). Максимальное увеличение пула углерода почвы прогнозируется при полном отсутствии нарушений в рассматриваемом регионе. Применение нормативной системы рубок приводит к постоянству почвенного пула углерода (к нулевому бюджету углерода по данному пулу). При реализации истощительной системы лесопользования углеродный пул почвы уменьшается и она становится источником углерода.

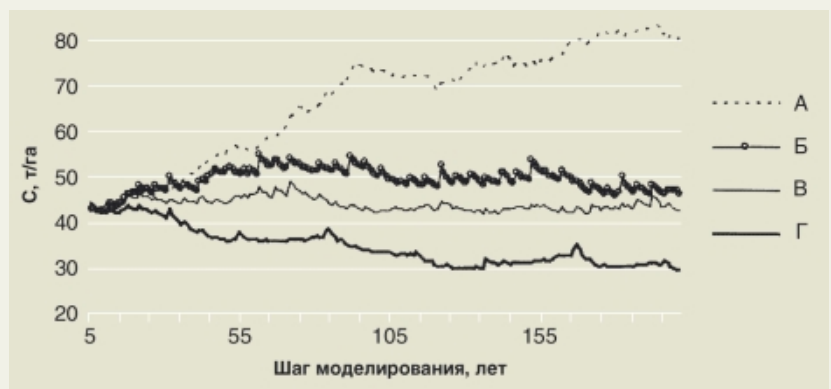


Рис. 4. Динамика запасов углерода почвы в лесах Данковского лесничества согласно модели EFIMOD [7] при сценариях лесопользования:

А — естественное развитие лесов (без рубок); Б — выборочные рубки каждые 30 лет с выбором 30 % по сумме площадей сечений; В — рубки в соответствии с действующими нормативами; Г — одна рубка промежуточного пользования с выбором 50 % по сумме площадей сечений и рубка главного пользования без сохранения подростa

Система имитационного моделирования EFIMOD является мощным инструментом, позволяющим исследовать разнообразные экологические процессы в лесных экосистемах, в том числе цикл углерода по детализированной экосистемной схеме (т. е. более подробной, чем приведенная на рис. 1, см. с. 16 № 4 журнала за 2011 год). Следует отметить высокие требования модели к исходному информационному обеспечению. Не случайно, что примеры использования FORRUS и EFIMOD зачастую географически пересекаются — доступность исходной лесоустроительной информации для конкретного района приводит к повышенному интересу исследователей. Применение EFIMOD к моделированию лесов более крупных регионов, чем лесничества, проводится с использованием ряда допущений [22], что снижает уверенность в надежности получаемых оценок. Этим объясняется отсут-



ствии приложения FORRUS и EFIMOD к территориям национального масштаба, хотя, возможно, совершенствование компьютерной техники и накопление информационной базы смогут создать основу для крупномасштабного применения обсуждаемых моделей.

### CBM-CFS3

Разработка модели CBM-CFS3 стартовала при поддержке Лесной службы Канады в начале 1990-х годов [34]. Для получения работающей версии модели понадобилось более 10 лет интенсивной деятельности, связанной как с теоретическими решениями проблем моделирования [37, 38, 40], так и с созданием пользовательского интерфейса [36]. Модель применяется для оценки углеродного бюджета лесов Канады в целом [35] и отдельных провинций [16, 43]. Полученные с помощью модели оценки используются для формирования канадской отчетности по РКИК ООН и принятия решений по управлению углеродным бюджетом национальных лесов. Модель CBM-CFS3 признана соответствующей стандартам МГЭИК [39]. Программное обеспечение модели и подробное руководство [33] доступны на сайте Лесной службы Канады [25].

Модель CBM-CFS3 представляет собой программный комплекс, снабженный пользовательским интерфейсом. Моделирование динамики фитомассы основывается на данных о ходе роста объемных запасов деловой древесины. Для конверсии запасов древесины в надземные фракции фитомассы используются зависимые от возраста древостоя регрессионные уравнения. Подземные компоненты фитомассы (тонкие и крупные корни) рассчитываются через надземную фитомассу по эмпирическим уравнениям, полученным на основе литературных данных. С помощью набора коэффициентов, специфичных к породе и экоклиматической зоне, вычисляются годовые величины отпада древесины, отпада хвои и корней. Процессы разложения органического вещества характеризуются через период полураспада, являющегося функцией среднегодовой температуры, древесной породы и возраста насаждения. Текущая величина данного пула мертвого органического вещества рассчитывается как сумма запасов растительных остатков различной степени разложения, отпавших либо опавших в предыдущие годы развития лесного насаждения. Исключение составляет пул гумуса почвы, который пополняется из других пулов мертвого органического вещества.

Элементарным пространственным объектом в модели является учетная единица, соответствующая совокупности лесных насаждений со сходными свойствами. При осуществлении имитаций в модель вводится кадастровая информация о площадях всех учетных единиц, составляющих анализируемый регион. Для оценки стартовых величин пулов мертвого органического вещества используется процедура инициализации модели, состоящая в ретроспективных расчетах динамики запасов этих пулов. Модель дает возможность прогноза углеродного бюджета лесов по различным сценариям управляющих и нарушающих воздействий (сплошные и промежуточные рубки, лесные пожары и т. д.).

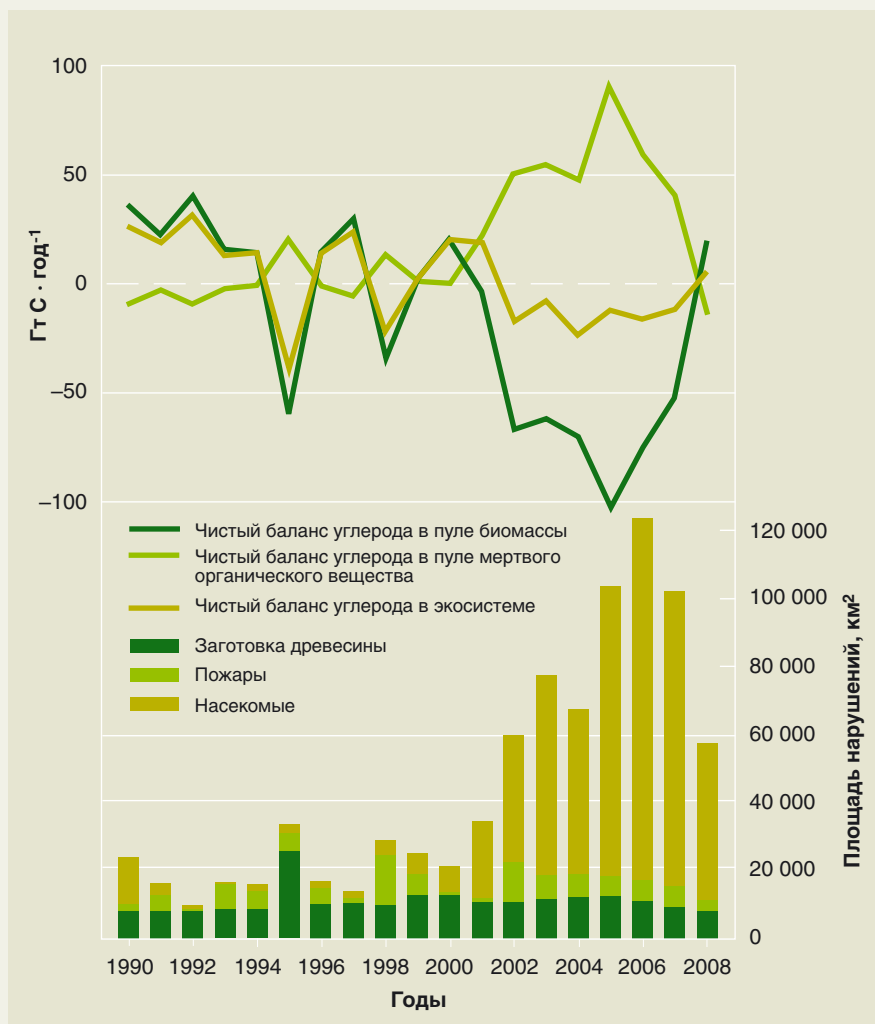


Рис. 5. Итоги оценки по модели CBM-CFS3 углеродного бюджета лесов Канады для пулов фитомассы, мертвого органического вещества и их совокупности (верхняя панель) на основе сведений по масштабам нарушений (нижняя панель) за 1990–2008 годы [47]

В качестве примера приложения CBM-CFS3 рассмотрим динамику бюджета углерода в управляемых лесах Канады за 1990–2008 годы (рис. 5). В качестве исходных данных использованы сведения инвентаризации лесов по состоянию на 1990 год и информация о масштабах основных нарушений (рубки, пожары, вспышки насекомых). В отличие от российских лесов (см. рис. 4 на с. 20 № 4 журнала за 2011 год) леса Канады демонстрируют противоположную тенденцию баланса углерода — от стока в начале 1990-х годов к устойчивому источнику в 2000-х. Основной причиной такой динамики является резкая активизация нарушений, связанных со вспышками насекомых-вредителей.

Модель CBM-CFS3 применялась для оценки и прогноза углеродного бюджета лесов ряда российских регионов: Вологодской области, Северного Кавказа, Дальнего Востока [1, 5, 6]. Этими работами была продемонстрирована хорошая сходимость модельных результатов CBM-CFS3 и оценок по системе «РОБУЛ» для пересекающихся временных интервалов. Следовательно, средства оценки бюджета углерода лесов, разработанные для одних регионов земного шара, могут успешно применяться для других, во всяком случае, в пределах сходных природных зон (в обсуждаемом примере — умеренных и бореальных лесов).

Модель CBM-CFS3 сочетает конверсионный и картографический подходы, при этом позволяя получать оценки по детализированной экосистемной схеме бюджета углерода лесов. Как уже отмечалось, программное обеспечение и руко-



водства модели доступны для сторонних пользователей, однако для успешной работы с СВМ-CFS3 квалификация пользователя должна быть высокой. Тренировочные курсы по работе с моделью периодически проводятся разработчиками как в Канаде, так и в других странах.

### BIOMASAR

Рассмотренные системы оценки запасов углерода в лесах базировались на конверсионном либо картографическом подходах и были ориентированы на использование сведений инвентаризации лесов (лесоустройства или лесного реестра для России, инвентаризации лесов для Канады). Введение спутниковых продуктов в ИЗИС ПАСА позволяет модифицировать данные учетов лесного фонда, но не полностью отказаться от них. В отличие от этих систем проект BIOMASAR базируется на активном дистанционном зондировании лесного покрова с помощью радарной локации. Суть использования радарной локации запасов древесины вполне очевидна: проницаемость древостоев для радарного импульса зависит от густоты древостоя и длины волны импульса [15]. Таким образом, осуществление радарной локации с космического аппарата участков земной поверхности позволяет при наличии лесного покрова получить оценки суммы площадей сечений, объемного запаса древесины и надземной фитомассы. Развитие техники радарной интерферометрии создало возможность для получения информации и о высоте древостоев. Относительная простота концепции радарной локации лесного покрова обманчива, при интерпретации спутниковых данных следует учитывать большее количество дополнительных факторов (рельеф, состояние атмосферы и т. д.), зачастую сильнее влияющих на трансформацию радарных сигналов, чем густота лесного покрова. Ранние варианты систем интерпретации радарной съемки требовали проведения интенсивной калибровки по данным наземных измерений, однако позже эта необходимость была снята за счет использования в качестве дополнительной корректирующей информации данных зондирования оптического диапазона [19, 44].

Проект BIOMASAR осуществляется рядом европейских научных центров (Университет Иены им. Ф. Шиллера, Центр дистанционного зондирования «Гамма» и др.) при поддержке Европейского космического агентства (ESA). Суть проекта состоит в создании цифровых карт запаса древесины и надземной биомассы в бореальных лесах на основе интерпретации данных радара европейского спутника ENVISAT. Дополнительные информационные слои представлены цифровой моделью рельефа (DEM) и проективным покрытием растительности по MODIS (VCF). Алгоритм BIOMASAR детально описан в работе [44]. Для иллюстрации результатов, полученных с использованием алгоритма, приведем карту запасов древесины в лесах Средней Сибири с разрешением 1 x 1 км (рис. 6).

Согласно персональному сообщению А. З. Швиденко (ПАСА), являющегося участником проекта BIOMASAR, к концу 2011 года будет организован свободный доступ к ряду

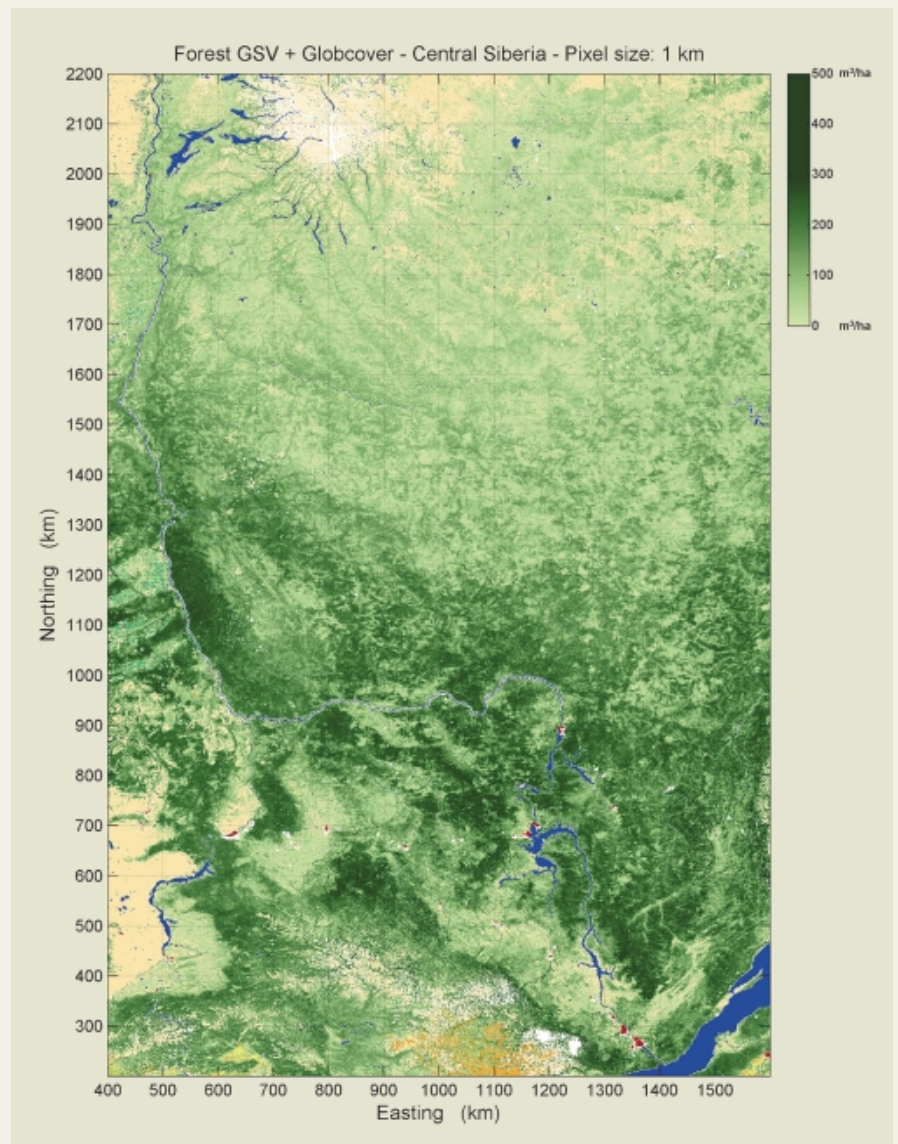


Рис. 6. Карта запасов древесины в лесах Центральной Сибири, полученная интерпретацией данных радарной локации со спутника ENVISAT [26]

продуктов, в частности к цифровой циркумполярной карте запасов надземной фитомассы бореальных лесов с разрешением 150 x 150 м. Этот продукт можно рассматривать как независимую альтернативу оценкам, получаемым при различных способах интерпретации сведений инвентаризации лесов. Отметим, что проект BIOMASAR не ставит целью оценку бюджета углерода лесов. Однако по мере накопления архивных данных спутниковой радарной локации вполне возможно определение бюджета углерода для пула фитомассы методом разности запасов, получаемых при интерпретациях разновременных локаций.

### Система оценки состояния лесов Папуа Новой Гвинеи

Все рассмотренные выше системы оценки запасов углерода разработаны для применения в бореальных и умеренных лесах северного полушария. Эти леса находятся на территории развитых стран с долгой историей формирования лесных инвентаризаций. Применение дистанционных методов в таких лесах приводит к появлению независимых, но не принципиально новых оценок. Иная ситуация имеет место во многих развивающихся странах, где структуры инвентаризации лесов слабо развиты или вообще отсутствуют. За истекшие 5 лет внимание к проблемам углеродного бюджета тропических лесов существенно повысилось



в связи со становлением международного процесса по сокращению эмиссий от обезлесивания и деградации лесов в развивающихся странах (REDD+). В рамках этого процесса важной методологической задачей стала оценка темпов обезлесивания и сопряженных эмиссий парниковых газов. Во многих случаях только дистанционные методы оказались способными привести к практическому решению этой задачи.

В качестве примера рассмотрим систему оценки состояния лесов Папуа Новая Гвинея, разработанную в Центре дистанционного зондирования Университета Папуа Новая Гвинея [17, 46]. При выполнении работ использовались два источника дистанционных данных: материалы аэрофотосъемки высокого разрешения, осуществленной Вооруженными силами Австралии в 1972–1975 годах; спутниковые данные Landsat, SPOT-4, SPOT-5, полученные в период 2000–2007 годов. Эти информационные слои обеспечили возможность построения цифровых карт типов земного покрова Папуа Новой Гвинеи по состоянию на 1972 и 2002 годы, использующих очень простую классификацию: первичные леса; вторичные леса; заболоченные леса; мангровые заросли; заросли кустарников и сады; луга и обрабатываемые земли. Сравнение разновременных карт земного покрова позволило определить площади, на которых произошло либо обезлесивание, либо конверсия первичных лесов во вторичные (рис. 7).

Для идентификации запасов углерода фитомассы в различных типах земного покрова использована небольшая база экспериментально-полевых данных, насчитывавшая 57 записей. В связи с ограниченным количеством записей проведен специальный анализ, показавший относительно небольшую вариацию углерода фитомассы в первичных лесах региона [19]. Для уточнения запасов углерода фитомассы вторичных лесов в дальнейшем заложены дополнительные пробные площади [18]. Производство типовых значений углерода фитомассы на площади соответствующих типов земного покрова дало оценку национальных запасов углерода фитомассы по состоянию на 1972 и 2002 годы. По разности этих запасов были оценены эмиссии углерода от обезлесивания и деградации лесов, произошедших в Папуа Новой Гвинеи в этот период. Для уточнения динамики эмиссий в рассматриваемом временном интервале использованы статистические сведения об экспорте древесины. В результате установлено, что эмиссии от обезлесивания и деградации лесов в Папуа Новой Гвинеи возросли от 20 Мт С · год<sup>-1</sup> в начале 1970-х годов до 50–60 Мт С · год<sup>-1</sup> в начале 2000-х (рис. 8).

Создание системы оценки состояния лесов Папуа Новой Гвинеи оказало мощное стимулирующее воздействие на развитие процесса REDD+. Этой работой доказано, что существует прозрачное и верифицируемое решение задачи количественной оценки эмиссий от обезлесивания даже в тех развивающихся странах, которые не обладают развитыми системами инвентаризации лесов. Наличие данной системы оценки рассматривается как свидетельство готовности Папуа Новой Гвинеи к широкомасштабной реализации REDD+ [30, 31] и является важным аргументом в пользу выделения стране значительных финансовых средств в рамках программы UN-REDD [29].

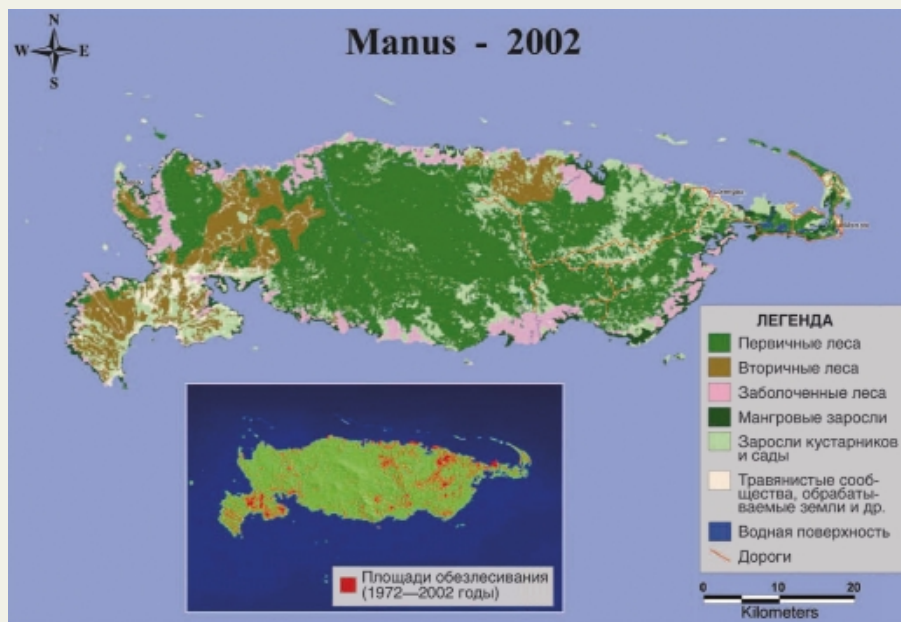


Рис. 7. Карта типов земного покрова острова Манус (Папуа Новая Гвинея) по состоянию на 2002 год и площадей обезлесивания за 1972–2002 годы [46]

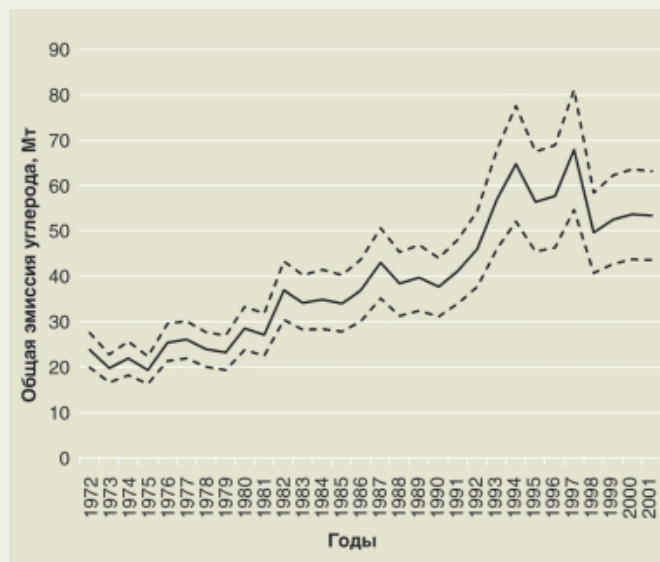


Рис. 8. Эмиссии углерода от обезлесивания в Папуа Новой Гвинеи [19]

### Сравнительный анализ систем оценки

Рассмотренные системы оценки запасов и потоков углерода в лесах существенно различаются характером требований к исходным данным, пространственному масштабу оцениваемых лесных систем, процедурам расчетов и полноте результатов применения (см. таблицу). Впрочем, перечисленные свойства систем оценки связаны между собой. Ориентация системы на рассмотрение пространственных объектов уровня таксационного выдела ужесточает требования к исходным данным, делая предпочтительным использование информации лесоустройства (FORRUS, EFIMOD). Это в дальнейшем ограничивает применимость системы к более крупным пространственным масштабам национального уровня. Полнота рассматриваемых пулов и потоков углерода определяется степенью использования модельного подхода. Системы, построенные на основе моделей (ИЗИС ПАСА, EFIMOD, СВМ-CFS3), дают возможность осуществить оценку пулов и потоков углерода по детальной экосистемной схеме, в то время как системы с преобладанием инвентаризационной компоненты (РОБУЛ, УГЛУТ, BIOMASAR,



## Сравнительный анализ ряда систем оценки запасов и потоков углерода в лесах

Система	Оцениваемые пулы и потоки углерода	Пространственный масштаб	Исходные данные	Применение в РКИК ООН и прочих климатических соглашениях	Доступ к программному обеспечению	Доступ к продуктам либо к исходным данным
ИЗИС ИАСА	Все пулы, бюджет по экосистемной схеме	Региональный, национальный	Лесной реестр, продукты ДЗЗ, метеолюбные, тематические карты	Нет	Нет	Да
РОБУЛ	Все пулы, бюджет по региональной схеме	Региональный, национальный	Лесной реестр	Да	Да	Нет
УГЛТУ	Фитомасса, чистая первичная продукция	Региональный	Лесной реестр	Нет	Нет	Да
FORRUS	Оценка невозможна	Локальный, региональный	Лесоустройство	Нет	Нет	Нет
EFIMOD	Все пулы, бюджет по экосистемной схеме	Локальный, региональный	Лесоустройство, метеолюбные	Нет	Нет	Нет
СВМ-CFS3	Все пулы, бюджет по экосистемной схеме	Региональный, национальный	Инвентаризация лесов	Да	Да	Нет
БИОМАСАР	Только пул фитомассы	Региональный, национальный	ASAR Envisat, MODIS VCF	Нет	Нет	Планируется
Состояние лесов Папуа Новой Гвинеи	Пул и бюджет по фитомассе	Региональный, национальный	Landsat, SPOT, архивы аэрофотосъемки	Да	Нет	Нет

система оценки состояния лесов Папуа Новой Гвинеи) рассматривают либо фитомассу, либо менее детализированную региональную схему углеродного бюджета лесов. Причина такого различия вполне очевидна. Изменения запасов углерода фитомассы и мертвой древесины можно идентифицировать визуальным способом, т. е. их следует назвать видимыми. Тогда аналогичные процессы в подстилке и особенно в почве можно охарактеризовать как невидимые, потому их оценка связана с усилением роли модельной компоненты системы. В неопределенностях оценок потоков, связанных с углеродным пулом почвы, заключен основной источник расхождений величин углеродного бюджета лесов России, найденных на основе ИЗИС ИАСА и РОБУЛ.

Заметные различия присутствуют в информационной политике авторских групп, разрабатывающих рассмотренные системы оценки. Одни (РОБУЛ, СВМ-CFS3) заинтересованы в свободном распространении своих систем и тем самым это расширяет возможности их применения к решению практических задач «углеродного» лесопользования. Другие (ИЗИС ИАСА, УГЛТУ, БИОМАСАР) обеспечивают доступ к базам данных, включаемых в систему оценки, и к результатам ее применения. Третьи (FORRUS, EFIMOD) ориентируются на представление результатов в научных публикациях, оставляя возможность независимым исследователям подключаться к реализации совместных научных проектов.

Очевидны различия в практическом применении рассмотренных систем. РОБУЛ и СВМ-CFS3 используются уполномоченными органами для формирования национальной отчетности по РКИК ООН и Киотскому протоколу, принятия решений в переговорном процессе по посткиотскому климатическому соглашению, проработке концепций лесных углеродных проектов. Система «Состояние лесов Папуа Новой Гвинеи» сыграла большую роль в становлении механизма REDD+, следствием чего стало выделение стране зна-

чительных средств в рамках программы UN-REDD и ряда двусторонних соглашений. Прочие системы оценки используются в качестве инструмента получения фундаментально-научного знания.

### Подходы к построению системы оценки запасов и потоков углерода в лесах России с использованием информации LANDSAT

Очевидной тенденцией современного этапа развития информационных технологий является усиление роли веб-картографии. Ряд популярных сервисов Интернета, в частности Google maps и «Яндекс. Карты», предоставляют пользователям облегченный доступ к продуктам геоинформационных технологий и дистанционного зондирования. В соответствии с указанной тенденцией перспективной задачей представляется создание сервиса Интернета, характеризующего состояние лесного покрова страны и особенности управления лесами, в том числе их углеродной функцией. Именно такие задачи поставлены в проекте «Интенсивное и устойчивое лесопользование в России»<sup>1</sup>, осуществляемом НП «Прозрачный мир» при участии WWF России, ИТЦ «СканЭкс» и Института мировых ресурсов (США).

Проектными планами предусмотрены разработка серии цифровых карт, построенных при помощи интерпретации разновременных съемок оптического диапазона спутников программы LANDSAT с разрешением 10–30 м. К настоящему времени созданы прототипы цифровых карт для тестовых регионов (северо-западная часть России, Средняя Сибирь, юг Дальнего Востока), использующих в качестве основного

<sup>1</sup> [http://www.wwf.ru/about/what\\_we\\_do/forests/projects/lesopolzovanie/](http://www.wwf.ru/about/what_we_do/forests/projects/lesopolzovanie/)



классификатора лесного покрова преобладающие древесные породы (сосна, ель и др.) в дифференциации по двум категориям возраста: молодые и старовозрастные. С некоторым приближением возрастные категории можно перевести в традиционные группы возраста, используемые при проведении учетов лесного фонда: категории молодых соответствуют возрастным группам молодняков I и II классов возраста, средневозрастные и припевающие; категории старовозрастных — спелые и перестойные.

Осуществленный обзор систем оценки запасов углерода в лесах приводит к выводу о том, что для интерпретации в углеродных параметрах снимков оптического диапазона следует использовать картографический подход. Иначе говоря, каждой классификационной категории карты лесного покрова необходимо сопоставить типовое значение углерода, полученное из иных источников. Можно предложить три варианта идентификации типовых значений: по базам данных экспериментально-полевых определений запасов углерода в лесах; по итоговым результатам существующих конверсионных систем оценки углерода лесов; по результатам радарной локации запасов фитомассы. Рассмотрим подробнее эти варианты, отметив их преимущества и недостатки.

Наиболее полная база данных экспериментально-полевых определений фитомассы лесов приведена в монографии В. А. Усольцева [9]. Следует отметить некоторые свойства этой базы. Значительная часть исходных исследований пробных площадей была проведена в рамках Международной биологической программы, осуществлявшейся с 1964 по 1974 год. Это означает, что прямая идентификация записей базы данных с точками цифровой карты не имеет смысла: растущие лесные насаждения давно изменили свои продукционные характеристики. К тому же географическая привязка записей базы данных, как правило, крайне приблизительна, поскольку публикация точных географических координат пробных площадей стала обычной лишь с конца 1990-х годов. Следовательно, формирование выборок базы данных следует вести по классификационным категориям создаваемых карт: например, молодые ельники северо-западной части России, старовозрастные пихтовые леса Средней Сибири и т. д. При малом количестве или полном отсутствии записей базы данных по какой-либо классификационной категории следует использовать выборки, агрегированные по регионам (например, молодые пихтовые леса России) или группам пород (например, молодые твердолиственные насаждения юга Дальнего Востока).

Преимуществом данного способа идентификации типовых запасов углерода фитомассы является полная независимость итоговых карт от сведений лесоустройства и лесного реестра. Недостаток связан с вероятным завышением запасов углерода. Дело в том, что, как правило, выбор пробных площадей осуществлялся в продуктивных лесных насаждениях с полной, близкой к 1. В результате выборка, сформированная по базе данных таких определений, будет смещена в сторону завышения запасов древесины и фитомассы древостоя по сравнению с полной совокупностью лесов исследуемого региона. Эти эффекты подробно рассмотрены в работах [4, 10].

Типовые значения запасов углерода в фитомассе и других пулах лесов, дифференцированные по преобладающим породам, группам возраста и регионам России, являются продуктами систем «ИЗИС ПАСА» и «РОБУЛ». На веб-сайте ПАСА [27] приведены таблицы распределения фитомассы лесов по субъектам Российской Федерации, главным лесобразующим породам и классам возраста. Эту информацию можно непосредственно сопоставить с классификационными категориями создаваемой карты в пределах тех или иных субъектов Российской Федерации. Аналогичная информация (причем не только для фитомассы, но и для всей сово-

купности пулов углерода) может быть получена применением РОБУЛ к данным учета лесного фонда либо лесного реестра. Система позволяет оценить запасы углерода фитомассы и совокупности пулов лесной экосистемы в дифференциации по преобладающим древесным породам и возрастным категориям. Имеющиеся оценки получены с использованием данных государственного учета лесного фонда по состоянию на 2003 год, т. е. последнего на настоящий момент учета, материалы которого были опубликованы [8].

Преимуществом данного способа является возможность получения несмещенных оценок углерода фитомассы или всех пулов углерода в лесах, а также минимальный объем временных затрат на подготовку таблиц типовых значений. Дополнительные плюсы определяются сопоставимостью с оценками Национального кадастра парниковых газов, использующего систему «РОБУЛ». Недостаток связан с использованием в ИЗИС ПАСА и РОБУЛ материалов учета лесного фонда, являющихся, в свою очередь, обобщением информации лесоустройства. Цифровые карты запасов углерода в этом случае будут связаны с материалами лесоустройства по типовым значениям углеродных пулов, но независимы по характеристикам площадей лесов.

Третий вариант расчета связан с ожидаемым выходом спутникового продукта, т. е. с итогом выполнения проекта BIOMASAR. По предварительной информации, продукт будет доступен в виде циркумполярной цифровой карты запасов фитомассы с разрешением 150 x 150 м. Получение типовых значений углерода фитомассы должно осуществляться на основе геоинформационных технологий и включать следующие стадии: совмещение цифровых карт; сопоставление каждому пикселю карты лесного покрова значения фитомассы продукта BIOMASAR; получение распределения пикселей по значениям фитомассы для каждой классификационной категории карты лесного покрова в дифференциации по регионам (лесничествам либо субъектам Российской Федерации); расчет по распределениям пикселей среднего значения фитомассы для каждой классификационной категории карты лесного покрова в дифференциации по регионам.

Полная независимость итоговых карт от данных лесоустройства, а также вовлечение результатов наиболее современных технологических решений в области дистанционного зондирования представляют несомненные преимущества данного способа построения карт запасов углерода лесов. Недостатки связаны со сравнительно невысоким разрешением продукта BIOMASAR, которое может привести к близости типовых значений углерода фитомассы у разных категорий карты лесного покрова. Реализация данного подхода должна быть связана с существенно более серьезными усилиями по верификации результатов, чем в двух предшествующих вариантах.

Планируемое создание разновременных цифровых карт запасов углерода лесов открывает путь к оценке баланса углерода методом разности запасов, как было убедительно продемонстрировано системой «Состояние лесов Папуа Новой Гвинеи». Для регионов цифровой карты следует рассчитать суммарные запасы углерода фитомассы, далее вычислить разности в последовательности версий карты и отнести их к соответствующим временным периодам. Добавим, что с некоторыми допущениями метод разности запасов применим и к оценке баланса углерода по всем пулам лесной экосистемы. В этом случае следует учитывать, что запасы углерода в пулах мертвого органического вещества сохраняются на временно не покрытых лесом площадях, являющихся следствием нарушений лесного покрова. Простейшее допущение состоит в ограничении возможных переходов категорий площадей: допускаются переходы из не покрытых лесом площадей в молодые леса, из молодых лесов в старовозрастные и из старовозрастных в не покрытые лесом. Если интер-





претировать изменения площадей карты лишь в этих трех переходах, то каждому из них можно сопоставить изменение запаса углерода лесной экосистемы (эти сведения могут быть найдены на основе РОБУЛ) и затем рассчитать суммарный баланс углерода лесов рассматриваемого региона.

При формировании информационного слоя баланса углерода лесов следует иметь в виду, что он формируется на региональном уровне (этот вопрос подробно рассматривался в разделе «Запасы и потоки углерода в лесах», см. с. 17 № 4 журнала за 2011 год). Потому идентификация величины углеродного баланса каждого отдельного полигона цифровой карты не имеет смысла, да и технически невозможна при использовании метода разности запасов. Оптимальной еди-

ницей визуализации величин баланса углерода следует признать совокупность насаждений данной доминирующей породы в пределах региона. Найденные величины баланса углерода по доминирующим породам надо отнести к соответствующим площадям в пределах региона, затем присвоить полученные значения всей совокупности полигонов, относящихся к данной породе в данном регионе. Оптимальной единицей регионального деления для расчета и визуализации баланса углерода нужно признать лесничество. Использование этой единицы обеспечит разумную степень детализации оценок баланса углерода лесов и представит картину, полезную для принятия возможных решений в отношении управления запасами углерода лесов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бакаева З. М., Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И. Прогноз углеродного бюджета лесов Северного Кавказа по модели СВМ-CFS // Проблемы региональной экологии. 2009. № 1. С. 51–56.
2. Быховец С. С., Комаров А. С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. 2002. № 4. С. 443–452.
3. Воронов М. П., Усольцев В. А., Часовских В. П. Обоснование выбора среды для проектирования и реализации системы оценки углероддепонирующей способности лесов России // Современные проблемы науки и образования. 2009. № 6. С. 20–21.
4. Воронов М. П., Усольцев В. А., Часовских В. П. Исследование методов и разработка информационной системы определения и картирования депонируемого лесами углерода в среде Natural. Екатеринбург: УГЛТУ, 2010. 160 с.
5. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Коровин Г. Н. Управление бюджетом углерода лесов Дальнего Востока России: прогнозный анализ по модели СВМ-CFS // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. Вып. 1 (41). С. 98–103.
6. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Коровин Г. Н., Куриц В. Оценка и прогноз углеродного бюджета лесов Вологодской области при помощи канадской модели СВМ-CFS // Лесоведение. 2008. № 6. С. 3–14.
7. Комаров А., Припутнина И., Михайлов А., Чертов О. Биогеохимический цикл углерода в лесных экосистемах центра Европейской России и его техногенные изменения // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. М.: Наука, 2006. С. 362–377.
8. Лесной фонд России (по учету на 1 января 2003 года). Справочник. М.: ВНИИЛМ, 2003. 640 с.
9. Усольцев В. А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с.
10. Усольцев В. А., Залесов С. В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. 147 с.
11. Ханина Л. Г., Бобровский М. В., Комаров А. С. и др. Моделирование динамики разнообразия лесного напочвенного покрова // Лесоведение. 2006. № 1. С. 70–80.
12. Чумаченко С. И., Смирнова О. В. Моделирование развития насаждений в ходе аутогенных сукцессий // Лесоведение. 2009. № 6. С. 3–17.
13. Чумаченко С. И., Паленова М. М., Починков С. В., Кухаркина Е. В. Имитационное моделирование динамики насаждений. FORRUS-S — инструмент выбора стратегии и планирования лесного хозяйства // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2007. № 5. С. 143–152.
14. Шанин В. Н., Михайлов А. В., Быховец С. С., Комаров А. С. Глобальные изменения климата и баланс углерода в лесных экосистемах бореальной зоны: имитационное моделирование как инструмент прогноза // Известия РАН. Сер. биол. 2010. № 6. С. 719–730.
15. Antonorakis A. S., Saatchi S. S., Chazdon R. L., Moorcroft P. R. Using Lidar and Radar measurements to constrain predictions forest ecosystem structure and function // Ecological Applications. 2011. V. 21. № 4. P. 1120–1137.
16. Banfield G. E., Bhatti J. S., Jiang H., Apps M. J. Variability in regional scale estimates of carbon stocks in boreal forest ecosystems: results from west-central Alberta // Forest Ecology and Management. 2002. V. 169. P. 15–27.
17. Bryan J., Shearman P., Ash J., Kirkpatrick J. B. Estimating rainforest biomass stocks and carbon loss from deforestation and degradation in Papua New Guinea 1972–2002: Best estimates, uncertainties and research needs // Journal of Environmental Management. 2010. V. 91. № 4. P. 995–1001.
18. Bryan J., Shearman P. L., Ash J., Kirkpatrick J. B. Impact of logging on above ground biomass stocks in lowland rainforest, Papua New Guinea // Ecological Applications. 2010. V. 20. № 8. P. 2096–2103.
19. Bryan J., Shearman P., Ash J., Kirkpatrick J. B. Estimating rainforest biomass stocks and carbon loss from deforestation and degradation in Papua New Guinea 1972–2002: Best estimates, uncertainties and research needs // Journal of Environmental Management. 2010. V. 91. № 4. P. 995–1001.
20. Cartus O., Santoro M., Schullius C., Li Z. Large area forest stem volume mapping in the boreal zone using synergy of ERS-1/2 tandem coherence and MODIS vegetation continuous fields // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. P. 931–943.
21. Chertov O., Komarov A., Kolstrom M. et al. Modelling the long-term dynamics of populations and communities of trees in boreal forests based on competition on light and nitrogen // Forest Ecology and Management. 2003. № 1–3. V. 176. P. 355–369.
22. Chertov O., Komarov A., Loukianov A. et al. The use of forest ecosystem model EFIMOD for research and practical implementation at forest stand, local and regional levels // Ecological modeling. 2006. V. 194. P. 227–232.
23. Chumachenko S. I., Korotkov V. N., Palenova M. M., Politov D. V. Simulation modelling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for conifer-broad-leaved forests // Ecol. Modeling. 2003. V. 170. P. 345–361.
24. Chumachenko S., Pochinkov S., Kulkarkina E., Yakovleva A. Comparison of different forest management regimes in Lyaskelskoe lesnichestvo in the Republic of Karelia // Intensification of forest management and improvement of wood harvesting in Northwest Russia. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. Vantaa: Finnish Forest Research Institute, 2009. P. 46–57.
25. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pages/94> (дата обращения: 5.10.2011)
26. [http://www.esa.int/esaEO/SEMWYRCKP6G\\_index\\_1.html#subhead1](http://www.esa.int/esaEO/SEMWYRCKP6G_index_1.html#subhead1) (дата обращения: 5.10.2011).
27. [http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest\\_cdrom/russian/for\\_prod\\_ru.html](http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/russian/for_prod_ru.html) (дата обращения: 10.09.2011).
28. <http://www.mgul.ac.ru/info/science/spisok/razdone/044.shtml> (дата обращения: 10.09.2011).
29. <http://www.un-redd.org/AboutUNREDDProgramme/NationalProgrammes/PapuaNewGuinea/tabid/1026/Default.aspx> (дата обращения: 5.10.2011).
30. Herold M. An assessment of national forest monitoring capabilities in tropical non-Annex I countries: Recommendations for capacity building. Final report for The Prince's Rainforests Project and The Government of Norway. 2009. 62 p. Режим доступа: [http://unfccc.int/files/methods\\_science/redd/country\\_specific\\_information/application/pdf/redd\\_nat\\_capacity\\_report\\_herold\\_july09\\_publ.pdf](http://unfccc.int/files/methods_science/redd/country_specific_information/application/pdf/redd_nat_capacity_report_herold_july09_publ.pdf) (дата обращения: 5.10.2011).
31. Hunt C. Compensating for the costs of reducing deforestation in Papua New Guinea // Pacific Economic Bulletin. 2010. V. 25. № 3. P. 64–88.
32. Komarov A. S., Chertov O. G., Zudin S. L. et al. EFIMOD 2 — a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological Modelling. 2003. № 2–3. V. 170. P. 373–392.
33. Kull S. J., Rampley G. J., Morken S. et al. Operational-scale Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3) version 1.2: user's guide. Edmonton: Canadian Forest Service, Northern Forestry Center, 2011. 450 p.
34. Kurz W. A., Apps M. J. Contribution of northern forests to the global carbon cycle: Canada as a case study // Water, Air, and Soil Pollution. 1993. V. 70. P. 163–176.
35. Kurz W., Apps M. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector // Ecological Applications. 1999. V. 9. № 2. P. 526–547.
36. Kurz W. A., Apps M., Banfield E., Stinson G. Forest carbon accounting at the operational scale // The Forestry Chronicle. 2002. V. 78. P. 672–679.
37. Kurz W. A., Beukema S. J., Apps M. J. Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of the Canadian forest sector // Can. J. For. Res. 1996. V. 26. P. 1973–1979.
38. Kurz W. A., Beukema S. J., Apps M. J. Carbon budget implications of the transition from natural to managed disturbance regimes in forest landscapes // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 1998. V. 2. P. 405–421.
39. Kurz W. A., Dymond C. C., White T. et al. CBM-CFS3: a model of carbon dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards // Ecological Modelling. 2009. V. 220. № 4. P. 480–504.
40. Li Z., Kurz W. A., Apps M. J., Beukema S. J. Belowground biomass dynamics in the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector: recent improvements and implications for the estimation of NPP and NEP // Can. J. For. Res. 2003. V. 33. P. 126–136.
41. Nadporozhskaya M. A., Mohren G. M. J., Chertov O. G. et al. Dynamics of soil organic matter in primary and secondary forest succession on sandy soils in The Netherlands: An application of the ROMUL model // Ecological Modelling. 2006. V. 190. P. 399–418.
42. Palenova M., Korotkov V., Chumachenko S. et al. The use of simulation model FORRUS-S in the ecological management in forestry: strategic and tactics planning // Scientia Forestalis. 2007. № 73. P. 73–89.
43. Price D. T., Halliwell D. H., Apps M. J. et al. Comprehensive assessment of carbon stocks and fluxes in a Boreal-Cordilleran forest-management unit // Can. J. For. Res. 1997. V. 27. P. 2005–2016.
44. Santoro M., Beer C., Cartus O. et al. Retrieval of growing stock volume in boreal forest using hyper-temporal series of Envisat ASAR ScanSAR backscatter measurements // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. P. 490–507.
45. Shaw C., Chertov O., Komarov A. et al. Application of the forest ecosystem model EFIMOD 2 to jack pine along the Boreal Forest Transect Case Study // Canadian Journal of Soil Science. 2006. V. 86. № 2. P. 171–185.
46. Shearman P. L., Bryan J. E., Ash J. et al. The State of the Forests of Papua New Guinea. Mapping the extent and condition of forest cover and measuring the drivers of forest change in the period 1972–2002. Port Moresby: University of Papua New Guinea, 2008. 156 p.
47. Stinson G., Kurz W. A., Smyth C. E. et al. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008 // Global Change Biology. 2011. V. 17. P. 2227–2244.