

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН

ЗАМОЛОДЧИКОВ Дмитрий Геннадьевич

Научно-образовательный курс

СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ БЮДЖЕТА УГЛЕРОДА В ЛЕСАХ

При поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы в рамках реализации мероприятия 1.1.1, естественные науки (соглашение 8107)

МОСКВА - 2012

СОДЕРЖАНИЕ

<i>СОДЕРЖАНИЕ</i>	2
<i>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ</i>	3
<i>ВВЕДЕНИЕ</i>	4
<i>ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О КРУГОВОРОТЕ УГЛЕРОДА В ЛЕСАХ</i>	6
<i>ГЛАВА 2. БАЗОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ И ПОТОКОВ ЛЕСНОГО УГЛЕРОДА</i>	14
<i>ГЛАВА 3. СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ УГЛЕРОДНОГО БЮДЖЕТА ЛЕСОВ</i>	17
3.1. <i>Интегральная земельная информационная система ПАСА</i>	18
3.2. <i>Система «РОБУЛ»</i>	21
3.3. <i>Информационная система определения и картирования депонируемого лесами углерода УГЛТУ</i>	25
3.4. <i>FORRUS</i>	30
3.5. <i>EFIMOD</i>	33
3.6. <i>СВМ-CFS3</i>	37
3.7. <i>БИОМАСАР</i>	40
3.8. <i>Система оценки состояния лесов Папуа Новой Гвинеи</i>	43
<i>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</i>	46
<i>ЛИТРАТУРА</i>	49

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ГУЛФ – государственный учет лесного фонда

ГЛР – Государственный лесной реестр

ИЗИС – Интегральная земельная информационная система

ИФХБП РАН - Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

МГУЛ - Московский государственный университет леса

МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата

ОВ – органическое вещество

РКИК ООН – Рамочная конвенция Организации Объединенных наций об изменении климата

РОБУЛ – региональная оценка бюджета углерода лесов

СУБД – система управления базами данных

УГЛТУ - Уральский государственный лесотехнический университет

ЦЭПЛ РАН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов

РАН

СВМ – модель бюджета углерода

CFS – Лесная служба Канады

GPP – валовая первичная продукция

IIASA - Международный институт прикладного системного анализа

NPP – чистая первичная продукция

R_a – дыхание автотрофов

REDD – сокращение эмиссий от обезлесивания и деградации лесов

R_h – дыхание гетеротрофов

UPNG - Университет Папуа Новой Гвинеи

ВВЕДЕНИЕ

Современное глобальное потепление климата, вызванное антропогенным повышением атмосферных концентраций парниковых газов (в первую очередь углекислого газа), привело к стремительному повышению интереса к оценке углеродного цикла лесного покрова. Причем этот интерес вышел за границы фундаментальных научных исследований, распространившись на область практического лесоуправления. Значимость лесов в регуляции содержания парниковых газов атмосферы была признана ключевыми международными соглашениями по сохранению глобального климата: Рамочной конвенцией ООН об изменении климата (РКИК ООН) и Киотским протоколом [17, 23]. Страны, ратифицировавшие эти соглашения, взяли обязательства по проведению инвентаризации бюджета парниковых газов в управляемых лесах и по осуществлению мер, способствующих усилению стоков и сокращению эмиссий лесного углерода. Киотским протоколом были созданы потенциальные возможности по применению финансовых механизмов (торговля квотами, проекты совместного осуществления) в сфере управления лесами.

Из климатических соглашений вытекают базовые принципы, которые следует принимать во внимание при создании систем оценки углерода лесов, имеющих практическую направленность. Во-первых, учету и управлению подлежат стоки и источники парниковых газов в лесах, в то время как величина запасов углерода лесов, присутствующая в начальный момент управления, принципиального значения не имеет. Иначе говоря, важны лишь изменения запасов углерода лесов в сторону увеличения или уменьшения, происходящие в период управления. Во-вторых, учитывать следует только те стоки и источники парниковых газов, которые являются результатом деятельности человека, т. е. имеют антропогенный характер. Это положение привело к продолжительным переговорным дискуссиям по разработке

правил учета лесных стоков на период действия Киотского протокола (2008–2012 гг.). Итогом дискуссий стали искусственные ограничения на зачет лесных стоков в национальных бюджетах парниковых газов. В частности, для России такой порог составляет 33 млн т С в год.

Осуществление практических мер требует наличия адекватной информации об объекте управления, в нашем случае – о запасах и потоках углерода в лесах. К настоящему времени созданы многочисленные системы оценки лесного углерода. Их большая часть является инструментом научного исследования, но некоторые активно используются в национальных инвентаризациях парниковых газов либо при обосновании проектной деятельности. Важный критерий пригодности системы оценки к решению практических задач – соответствие руководящим указаниям Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Подходы МГЭИК к проведению инвентаризации бюджетов углерода в секторе землепользования, изменений землепользования и лесном хозяйстве обобщены в соответствующем руководстве [24]. При всей формализации и упрощенности рекомендации МГЭИК сыграли положительную роль в концептуальном и терминологическом согласовании исследовательских подходов независимых научных групп.

Цель настоящего научно-образовательного курса состоит в обзоре ряда известных систем оценки и прогноза запасов углерода в лесах. Основное внимание будет уделено рассмотрению специфики методических подходов, сферы применимости и (при наличии) примерам практического использования в климатической деятельности. Начальная часть курса содержит общую характеристику объекта оценки, т. е. углеродного цикла лесов. Эта характеристика позволит более четко разграничить сферы применимости различных систем.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О КРУГОВОРОТЕ УГЛЕРОДА В ЛЕСАХ

Углерод является каркасным элементом органического вещества и потому преобладает в расчете на сухую массу. К примеру, в сухой биомассе растений (фитомассе) содержится от 45 до 53 % углерода. Потому везде, где имеются мощные запасы органического вещества, формируются резервуары (пулы) углерода. Руководство МГЭИК [24] выделяет четыре пула углерода лесов: фитомасса (с подразделением на надземную и подземную), мертвая древесина, подстилка, органическое вещество почвы. В научных исследованиях часто используют более детальные классификации углеродных пулов. Так, фитомассу древостоя можно подразделить на фракции: стволы, крупные и тонкие ветви, листья, хвоя, генеративные органы, комли, толстые и тонкие корни. Мертвую древесину составляют сухостой, валеж, отмершие ветви в кронах, опавшие ветви, пни, отмершие корни. В подстилке выделяют неразложившийся слой, состоящий в основном из опада текущего года, ферментативный слой с максимальной активностью организмов-редуцентов, а также слой гумифицирующихся растительных остатков. Органическое вещество почвы включает лабильный и стабильный гумус, при переувлажнении почвы – еще и торф. Перечисленные фракции можно далее делить по видам древесных пород, горизонтам почвы и т. д.

Фундаментальный научный анализ миграций углерода в лесной экосистеме, безусловно, требует как можно более детальной характеристики углеродных пулов. Однако с точки зрения практических задач управления запасами углерода важнее знать итоговый результат: если размеры углеродных пулов увеличиваются, то создается сток углекислого газа из атмосферы, если уменьшаются, то в конечном итоге образуются источники парниковых газов. Потому описание основных потоков углерода в лесной

экосистеме мы проведем по упрощенной схеме, т. е. для четырех пулов МГЭИК (рис. 1).

Углекислый газ атмосферы преобразуется в органическое вещество в процессе фотосинтеза. Суммарную величину образовавшегося при фотосинтезе органического вещества называют валовой первичной продукцией (*GPP*). Часть этого вещества разлагается при метаболизме самих растений, при этом углекислый газ высвобождается в атмосферу. Этот поток именуется дыханием автотрофов (R_a) и варьирует в пределах 40–70 % от *GPP*. Разность между *GPP* и R_a характеризует количество органического вещества, пополняющего пул фитомассы, и называется чистой первичной продукцией (*NPP*). В большинстве исследований биологической продуктивности и углеродного цикла лесных экосистем составление баланса органического начинается именно с *NPP*, поскольку ее можно определить в полевых условиях с помощью весовых методов.

Часть органов живого дерева постоянно отмирает (достаточно вспомнить осенний листопад у лиственных пород). Постепенно отмирает и хвоя, срок жизни которой у различных хвойных пород составляет от 4 до 6 лет. Опадают генеративные органы (сережки, цветки, шишки, ягоды и т. д.), отмершие ветви, отслоившиеся фрагменты коры и т. п. Эти процессы в сумме называются опадом, который представляет собой поток, переводящий органическое вещество из фитомассы в подстилку. Подстилка подвергается активному разложению в результате воздействия организмов-деструкторов (грибы, бактерии, почвенные беспозвоночные), что приводит к высвобождению углерода подстилки в атмосферу. Сравнительно небольшая часть исходной массы опада преобразуется в гумус, этот поток называется гумификацией и переводит углерод из подстилки в пул органического вещества почвы.

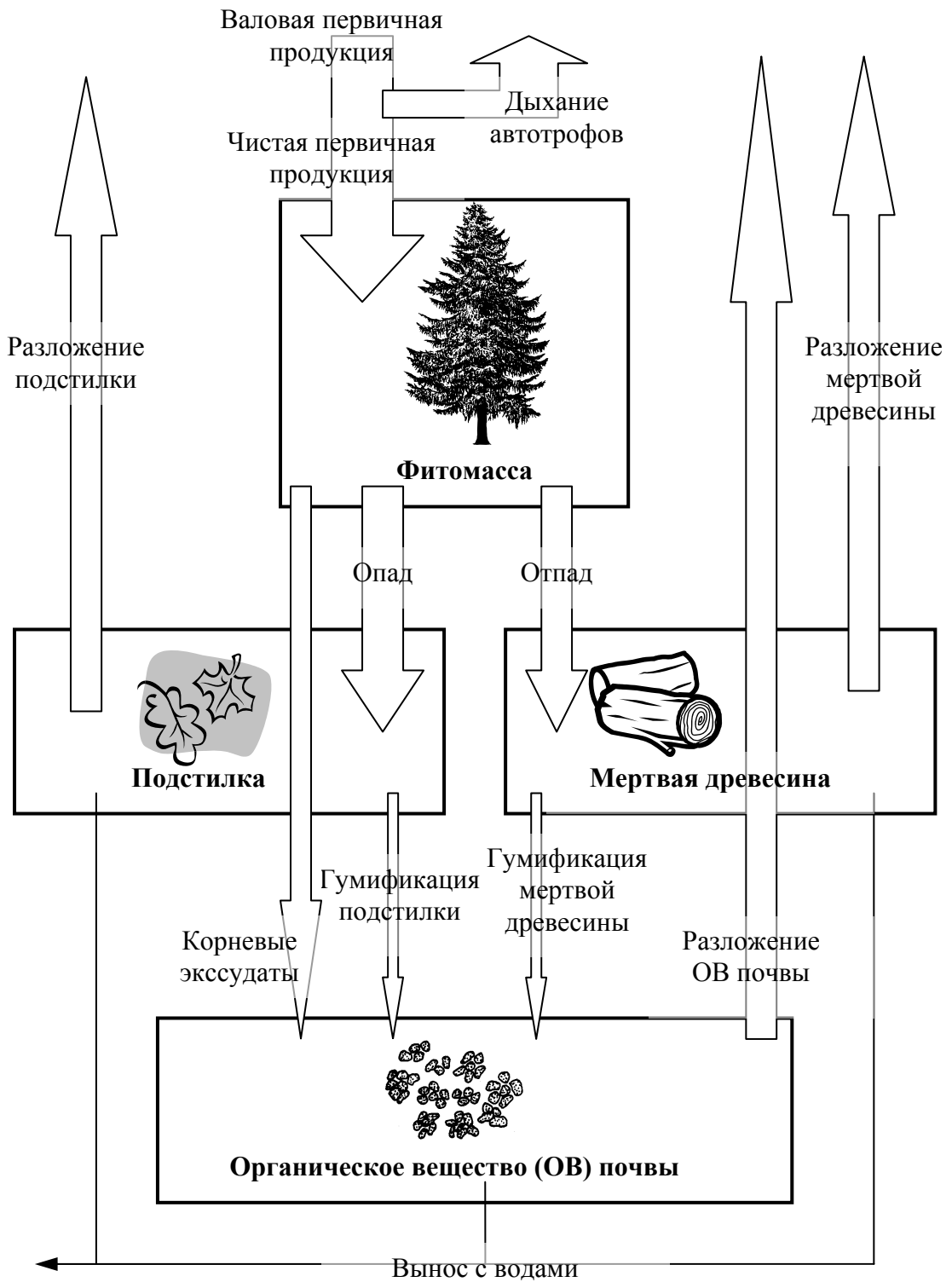


Рис. 1. Схема пулов и потоков углерода в лесной экосистеме

По мере роста любого древостоя происходит отмирание части деревьев, что в основном связано с внутри- и межвидовой конкуренцией за световые ресурсы. Это отмирание именуют отпадом, представляющим собой поток, переводящий углерод из фитомассы в пул мертвой древесины. Мертвая древесина, как и подстилка, подвергается разложению, выводящему углерод в атмосферу, а трансформированное вещество мертвой древесины пополняет пул органического вещества почвы. Доля углерода, переходящего от фитомассы через пулы подстилки и мертвой древесины в почву, составляет 5–10 % от его массы в исходном опаде или отпаде [4, 5, 19].

Существует и прямой поток углерода, идущий от фитомассы в почву. Он связан с корневыми выделениями (экссудатами) растворенных органических веществ. Корневые экссудаты включают сахара, аминокислоты и ряд других веществ. При активном фотосинтезе растения, в том числе и деревья, обязательно выделяют растворенные органические вещества в почву, зачастую в значительном количестве. До 40 % углерода, фиксированного в чистой первичной продукции, может быть выделено в почву корнями [76]. Корневые экссудаты легко усваиваются различными микроорганизмами, обитающими в непосредственной близости от корней (эту область называют ризосферой). Хотя подавляющая часть углерода корневых экссудатов быстро высвобождается в атмосферу в результате деятельности микроорганизмов, некоторое количество все же закрепляется в органическом веществе почвы после ряда биохимических трансформаций [73, 94].

Гумусные вещества почвы тоже подвергаются разложению в результате деятельности организмов-редуцентов. Этот процесс называется минерализацией. Поясним, что приводимый в значительном числе исследований поток «дыхание почвы» включает дыхание корней (часть дыхания автотрофов), дыхание ризосферных организмов и минерализацию гумуса. Совокупность потоков разложения всех пулов именуется дыханием гетеротрофов (R_h).

Углерод может покидать лесную экосистему и с водными потоками. Дождевые и талые воды, просачиваясь через почву и формируя грунтовый сток, захватывают некоторое количество растворенных органических веществ, которые затем попадают в ручьи и реки, в конечном счете оказываясь в озерах или морях. Поверхностные водные потоки могут уносить грубые растительные остатки (вплоть до стволов деревьев).

Приведенный краткий обзор углеродного цикла основан на структуре из четырех пулов МГЭИК. Детализация рассмотрения пулов значительно усложняет схему потоков. Например, если разделить фитомассу на надземную и подземную, то дополнительно следует рассматривать потоки, связанные с отмиранием и разложением корней. При этом как скорости разложения, так и доли перехода в гумусные вещества значительно различаются в зависимости от того, идет трансформация растительных остатков над или под поверхностью почвы. Детальное исследование углеродного цикла даже в одной лесной экосистеме требует значительных временных затрат и наличия разнообразного научного оборудования.

Если главным предметом интереса является взаимодействие лесной экосистемы с атмосферой (а именно этот аспект находится в фокусе внимания климатических соглашений), то задача оценки существенно упрощается. Потоки углерода, связанные с каждым из пулов, формируют итоговую балансовую величину, определяющую направление изменения величины данного пула. Наиболее очевиден баланс углерода по фитомассе. Каждый может наблюдать увеличение запасов фитомассы при росте молодого насаждения, если будет посещать его в течение нескольких лет. В терминах рис. 1 это означает, что чистая первичная продукция превышает опад и отпад. Как правило, при росте лесных насаждений аналогичная ситуация присутствует и для других пулов углерода. В дальнейшем увеличение пулов углерода при увеличении возраста лесных насаждений мы будем называть приростом, хотя в некоторых случаях может наблюдаться и возрастное уменьшение пулов [8].

В старовозрастных лесах входящие и исходящие потоки углерода, как правило, сравниваются, в результате лес становится нейтральным по балансу углерода с атмосферой. Равновесие потоков является основой стабильного существования старовозрастной лесной экосистемы, при этом сами потоки (например, *NPP*) остаются на высоком уровне. Факт того, что даже при наличии высокого фотосинтетического стока старовозрастный лес нейтрален по балансу углерода с атмосферой, положен в основу большинства систем региональной оценки бюджета углерода лесов. Впрочем, в ряде работ он ставится под сомнение [75, 92].

Перейдем к рассмотрению углеродного бюджета лесной территории, которая состоит из совокупности лесных насаждений разного возраста. Молодые леса обладают приростами углерода в различных пулах, в старовозрастных лесах пулы стабильны. При наличии информации о возрастной структуре лесов территории и о типовых величинах приростов можно оценить совокупные приросты пулов данного региона. Леса любого региона подвержены различным нарушающим воздействиям: рубкам, лесным пожарам, вспышкам вредителей, ветровалам и т. д. Эти воздействия приводят к гибели либо к деградации лесов, потерям запасов углерода и эмиссиям углекислого газа в атмосферу. Определив величину потерь и вычтя их из приростов, получаем итоговую оценку углеродного баланса лесной территории (рис. 2). Именно такой подход рекомендуется к использованию руководством МГЭИК [24] под названием «метод баланса потоков». Второй рекомендуемый МГЭИК метод – по разности запасов – используется при наличии последовательных сведений о величинах углеродных пулов в лесах. В этом случае оценкой годового баланса углерода служит разность его запасов между последовательными учетами, отнесенная к продолжительности межучетного интервала.

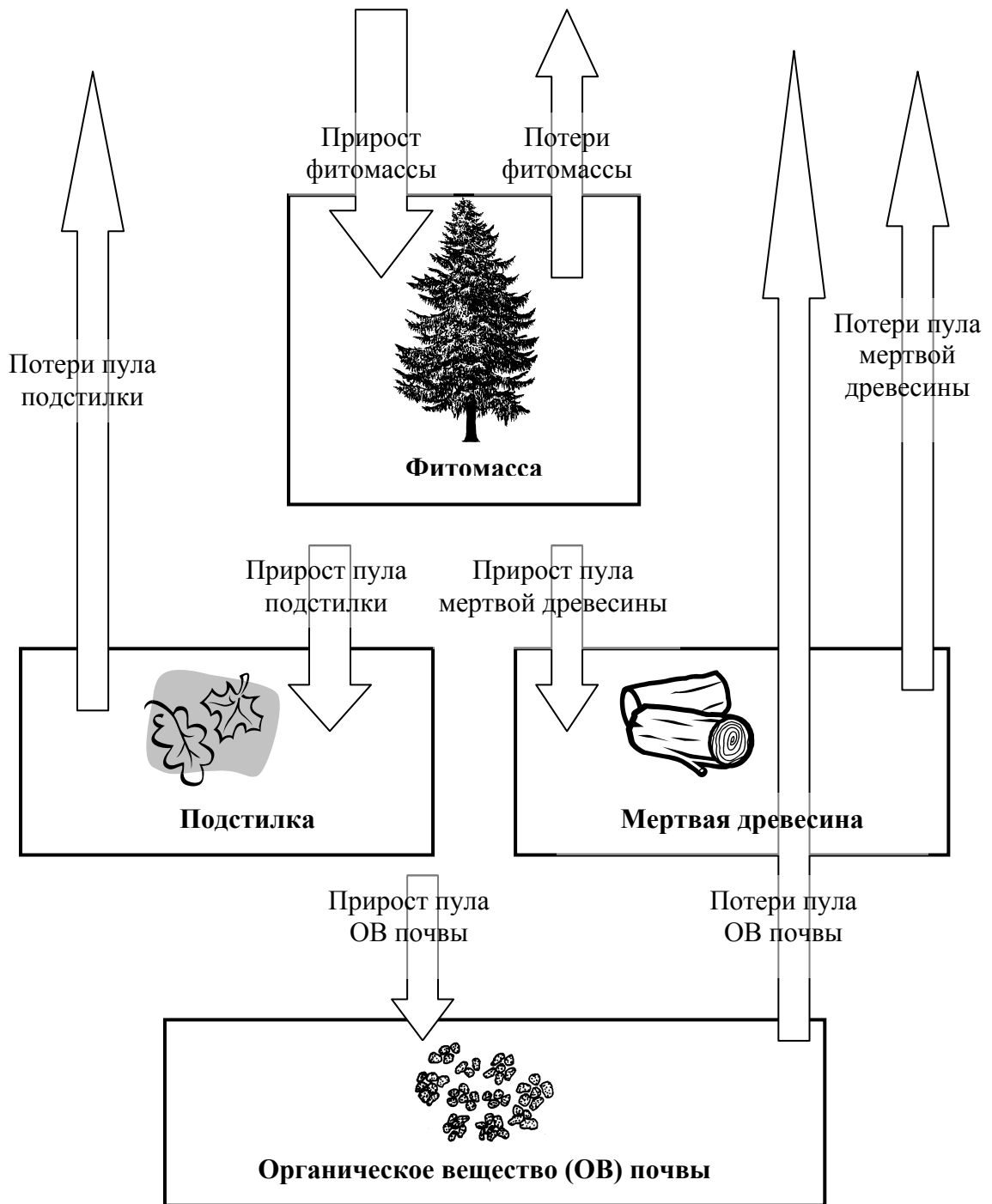


Рис. 2. Схема бюджета углерода лесов на региональном уровне

Потери запасов углерода лесами в результате нарушений могут быть как обратимыми, так и необратимыми. Если на вырубках, гарях и местах других нарушений естественным или искусственным образом восстанавливаются молодые леса, происходит постепенная компенсация

запасов углерода за счет увеличения запасов фитомассы и других пулов. Если же на местах нарушений происходят изменения землепользования, например конверсия в пахотные земли, то компенсация потерь отсутствует. Такая конверсия в современном мире характерна для многих развивающихся стран с высокими темпами сведения тропических лесов.

Длительное постоянство уровня нарушающих воздействий приводит к соответствующей адаптации совокупности лесов региона, формируется устойчивое соотношение площадей лесов различного возраста. Суммарные для региона запасы углерода лесов стабилизируются, а региональный баланс углерода лесов приближается к нулевому (потери с нарушениями компенсируются приростами запасов углерода в молодых лесах). Если уровень нарушений увеличивается, то совокупность лесов начинает терять углерод и превращается в источник углекислого газа для атмосферы. Если уровень нарушений снижается, то совокупность лесов обретает способность к поглощению дополнительных количеств углерода и становится его стоком. Таким образом, уровень нарушающих воздействий является тем рычагом, который управляет региональным балансом углерода лесов.

ГЛАВА 2. БАЗОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ И ПОТОКОВ ЛЕСНОГО УГЛЕРОДА

Предметом нашего внимания будет региональный уровень оценки запасов и потоков лесного углерода. Необходимо отметить, что любая региональная оценка требует привлечения сведений, полученных на локальном уровне лесной экосистемы (выдела). Эти сведения должны быть достаточны, чтобы охарактеризовать углеродные параметры для разнообразия типов лесного покрова на оцениваемой территории. Потому на первом этапе региональная оценка, как правило, включает сбор информации и формирование баз данных по пробным площадям с полевыми определениями запасов и потоков углерода. Первой значительной компиляцией сведений по продукционным параметрам наземных экосистем Северной Евразии была фундаментальная сводка Н. И. Базилевич [2]. К настоящему времени титанический труд по формированию и публикации баз данных осуществлен В. А. Усольцевым, серия монографий которого содержит практически исчерпывающую информацию по экспериментально-полевым оценкам запасов фитомассы и чистой первичной продукции в лесах Северной Евразии [26–30]. Эти монографии фактически снимают необходимость формирования баз локальных данных для региональных оценок, проводимых в лесах России.

Следует выделить четыре базовых подхода к проведению региональной оценки запасов углерода в лесах: картографический, конверсионный, дистанционный, модельный.

При картографическом подходе сначала выделяются полигоны на основе географических карт, дистанционной информации либо иного источника данных. Затем устанавливаются соответствия между полигонами и типовыми значениями запасов (а иногда и потоков) углерода, которые рассчитываются по базам локальных данных. Далее сумма произведений площадей полигонов на типовые значения дает искомую оценку запаса

углерода для исследуемого региона. Некоторые из ранних оценок суммарных запасов углерода в фитомассе лесов России выполнены на основе картографического подхода с использованием базы данных Н. И. Базилевич [63, 64].

Конверсионный подход является специфическим методом, применяемым к лесным экосистемам и территориям, для которых имеется информация из инвентаризации лесов. Эта информация включает в себя сведения об объемных запасах древесины, необходимые для адекватной хозяйственной оценки лесных ресурсов. Объемные запасы древесины пересчитываются в массу органического вещества или углерода с помощью конверсионных коэффициентов, имеющих размерность $t\ m^{-3}$. Конверсия объемного запаса древесины в углерод фитомассы имеет четкое физическое обоснование: объем связан с массой через плотность. Конверсионный коэффициент позволяет оценить углерод стволовой древесины. Прочие фракции фитомассы (корни, ветви, листва) функционально связаны с массой ствола и потому тоже могут быть включены в расчет конверсионных коэффициентов. Конверсионный подход с успехом применялся в многочисленных работах [12, 16, 25, 61] для расчетов запасов фитомассы лесов России. Имеются примеры его использования и в отношении оценки углерода мертвой древесины [8, 11, 40]. Конверсионный подход в применении к углероду фитомассы лесов рекомендован руководством МГЭИК [24].

Дистанционный подход связан с активным зондированием земной поверхности, осуществляемым при помощи радаров либо лидаров¹. При активном зондировании значения фитомассы определяются по ослаблению сигнала, отраженного от земной поверхности. К настоящему времени

¹ Лидар (транслитерация LIDAR англ. Light Identification, Detection and Ranging) — технология получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения света и его рассеивания в прозрачных и полупрозрачных средах.

разработаны системы оценки объемных запасов древесины и фитомассы древостоя, ориентированные на использование данных радаров спутников ESR-1, ESR-2, ENVISAT [47, 83], продолжается совершенствование систем интерпретации лидарной съемки [93]. Активное зондирование является единственным из обсуждаемых подходов, которое можно рассматривать в качестве прямого способа измерения региональных запасов углерода древостоя. Все остальные подходы являются расчетно-оценочными. Особо отметим, что оценки запасов углерода, полученные с использованием дистанционной информации оптического диапазона, по своей сути являются картографическими. Спутниковая информация в этом случае используется для выделения полигонов или классификации пикселей цифровой карты, а расчет запасов углерода проводится по ассоциированным типовым значениям [83] либо моделям [77].

Модельные подходы крайне разнообразны, однако значительную часть модельных оценок региональных запасов и бюджетов углерода лесов можно свести к картографическому и конверсионному подходам. В этом случае модель либо применяется к полигонам или пикселям цифровых карт, либо использует информацию лесных инвентаризаций по объемным запасам древесины. Специфический модельный подход базируется на описании точек, располагающихся в пределах рассматриваемого региона регулярным [62] либо иррегулярным [87] образом. Усредненное значение по всем точкам приложения модели дает искомую региональную оценку.

При переходе от статической оценки запасов углерода к динамической картине его потоков картографические и конверсионные системы расчетов чаще всего используют схему расчета по балансу приростов и потерь согласно рис. 2. Дистанционные подходы на основе лидаров и радаров, как правило, ограничиваются рассмотрением статической картины запасов, хотя при наличии архивов исходной съемки представляется возможным использовать метод расчета баланса по изменению запасов углерода. Модельные подходы в применении как к полигонам, так и к точечной сетке

ориентированы на рассмотрение детальной схемы углеродного цикла согласно рис. 1 с последующим включением оценки потерь углерода при нарушениях лесного покрова. Кроме того, использование моделей позволяет прогнозировать запасы и потоки углерода лесов. Примеры реализации всех рассмотренных подходов приведены ниже в обзоре систем оценки запасов и потоков углерода в лесах.

ГЛАВА 3. СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ УГЛЕРОДНОГО БЮДЖЕТА ЛЕСОВ

Оценка углеродного бюджета лесов и других территориальных систем – крайне популярное направление экологических исследований двух последних десятилетий. Количество научных публикаций по этой проблеме исчисляется десятками тысяч, при этом большинство научных коллективов опираются на инструменты оценки собственной разработки. При включении системы оценки в настоящий обзор мы руководствовались несколькими критериями. Первый из них связан с научным признанием системы, которое можно охарактеризовать как по числу публикаций в рецензируемых научных журналах, так и по уровню цитирования в независимых публикациях. Во-вторых, опыт практического использования системы, например в национальных инвентаризациях парниковых газов. В-третьих, наличие приложения системы к оценке запасов и потоков углерода лесов России. Последний критерий определяется задачей иллюстрации всего спектра используемых методических подходов. Итоговый выбор представляют восемь систем оценки запасов и потоков лесного углерода, названия и разработчики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Рассматриваемые системы оценки и прогноза запасов углерода в лесах

Система	Организация – головной разработчик	Ключевые авторы
ИЗИС ПАСА	Международный институт прикладного системного анализа (IIASA), Австрия	А. З. Швиденко, Д. Г. Щепашенко, С. Нильссон
РОБУЛ	Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН), Россия	Д. Г. Замолотчиков
Информационная система определения и картирования депонируемого лесами углерода УГЛТУ	Уральский государственный лесотехнический университет (УГЛТУ), Россия	В. А. Усольцев
FORRUS	Московский государственный университет леса (МГУЛ), Россия	С. И. Чумаченко
EFIMOD	Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХБП РАН), Россия	А. С. Комаров, О. Г. Чертов
CBM-CFS3	Лесная служба Канады (CFS), Канада	W. Kurz
BIOMASAR	Йенский университет имени Фридриха Шиллера (University Jena), Германия	M. Santoro, C. Schmulius
Система оценки состояния лесов Папуа Новой Гвинеи	Университет Папуа Новой Гвинеи (UPNG), Папуа Новая Гвинея	P. Shearman, J. Bryan

3.1. Интегральная земельная информационная система ИАСА

По числу опубликованных работ, касающихся различных аспектов углеродного цикла лесов России, безусловное первенство принадлежит группе исследователей Международного института системного прикладного анализа (IIASA), возглавляемой А. З. Швиденко. О научном признании результатов этой группы свидетельствует участие авторов в ряде обзорных публикаций последнего времени, опубликованных в самых престижных научных журналах [80, 82].

Современные работы группы выполнены с использованием системы оценки, получившей название «Интегральная земельная информационная система» (ИЗИС). Отметим, что сферой применения ИЗИС являются все типы земного покрова России, а не только леса. Система интегрирует разнообразные информационные и модельные слои, в том числе сведения государственных учетов лесного фонда, материалы лесохозяйственной статистики, данные экспериментально-полевых измерений компонентов углеродного цикла, авторские модели оценки фитомассы, чистой первичной продукции, дыхания почвы, разложения органического вещества, метеорологическую информацию. Процедуры и информационные источники, использованные для формирования картографической основы ИЗИС, названной авторами гибридным покровом, детально охарактеризованы в работе [84]. Исходные данные включали: такие широко известные дистанционные продукты, как Глобальный земной покров (GLC2000) и Проективное покрытие растительности по MODIS (VCF); официальные статистические сведения, в частности материалы государственного учета лесного фонда по состоянию на 2003 год и государственного учета земель по состоянию на 2005 год; разнообразные тематические карты (почвы, растительности, административных границ, лесохозяйственных предприятий и т. д.), ранее изданные на CD «Земельные ресурсы России» [89, 91]. Суть

процедур формирования гибридного покрова сводится к реклассификации GLC2000 по информации земельных и лесных учетов.

Запасы фитомассы и чистой первичной продукции в ИЗИС оцениваются по совокупности моделей и процедур, изложенных в работе [88]. Для фитомассы лесов использован конверсионный подход, чистая первичная продукция по различным фракциям фитомассы оценивается как функция от фитомассы с привлечением сведений из таблиц хода роста. Оценка проводится для всех классов гибридного покрова. Например, получена карта пространственного распределения запасов углерода в фитомассе (рис. 3). В целом ИЗИС следует охарактеризовать как систему моделей, сочетающих конверсионный и картографический подходы. Оценка бюджета углерода ведется по балансу потоков для лесной экосистемы (согласно рис. 1), с последующим расчетом региональных приростов углерода и потерь от нарушений (согласно рис. 2).

Система ИЗИС и ее отдельные компоненты послужили инструментом для проведения большого ряда тематических и региональных работ, в частности оценок чистой первичной продукции лесов России [39], запасов мертвой древесины [40], эмиссий от природных пожаров [89], углеродных бюджетов лесов Красноярского края [38] и северо-восточной части России [41].

Система ИЗИС является инструментом исследователя, т. е. она не ориентирована на применение сторонними пользователями. Однако значительная часть информационных материалов, полученных при ее создании или на ее основе, представлена на веб-сайте IIASA [56]. В частности, там можно найти модели биологической продуктивности, базу данных измерений фитомассы, численные значения фитомассы лесов в дифференциации по преобладающим породам, группам возраста и административным районам России (по состоянию на 2003 год). Как перечисленные, так и ряд других информационных материалов,

представленных на сайте IIASA, могут быть полезными для параметризации независимых систем оценки запасов и потоков углерода в лесах России.



Рис. 3. Запасы фитомассы в наземных экосистемах России ($t C \text{ га}^{-1}$) согласно ИЗИС IIASA [89]

3.2. Система «РОБУЛ»

Методика «РОБУЛ» ориентирована на использование в качестве основного информационного источника материалов государственных учетов лесного фонда (ГУЛФ) либо государственного лесного реестра (ГЛР). Полное описание уравнений и табличных параметров «РОБУЛ» размещено на веб-сайте ЦЭПЛ РАН [54]. Там же выложено программное обеспечение «РОБУЛ», при помощи которого любой специалист, обладающий информацией ГУЛФ либо ГЛР, может осуществить оценку углеродного бюджета лесного региона. Лесным регионом может быть лесничество (в материалах ГУЛФ – лесхоз) либо субъект Российской Федерации.

Выбор табличных параметров расчета в «РОБУЛ» осуществляется в соответствии с географической принадлежностью исследуемого региона к одному из 12 зонально-региональных полигонов, образованных

пересечением границ широтных полос (северная тайга, средняя тайга, более южные зоны) и макрорегионов (европейско-уральская часть, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток). Подробное описание данного подхода к пространственной дифференциации природно-климатических условий приведено в работе [12].

Начальная часть расчетов по методике «РОБУЛ» состоит в оценке запасов углерода по возрастным группам (молодняки I класса возраста, молодняки II класса возраста, средневозрастные, приспевающие, спелые, перестойные) преобладающих пород лесного региона. Запасы углерода в пулах фитомассы и мертвой древесины рассчитываются на основе данных по объемным запасам стволовой древесины из материалов ГЛР либо ГУЛФ с применением соответствующих конверсионных коэффициентов [8, 15]. Запасы углерода в пулах подстилки и почвы оцениваются по сведениям о площадях насаждений лесообразующих пород из ГЛР либо ГУЛФ с применением типовых средних значений [13, 33, 34]. Получение оценок запасов углерода в разрезе групп возраста насаждений обеспечивает возможность расчета углеродных приростов по всем пулам с применением информации о продолжительности возрастных групп.

Материалы ГУЛФ и ГЛР включают площади вырубок, гарей, погибших насаждений, величина которых определяется балансом темпов нарушений и зарастания. При известных временах зарастания вырубок и гарей эта информация позволяет рассчитать годовые темпы нарушений. Применение найденных темпов нарушений к полученным ранее запасам углерода в различных категориях лесных насаждений дает оценку годовых потерь углерода. Расчетные темпы нарушений могут быть заменены на информацию лесохозяйственной статистики по масштабам сплошных рубок и пройденной пожарами площади. Таким образом, оценка потерь углерода в «РОБУЛ» может проводиться в двух вариантах: с расчетом темпов нарушений по площадям вырубок, гарей и погибших насаждений

(«РОБУЛ1»); по текущим величинам годовых площадей сплошных рубок и лесных пожаров из материалов лесохозяйственной статистики («РОБУЛ2»).

Проиллюстрируем некоторые возможности системы «РОБУЛ» на примере оценки динамики углеродного бюджета лесов России за 1988–2009 годы (рис. 4). В результатах по «РОБУЛ1» хорошо просматривается тенденция к повышению стока углерода в леса России с 80 Мт С год⁻¹ в 1988 году до 230–240 Мт С год⁻¹ во второй половине 2000-х годов. Эта тенденция связана с резким сокращением объемов лесопользования, имевшем место в России с начала 1990-х годов. При расчете с помощью «РОБУЛ» величины бюджета варьируют от 70 (1998 год) до 287 (2001 год) Мт С год⁻¹, что связано с влиянием пожаров. Тенденция к повышению стока углерода с конца 1990-х годов прослеживается и в этом случае.

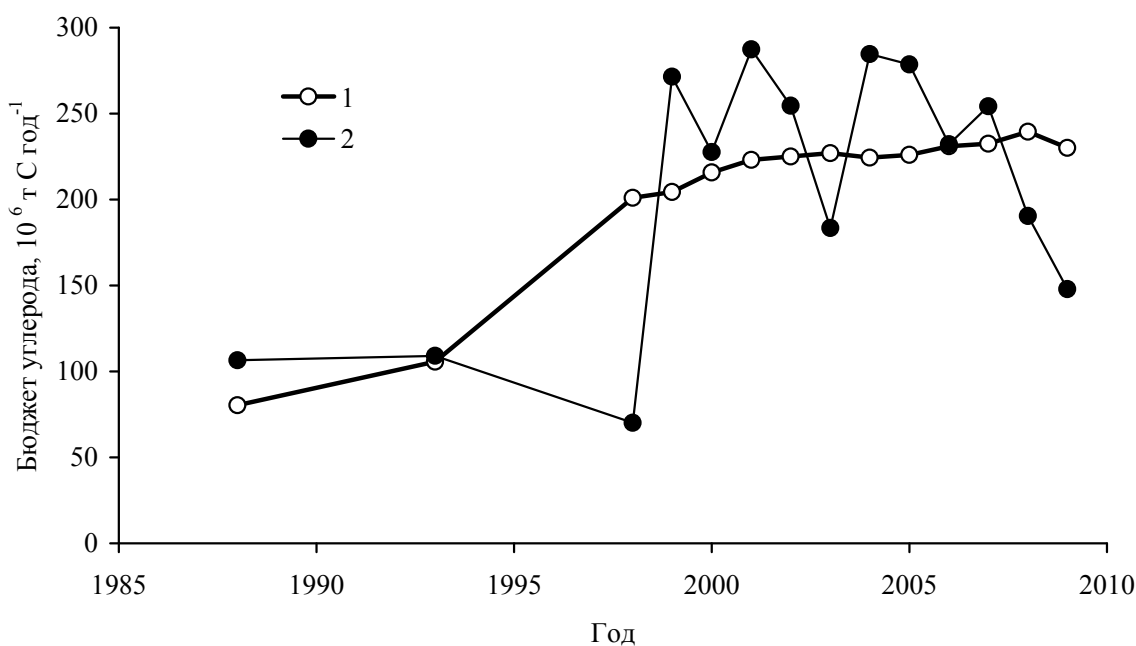


Рис. 4. Динамика углеродного бюджета лесов России согласно системе «РОБУЛ» при оценке масштабов нарушений по площадям вырубок и гарей (1) и по сведениям лесохозяйственной статистики (2) [14]

В рассматриваемом примере расчеты «РОБУЛ» осуществлены на уровне субъектов Российской Федерации, что создает возможность

рассмотрения динамики пространственного распределения бюджета углерода лесов (рис. 5). В 1988 году леса почти всей территории Дальнего Востока, частично Восточной Сибири, а также севера европейской части страны были источником углерода. К 2008 году леса этих регионов стали небольшим стоком углерода, за исключением Республики Тувы и лесной части Чукотского автономного округа. Леса с максимальными величинами стока углерода как в 1988 году, так и в 2008 году приурочены к средней полосе европейской части.

Отмеченные особенности пространственного распределения стоков и источников углерода в лесах вполне объяснимы географическими особенностями лесохозяйственной деятельности. Принципиальные различия между европейско-уральской и азиатской частями России связаны с влиянием пожаров. В европейско-уральской части преобладает наземная форма организации охраны лесов от пожаров, как правило, достаточно эффективно выполняющая свои функции. В Сибири и на Дальнем Востоке велика зона космического мониторинга лесных пожаров (ранее – не охраняемая часть от пожаров территория лесного фонда), в которой борьба с лесными пожарами проводится лишь в том случае, если они угрожают населенными пунктам и объектам инфраструктуры. Потому в этих регионах пожары охватывают огромные площади и влекут за собой значительные потери углерода лесов. Причиной усиления стока углерода в леса от 1988 к 2008 году, как уже отмечалось выше, является снижение объема заготовок древесины. Это снижение прошло по всей территории России, повысив сток углерода в леса европейской части и почти ликвидировав лесные источники углерода на Дальнем Востоке.

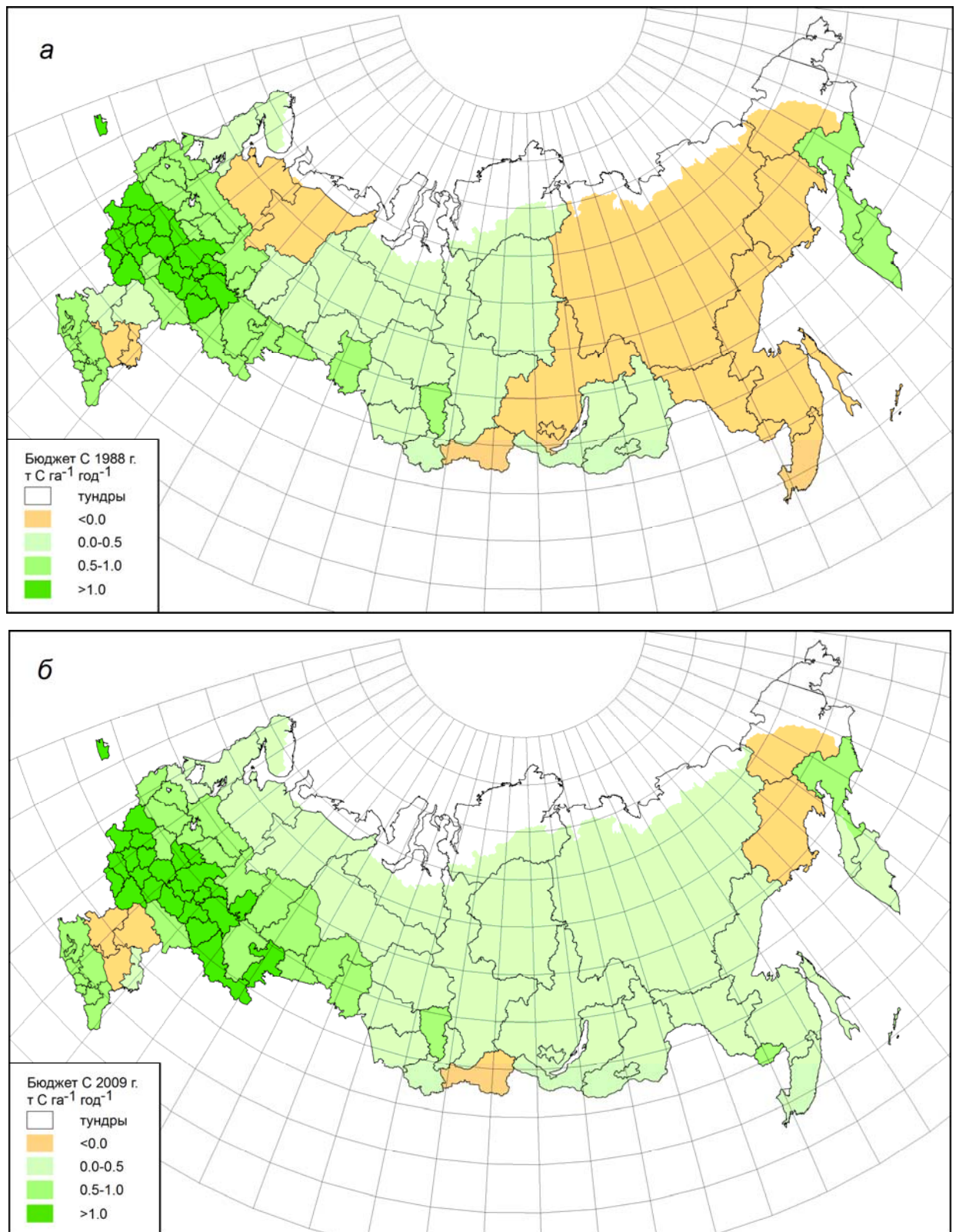


Рис. 5. Распределение средних величин бюджета углерода лесов по субъектам Российской Федерации в 1988 (а) и 2009 (б) годах согласно системе «РОБУЛ» [14]

Приведенный пример использования «РОБУЛ» показывает, что региональный баланс углерода лесов в значительной степени контролируется характером и интенсивностью лесохозяйственной деятельности. Реальный учет углеродного аспекта в управлении лесами России действительно сможет значительно повысить сток атмосферного углерода.

Методика «РОБУЛ» принята в качестве базовой для сектора лесного хозяйства в Национальном кадастре парниковых газов, ведение которого осуществляет Росгидромет. Результаты оценки бюджета углерода в управляемых лесах России, составляющих около 70 % покрытых лесом площадей лесного фонда, приведены в национальных докладах о кадастре [21, 22], ежегодно предоставляемых Российской Федерации в органы РКИК ООН² и потому доступные на сайте этой конвенции [53]. В составе Национального кадастра сектор лесного хозяйства регулярно подвергается детальной проверке со стороны экспертов РКИК ООН, успех в прохождении которой является свидетельством соответствия «РОБУЛ» рекомендациям МГЭИК [24].

Резюмируя, систему «РОБУЛ» следует охарактеризовать как конверсионно-картографическую, построенную на основе региональной схемы баланса потоков углерода (согласно рис. 2). Специфическая черта системы – возможность использования сторонними пользователями, что обеспечивается простотой программного обеспечения, выполненного в пакете Microsoft Excel, и организацией свободного доступа к обеспечению через Интернет. «РОБУЛ» не имеет встроенной поддержки ГИС, предоставляя потенциальному пользователю возможность применять привычные средства визуализации пространственно распределенных данных.

² Рамочная конвенция ООН по изменению климата

3.3. 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 [30]. 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 лесоуправления именуется лесничеством). Для оцениваемых лесхозов формируются таблицы-матрицы распределений покрытой лесом площади и запаса стволовой древесины по лесообразующим 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. 6).

Реализация обсуждаемой системы оценки углерода лесов России осуществлена в среде СУБД³ ADABAS и редактора приложений Natural [6, 7]. 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», Аэрофлот и многих других. Приоритет в применении 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.

³ Система управления базами данных (прим. ред.)

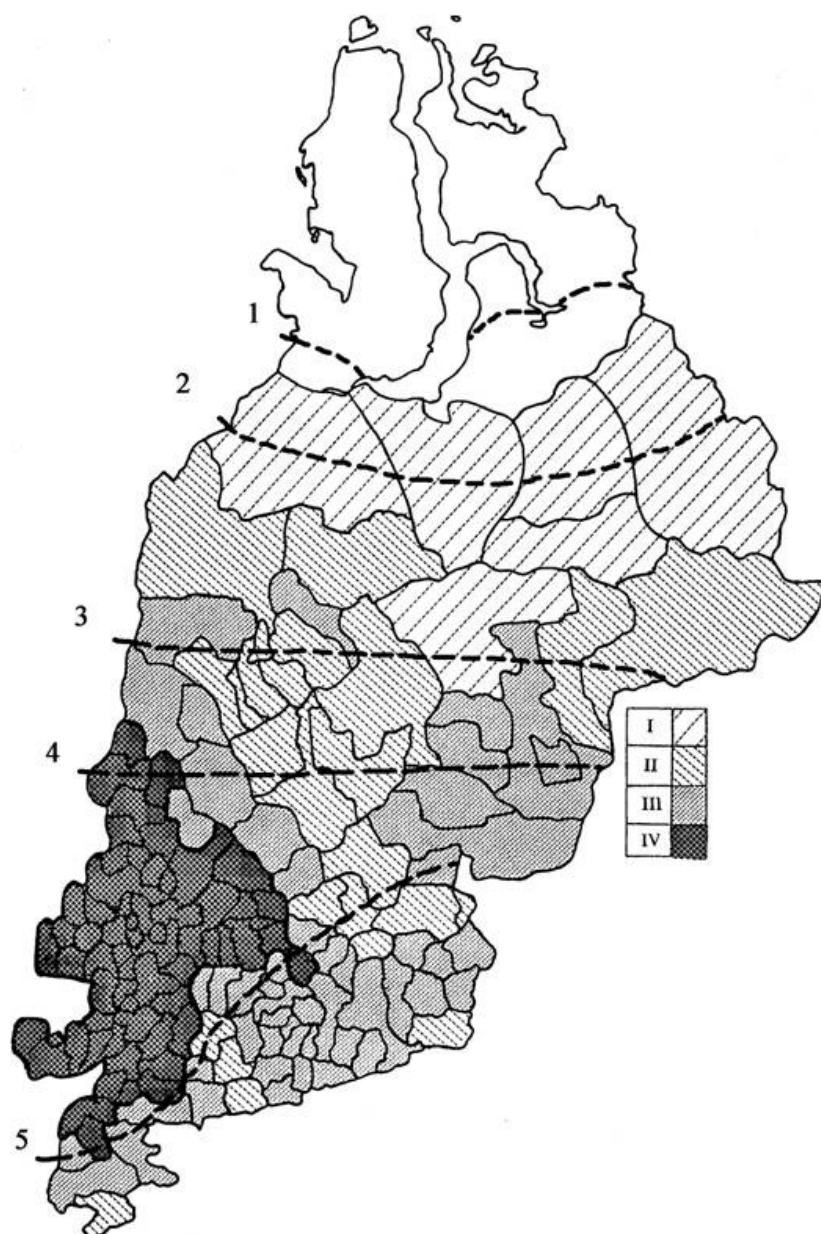


Рис. 6. Распределение запасов углерода в фитомассе насаждений в пределах Уральского федерального округа в расчете на общую (в границах лесхозов) площадь [30]. Градации запасов углерода, т С га⁻¹: I – 0–10; II – 10–25; III – 25–40; IV – 40–100. Южные границы биоклиматических зон: 1 – тундры, 2 – лесотундры, 3 – северной тайги, 4 – средней тайги, 5 – южной тайги

3.4. *FORRUS*

В основе системы *FORRUS*⁴ лежит эколого-физиологическая модель, описывающая процессы внутри- и межвидовой конкуренции древесных растений за световые ресурсы [35, 50]. 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 местообитания 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 [57].

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, средние 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 естественное развитие, учет лесохозяйственных мероприятий (рубок ухода, обновления, переформирования, лесовосстановления). Система позволяет прогнозировать динамику древостоя при проведении различных лесохозяйственных

⁴ Forest of Russia – Российский лес

мероприятий с учетом пространственной структуры лесных насаждений [36]. Примером такого исследования служит прогнозный анализ породного состава и возраста лесных насаждений Данковского лесничества Опытного лесного хозяйства «Русский лес» (рис. 7).

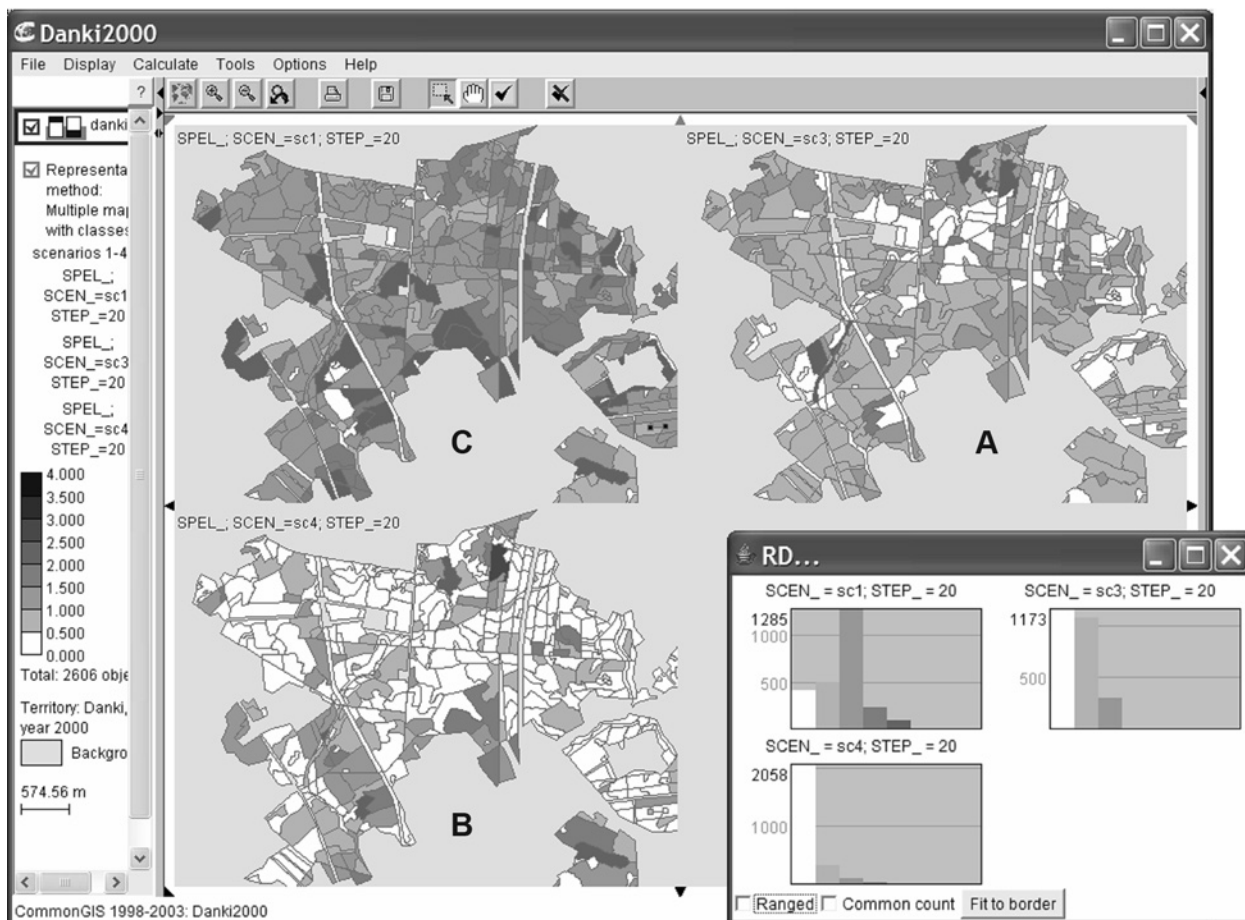


Рис. 7. Прогноз возрастного состава лесных насаждений Данковского лесничества в системе FORRUS [79] при применении в течение 100 лет определенных лесохозяйственных практик (А – нормативная, В – нелегальная, С – охранная). Темный фон заливки полигонов соответствует более высокому возрасту доминирующих древесных пород

В отличие от большинства рассматриваемых в обзоре систем FORRUS предназначена для комплексной оценки динамики структуры лесных насаждений, включая вопросы биоразнообразия, устойчивого

лесоуправления, 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 Ляскельского лесничества Республики Карелии (рис. 8). Напомним, что объемные запасы древесины легко пересчитать в углерод фитомассы с использованием конверсионных коэффициентов.

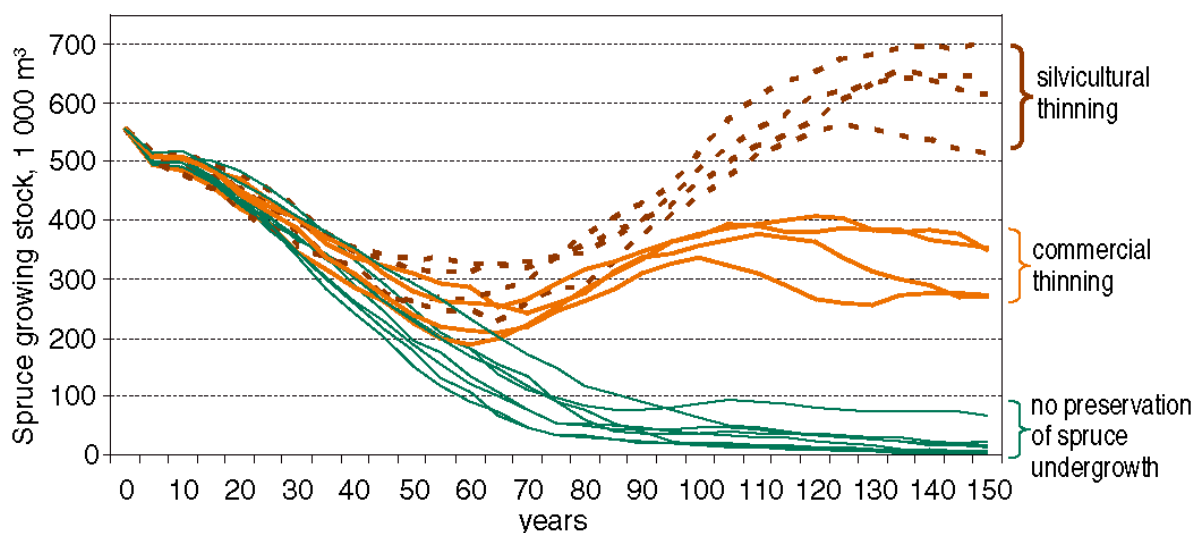


Рис. 8. Прогноз динамики суммарных запасов древесины в еловых насаждениях Ляскельского лесничества в системе FORRUS [51] при различных режимах рубок ухода и сохранения подроста в процессе главных рубок

3.5. 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 [48, 65]. 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, мулль);

- 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 [3].

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 элементам 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» [18, 32], Мантуровского лесничества Костромской области [37], Ленинградской области [49], лесов на песчаных почвах Голландии [78], выборки лесных насаждений Канады [85]. 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. 9). 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.

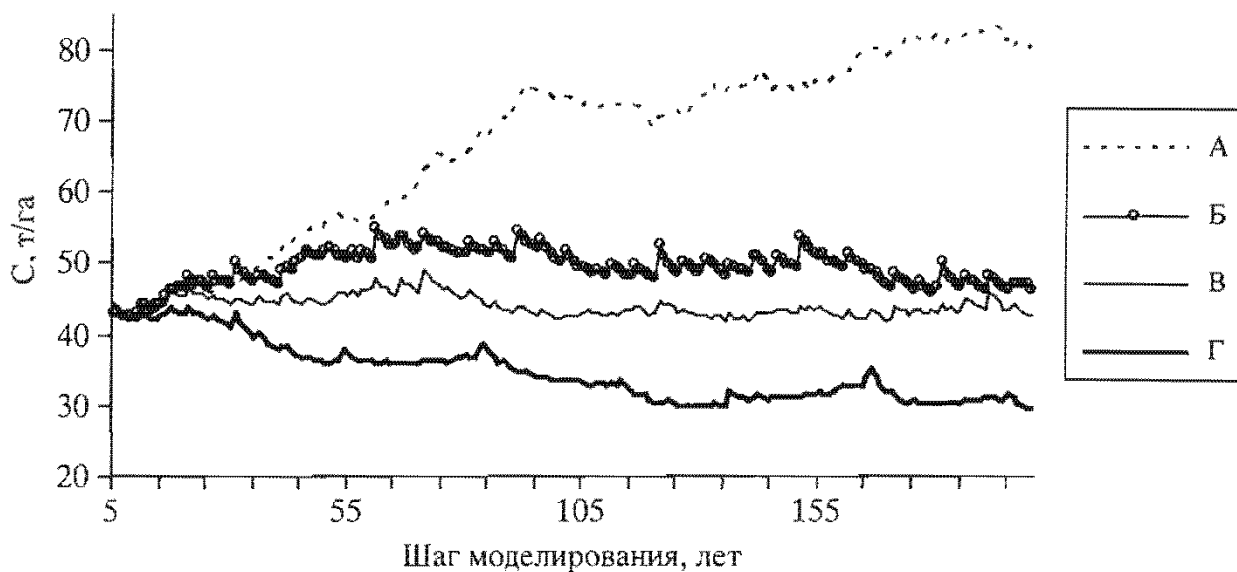


Рис. 9. Динамика запасов углерода почвы в лесах Данковского лесничества согласно модели EFIMOD [18] при сценариях лесопользования: А – естественное развитие лесов (без рубок); Б – выборочные рубки каждые 30 лет с выбором 30 % по сумме площадей сечений; В – рубки в соответствии с действующими нормативами; Г – одна рубка промежуточного пользования с выбором 50 % по сумме площадей сечений и рубка главного пользования без сохранения подроста

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). 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 [49], что снижает уверенность в надежности получаемых оценок. Этим объясняется отсутствие 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.

3.6. CBM-CFS3

Разработка модели CBM-CFS3 стартовала при поддержке Лесной службы Канады в начале 1990-х годов [67]. Для получения работающей версии модели понадобилось более 10 лет интенсивной деятельности, связанной как с теоретическими решениями проблем моделирования [70, 71, 74], так и с созданием пользовательского интерфейса [69]. Модель применяется для оценки углеродного бюджета лесов Канады в целом [68] и отдельных провинций [43, 81]. 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 [72]. Программное обеспечение модели и подробное руководство [66] доступны на сайте Лесной службы Канады [52].

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 эоклиматической зоне, вычисляются годовые величины отпада древесины, отпада листвы, 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.).

В качестве примера приложения CBM-CFS3 рассмотрим динамику бюджета углерода в управляемых лесах Канады за 1990–2008 годы (рис. 10). 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) 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.

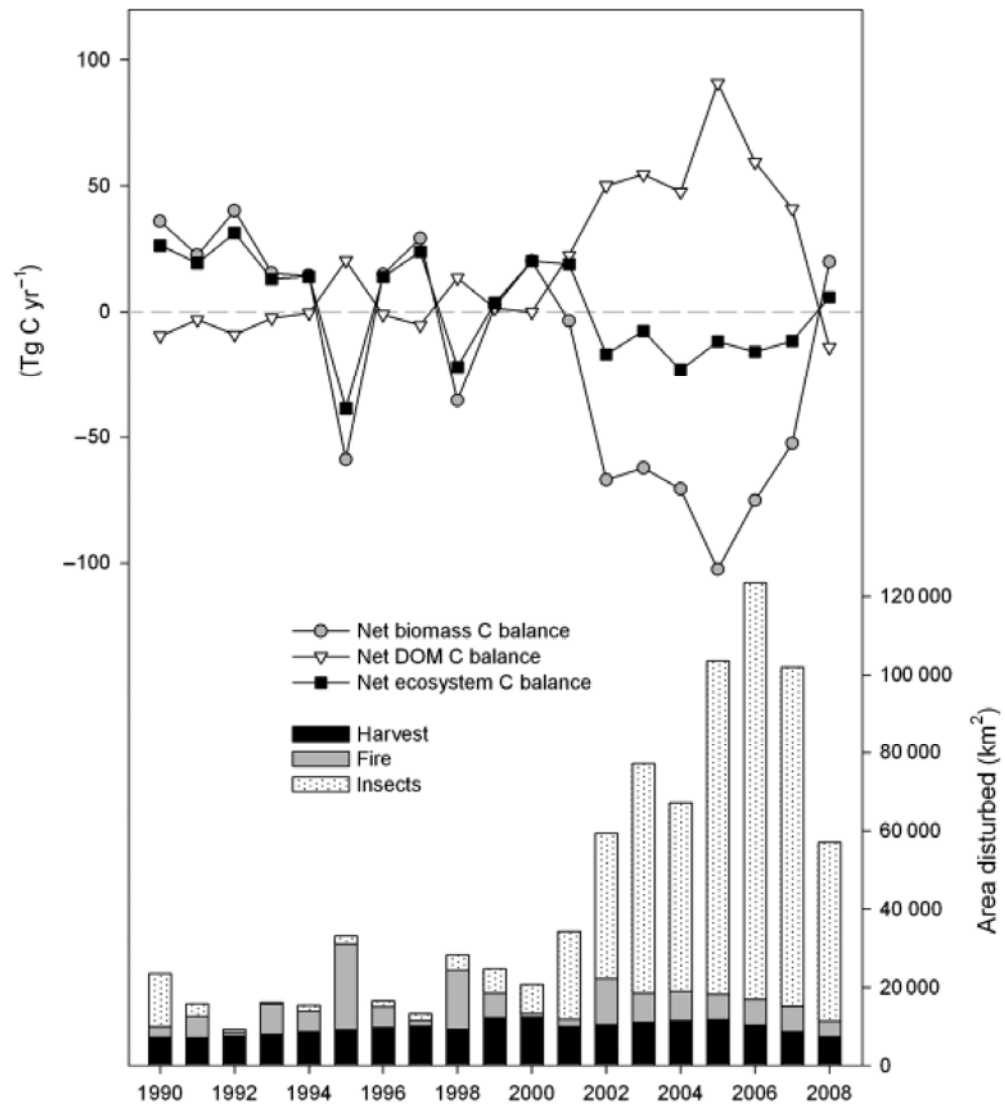


Рис. 10. Итоги оценки по модели CBM-CFS углеродного бюджета лесов Канады для пулов фитомассы, мертвого органического вещества и их совокупности (верхняя панель) на основе сведений по масштабам нарушений (нижняя панель) за 1990–2008 годы [90]

Модель CBM-CFS3 применялась для оценки и прогноза углеродного бюджета лесов ряда российских регионов: Вологодской области, Северного Кавказа, Дальнего Востока [1, 9, 10]. 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 руководства модели доступны для сторонних пользователей, однако для успешной работы с CBM-CFS3 квалификация пользователя должна быть высокой. Тренировочные курсы по работе с моделью периодически проводятся разработчиками как в Канаде, так и в других странах.

3.7. 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 IIASA 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 [42]. 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 следует учитывать большое 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 [47, 83].

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 [83]. Для иллюстрации результатов, полученных с использованием алгоритма, приведем карту запасов древесины в лесах Средней Сибири с разрешением 1×1 км (рис. 11).

Согласно персональному сообщению А. З. Швиденко (IIASA), являющегося участником проекта BIOMASAR, к концу 2011 года будет организован свободный доступ к ряду продуктов, в частности к цифровой циркумполярной карте запасов надземной фитомассы бореальных лесов с разрешением 150×150 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.

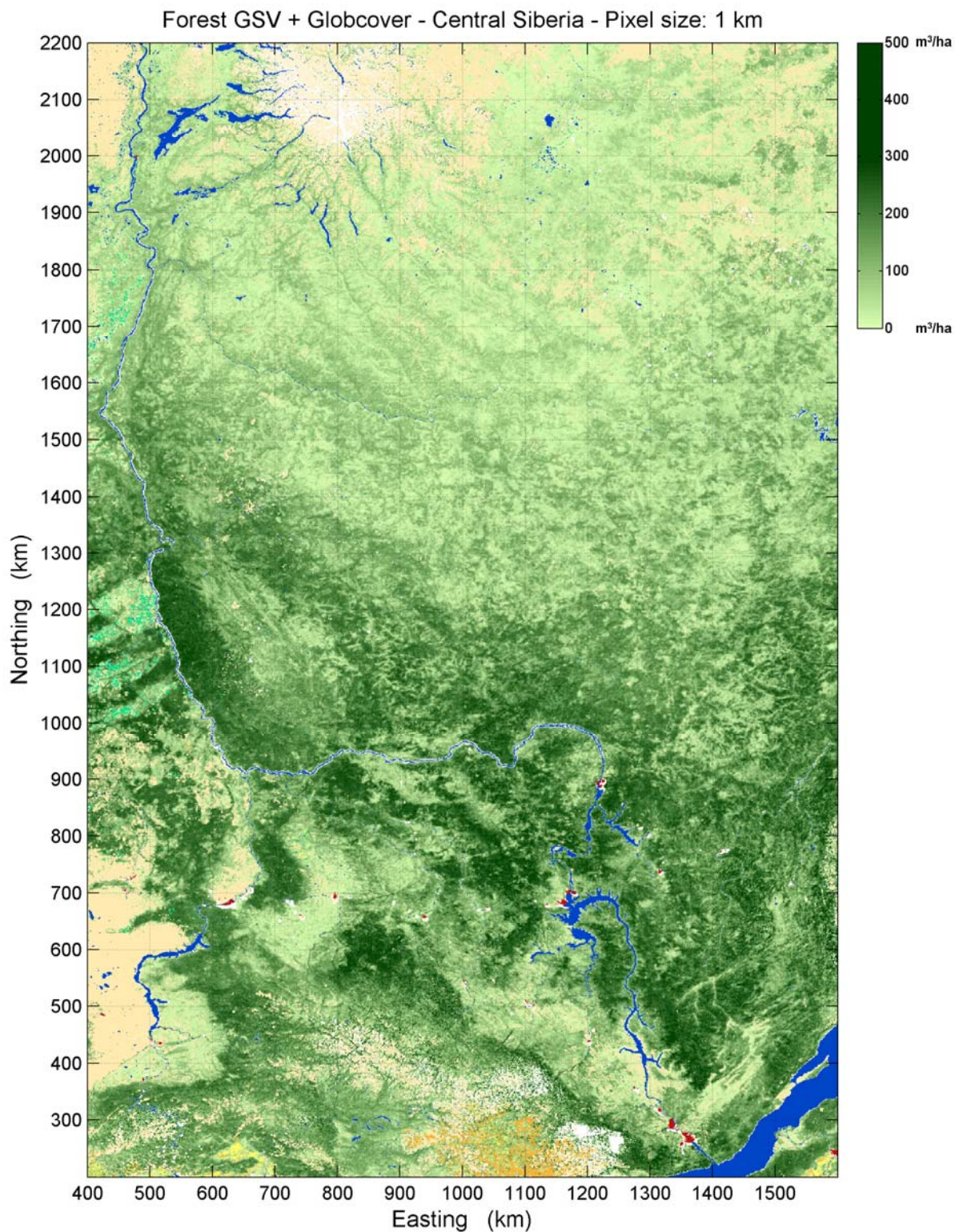


Рис. 11. Карта запасов древесины в лесах Центральной Сибири, полученная интерпретацией данных радарной локации со спутника ENVISAT [55]

3.8. 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 миссий 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 [44, 86]. 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. 12).

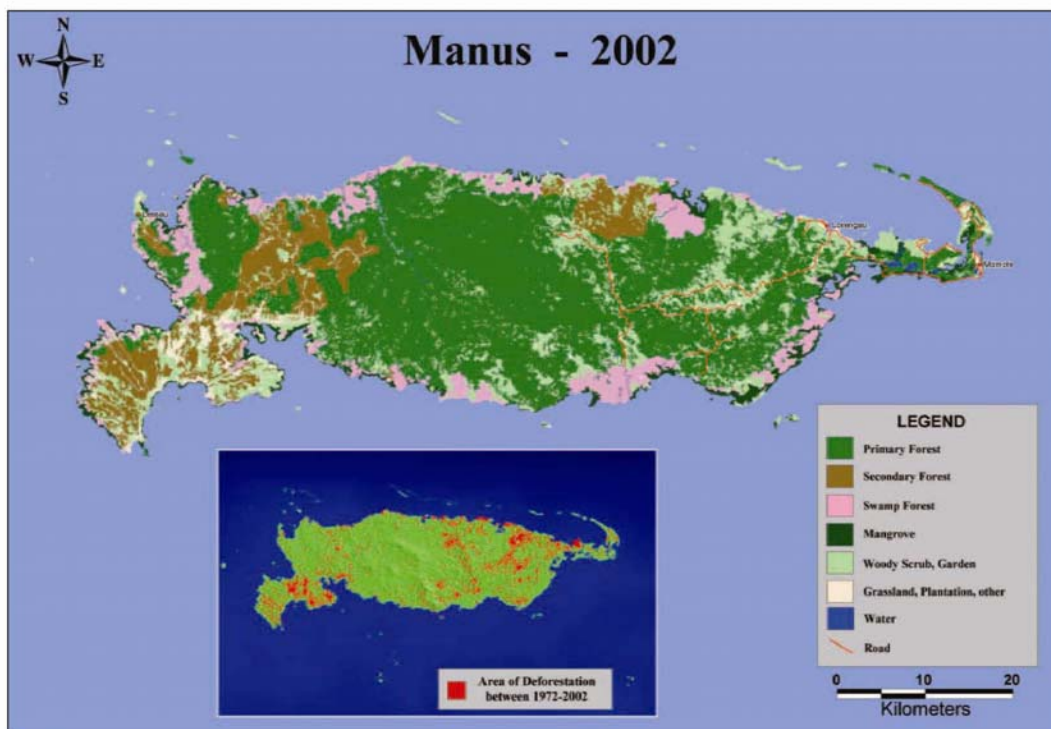


Рис. 12. Карта типов земного покрова острова Манус (Папуа Новая Гвинея) по состоянию на 2002 год и площадей обезлесивания за 1972–2002 годы [86]

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 [46]. Для уточнения запасов углерода фитомассы вторичных лесов в дальнейшем заложены дополнительные пробные площади [45]. 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 Гвинее 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 Гвинее возросли от 20 Мт С год⁻¹ в начале 1970-х годов до 50–60 Мт С год⁻¹ в начале 2000-х (рис. 13).



Рис. 13. Эмиссии углерода от обезлесивания в Папуа Новой Гвинее [46]

Создание системы оценки состояния лесов Папуа Новой Гвинее 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 Гвинее к широкомасштабной реализации REDD+ [59, 60] и является важным аргументом в пользу выделения стране значительных финансовых средств в рамках программы UN-REDD [58].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 (табл. 2). 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, CBM-CFS3), дают возможность осуществить оценку пулов и потоков углерода по детальной экосистемной схеме, в то время как системы с преобладанием инвентаризационной компоненты (РОБУЛ, УГЛТУ, BIOMASAR, 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 ПАСА 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» лесоуправления. Другие (ИЗИС ПАСА, УГЛТУ, BIOMASAR) 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 значительных средств в рамках программы UN-REDD и ряда двусторонних соглашений. Прочие системы оценки используются в качестве инструмента получения фундаментального научного знания.

Таблица 2. 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 исходным данным
ИЗИС ПАСА	Все пулы, бюджет по экосистемной схеме	Региональный, национальный	Лесной реестр, продукты ДЗЗ, метеоданные, тематические карты	Нет	Нет	Да
РОБУЛ	Все пулы, бюджет по региональной схеме	Региональный, национальный	Лесной реестр	Да	Да	Нет
Система 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, метеоданные	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

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакаева З. М., Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И. Прогноз углеродного бюджета лесов Северного Кавказа по модели CBM-CFS // Проблемы региональной экологии. 2009. № 1. С. 51–56.
2. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
3. Быховец С. С., Комаров А. С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. 2002. № 4. С. 443–452.
4. Ведрова Э. Ф. Трансформация растительных остатков в 25-летних культурах основных лесобразующих пород Сибири // Лесоведение. 1995. № 4. С. 13–21.
5. Ведрова Э. Ф. Разложение органического вещества лесных подстилок // Почвоведение. 1997. № 2. С. 216–223.
6. 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.
7. 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.
8. Замолодчиков Д. Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.
9. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Коровин Г. Н. Управление бюджетом углерода лесов Дальнего Востока России: прогнозный анализ по

10. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Коровин Г. Н., Курц В. Оценка и прогноз углеродного бюджета лесов Вологодской области при помощи канадской модели СВМ-CFS // Лесоведение. 2008. № 6. С. 3–14.
11. Замолодчиков Д. Г., Зукерт Н. В., Честных О. В. Подходы к оценке углерода сухостоя в лесах России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 61–71.
12. Замолодчиков Д. Г., Коровин Г. Н., Уткин А.И. и др. Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. М.: КМК, 2005. 212 с.
13. Замолодчиков Д. Г., Коровин Г. Н., Гитарский М. Л. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2007. № 6. С. 23-34.
14. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Краев Г. Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.
15. Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Честных О. В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесобразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. 2003. Вып. 1 (32). С. 119–127.
16. Исаев А. С., Коровин Г. Н., Уткин А. И. и др. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России // Лесоведение. 1993. № 6. С. 3–10.
17. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Официальный русский перевод. ООН, 1997. 27 с.
18. Комаров А., Припутина 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.

19. Кононова М. М. Органическое вещество почвы, его природа, свойства и методы изучения. М.: Наука, 1963. 315 с.

20. Лесной фонд России (по учету на 1 января 2003 года). Справочник. М.: ВНИИЛМ, 2003. 640 с.

21. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2008 гг. Ч. 1. М., 2010. 363 с.

22. Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2009 гг. Ч. 1. М., 2011. 392 с.

23. Рамочная конвенция ООН об изменении климата. Официальный русский перевод. ООН, 1992. 30 с.

24. Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. МГЭИК, 2003.

25. Углерод в экосистемах лесов и болот России / Под ред. В. А. Алексеева и Р. А. Бердси. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 1994. 170 с.

26. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 706 с.

27. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 761 с.

28. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: предельная продуктивность и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 405 с.
29. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии. Методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 635 с.
30. Усольцев В. А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с.
31. Усольцев В. А., Залесов С. В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: УГЛТУ, 2005. 147 с.
32. Ханина Л. Г., Бобровский М. В., Комаров А. С. и др. Моделирование динамики разнообразия лесного напочвенного покрова // Лесоведение. 2006. № 1. С. 70–80.
33. Честных О. В., Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
34. Честных О. В., Лыжин В. А., Кокшарова А. В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
35. Чумаченко С. И., Смирнова О. В. Моделирование развития насаждений в ходе аутогенных сукцессий // Лесоведение. 2009. № 6. С. 3–17.
36. 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.
37. 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.

38. Швиденко А. З., Соколов В. А., Втюрина О. П. и др. Аспекты реализации положений Киотского протокола в Красноярском крае // Организация устойчивого лесопользования в Красноярском крае. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. С. 174–196.
39. Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г., Ваганов Е. А., Нильссон С. Чистая первичная продукция лесных экосистем России: новая оценка // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421. № 6. С. 1–5.
40. Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г., Нильссон С. Оценка запасов древесного детрита в лесах России // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. № 1 (41). С. 133–147.
41. Щепашенко Д. Г., Швиденко А. З., Шалаев В. С. Биологическая продуктивность и бюджет углерода лиственных лесов Северо-Востока России. М.: Московский гос. ун-т леса, 2008. 296 с.
42. 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.
43. 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.
44. Bryan J., Kirkpatrick J. B., Shearman P. L., Ash J. On estimating tropical forest carbon dynamics in Papua New Guinea // Annals of Forest Science. Published online: 01 March 2011. DOI 10.1007/s13595-011-0042-x.
45. 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.
46. Bryan J., Shearman P., Ash J., Kirkpatrick J. B. Estimating rainforest biomass stocks and carbon loss from deforestation and degradation in Papua New

47. 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.

48. Chertov O., Komarov A., Kolström 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.

49. 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.

50. 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.

51. Chumachenko S., Pochinkov S., Kuhkarkina 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.

52. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pages/94> (дата обращения: 5.10.2011)

53. http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/5888.php (дата обращения: 10.09.2011).

54. <http://www.cepl.rssi.ru/carbon.htm> (дата обращения: 10.09.2011).

55. http://www.esa.int/esaEO/SEMWYRCKP6G_index_1.html#subhead1
(дата обращения: 5.10.2011)
56. http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/russian/for_prod_ru.html (дата обращения: 10.09.2011).
57. <http://www.mgul.ac.ru/info/science/spisok/razdone/044.shtml> (дата обращения: 10.09.2011).
58. <http://www.unredd.org/AboutUNREDDProgramme/NationalProgrammes/PapuaNewGuinea/tabid/1026/Default.aspx> (дата обращения: 5.10.2011).
59. 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.
60. Hunt C. Compensating for the costs of reducing deforestation in Papua New Guinea // Pacific Economic Bulletin. 2010. V. 25. № 3. P. 64–88.
61. Isaev A., Korovin G., Zamolodchikov D. et al. Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests // Water, Air and Soil Pollution. 1995. V. 82. P. 247–256.
62. Kindermann G. E., McCallum I., Fritz S., Obersteiner M. A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics // Silva Fennica. 2008. V. 42. № 3. P. 387–396.
63. Kolchugina T. P., Vinson T. S. Carbon sources and sinks in forest biomes of the former Soviet Union // Global Biogeochemical Cycles. 1993. V. 7. № 2. P. 291–304.
64. Kolchugina T. P., Vinson T. S. Equilibrium analysis of carbon pools and fluxes of forest biomes in the former Soviet Union // Canadian Journal of Forest Research. 1993. V. 23. P. 81–88.

65. 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.
66. 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.
67. 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.
68. 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.
69. 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.
70. 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.
71. 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.
72. 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.
73. Kuzyakov Y. V. Tracer studies of carbon translocation by plants from the atmosphere into the soil (a review) // *Eurasian Soil Science*. 2001. V. 34. P. 28–42.
74. 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.

75. Luysaert S., Schulze E.-D., Börner A. et al. Old-growth forests as global carbon sinks // *Nature*. V. 455. P. 213–215.
76. Lynch, J.M., Whipps, J.M. Substrate flow in the rhizosphere // *Plant and Soil*. 1990. V. 129. № 1. P. 1–10.
77. Meng Q., Cieszewski C.J., Madden M., Borders B. A linear mixed-effects model of biomass and volume of trees using Landsat ETM+ images // *Forest Ecology and Management*. 2007. V. 244. № 1–3. P. 93–101.
78. 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.
79. 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.
80. Pan Y., Birdsey R., Fang J. et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests // *Science*. DOI: 10.1126/science.1201609. Published Online 14 July 2011.
81. 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.
82. Quegan S., Beer C., Shvidenko A. et al. Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and Dynamic Global Vegetation Models // *Global Change Biology*. 2011. V. 17. P. 351–365.
83. 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.

84. Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A. et al. A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // *Journal of Land Use Science*. Published online 22 December 2010. 15 p.
85. 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.
86. 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.
87. Shuman J. K., Shugart H. H. Evaluating the sensitivity of Eurasian forest biomass to climate change using a dynamic vegetation model // *Environmental Research Letters*. 2009. V. 4. P. 1–7.
88. Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., Bouloui Yu. Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests // *Ecological Modelling*. 2007. V. 204. P. 163–179.
89. Shvidenko A., Schepaschenko D., Sukhinin A. et al. Carbon Emissions from Forest Fires in Boreal Eurasia between 1998-2010 // *The 5th International Wildland Fire Conference*. Sun City, South Africa 9–13 May 2011. Conference papers. 2011. 11 p.
90. 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.
91. Stolbovoi V., McCallum I. CD-ROM "Land Resources of Russia", International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science, Laxenburg, Austria. 2002.

92. Tan Z.-H., Zhang Y.-P., Schaefer D. et al. An old-growth subtropical Asian evergreen forest as a large carbon sink // *Atmospheric Environment*. 2011. V. 45. № 8. P. 1548–1554.

93. Van Aardt J. A. N, Wynne R. H., Scrivani J. A. Lidar-based mapping of forest volume and biomass by taxonomic group using structurally homogenous segments // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2008. V. 74. № 8. P. 1033–1044.

94. Walker T.S., Bais H.P., Grotewold E., Vivanco J.M. Root exudation and rhizosphere biology // *Plant Physiology*. 2003. V. 132. P. 44–51.