



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

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

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 [11, 15]. 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 годы). 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 [16]. При всей формализации и упрощенности рекомендации МГЭИК сыграли положительную роль в концептуальном и терминологическом согласовании исследовательских подходов независимых научных групп.

Цель настоящей статьи 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. Однако прежде чем приступить к обзору, приведем общую характеристику объекта оценки, т. е. углеродного цикла лесов. Эта характеристика позволит более четко разграничить сферы применимости различных систем.

## Запасы и потоки 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 [16] 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

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



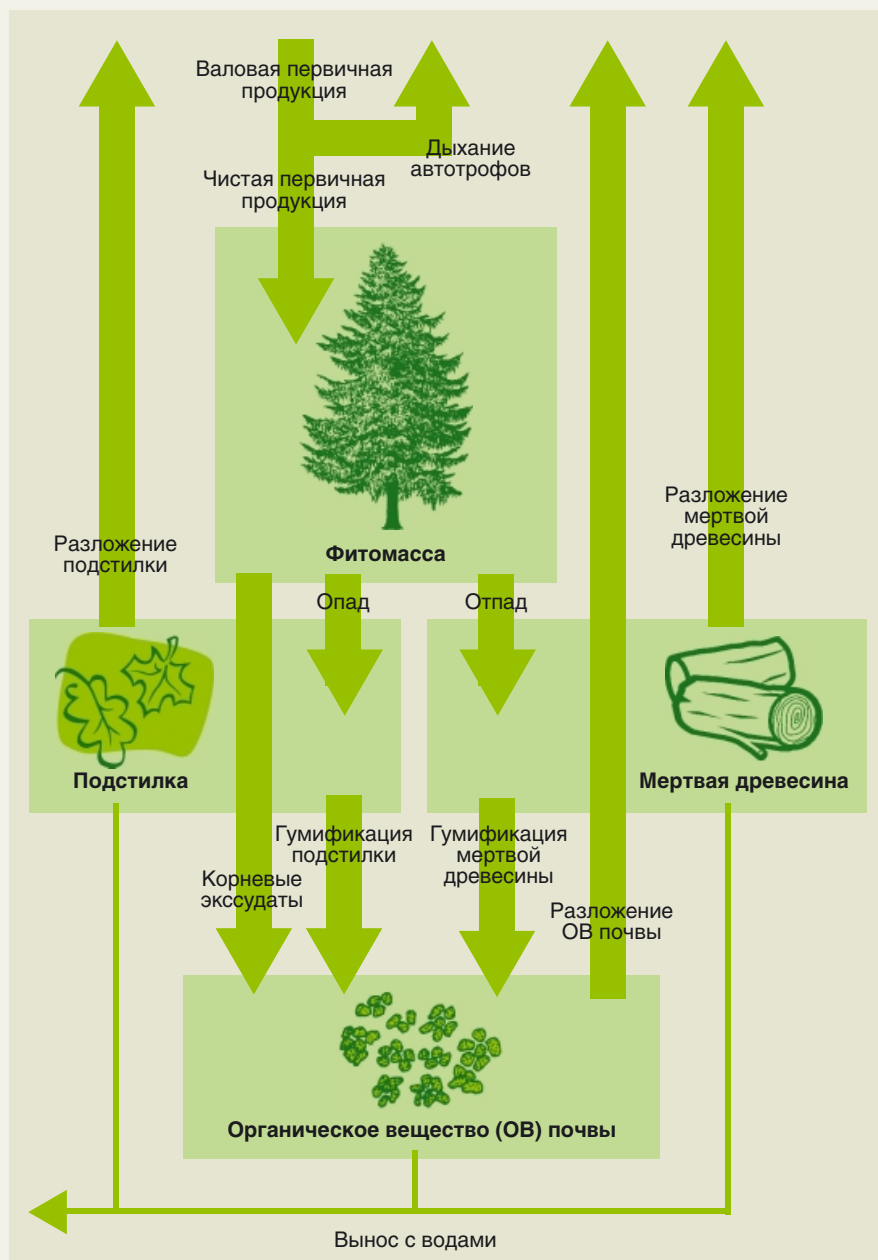


Рис. 1. Схема пулов и потоков углерода в лесной экосистеме

древесину составляют сухой, 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 перувлажнении 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 об-

разовавшегося 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.

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 [2, 3, 12].

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 [39]. 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 [37, 51].

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 [4].

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 существова-

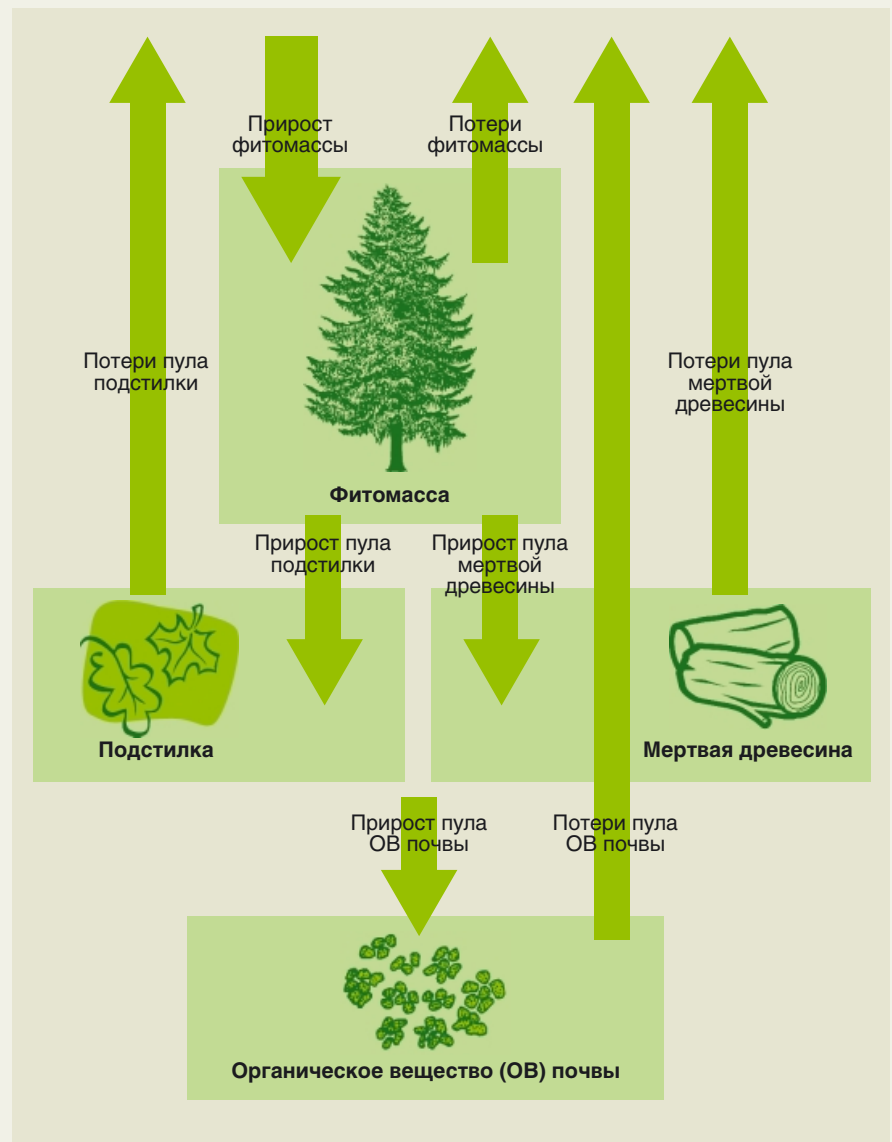


Рис. 2. Схема бюджета углерода лесов на региональном уровне

ния 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 [38, 49].

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 [16] 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.

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.

### 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 достаточно точны, 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 [1]. 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 [18–22]. 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 [35, 36].

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 объемах 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  $t \cdot m^{-3}$ . 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 [6, 10, 17, 33] для расчетов запасов фитомассы лесов России. Имеются примеры его использования и в отношении оценки углерода мертвой древесины [4, 5, 27]. Конверсионный подход в применении к углероду фитомассы лесов рекомендован руководством МГЭИК [16].

Дистанционный подход связан с активным зондированием земной поверхности, осуществляемым при помощи радаров либо лидаров<sup>1</sup>. При активном зондировании значения фитомассы определяются по ослаблению сигнала, отраженного от земной поверхности. К настоящему времени разработаны системы оценки объемных запасов древесины и фитомассы древостоя, ориентированные на использование данных радаров спутников ESR-1, ESR-2, ENVISAT [29, 43], продолжается совершенствование систем интерпретации лидарной съемки [50]. 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 [43] либо моделям [40].

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 [34] либо иррегулярным [45] 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. Дис-

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



танционные 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.

### 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 опирается 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.

#### Интегральная земельная информационная система IIASA

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 [41, 42].

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

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

Система	Организация — головной разработчик	Ключевые авторы
ИЗИС IIASA	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. Замолодчиков
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. Schmuilius
Система оценки состояния лесов Папуа Новой Гвинеи	Университет Папуа Новой Гвинеи (UPNG), Папуа Новая Гвинея	P. Shearman, J. Bryan

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 [44]. 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» [47, 48]. 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 [46]. 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



Рис. 3. Запасы фитомассы в наземных экосистемах России ( $t C \cdot ga^{-1}$ ) согласно ИЗИС IIASA [47]

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).

ИЗИС и ее отдельные компоненты послужили инструментом для проведения большого ряда тематических и региональных работ, в частности оценок чистой первичной продукции лесов России [26], запасов мертвой древесины [27], эмиссий от природных пожаров [47], углеродных бюджетов лесов Красноярского края [25] и северо-восточной части России [28].

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 [32]. 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.

### 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 [31]. 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 дифференци-

ции природно-климатических условий приведено в работе [6].

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 [4, 9]. Запасы углерода в пулах подстилки и почвы оцениваются по сведениям о площадях насаждений лесообразующих пород из ГЛР либо ГУЛФ с применением типовых средних значений [7, 23, 24]. 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  $80 \text{ Mt C} \cdot \text{год}^{-1}$  в 1988 году до  $230\text{--}240 \text{ Mt C} \cdot \text{год}^{-1}$  во второй половине 2000-х годов. Эта тенденция связана с резким сокращением объемов лесопользования, имевшем место в России с начала 1990-х го-

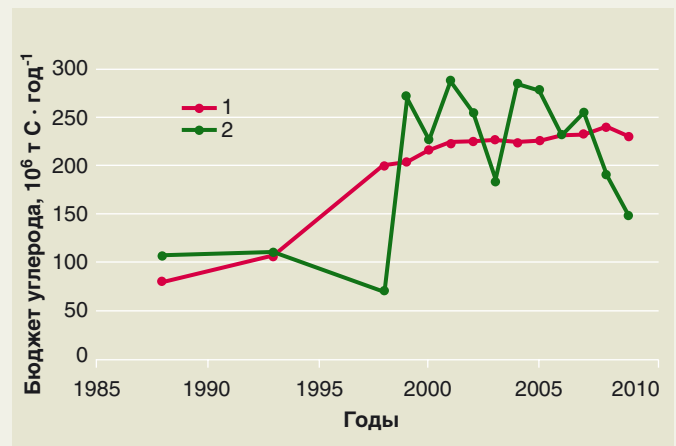


Рис. 4. Динамика углеродного бюджета лесов России согласно системе «РОБУЛ» при оценке масштабов нарушений по площадям вырубок и гарей (1) и по сведениям лесохозяйственной статистики (2) [8]



дов. При расчете с помощью РОБУЛ величины бюджета варьируют от 70 (1998 год) до 287 (2001 год) Мт С · год<sup>-1</sup>, что связано с влиянием пожаров. Тенденция к повышению стока углерода с конца 1990-х годов прослеживается и в этом случае.

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 Тыва 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.

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 [13, 14], ежегодно предоставляемых Российской Федерацией

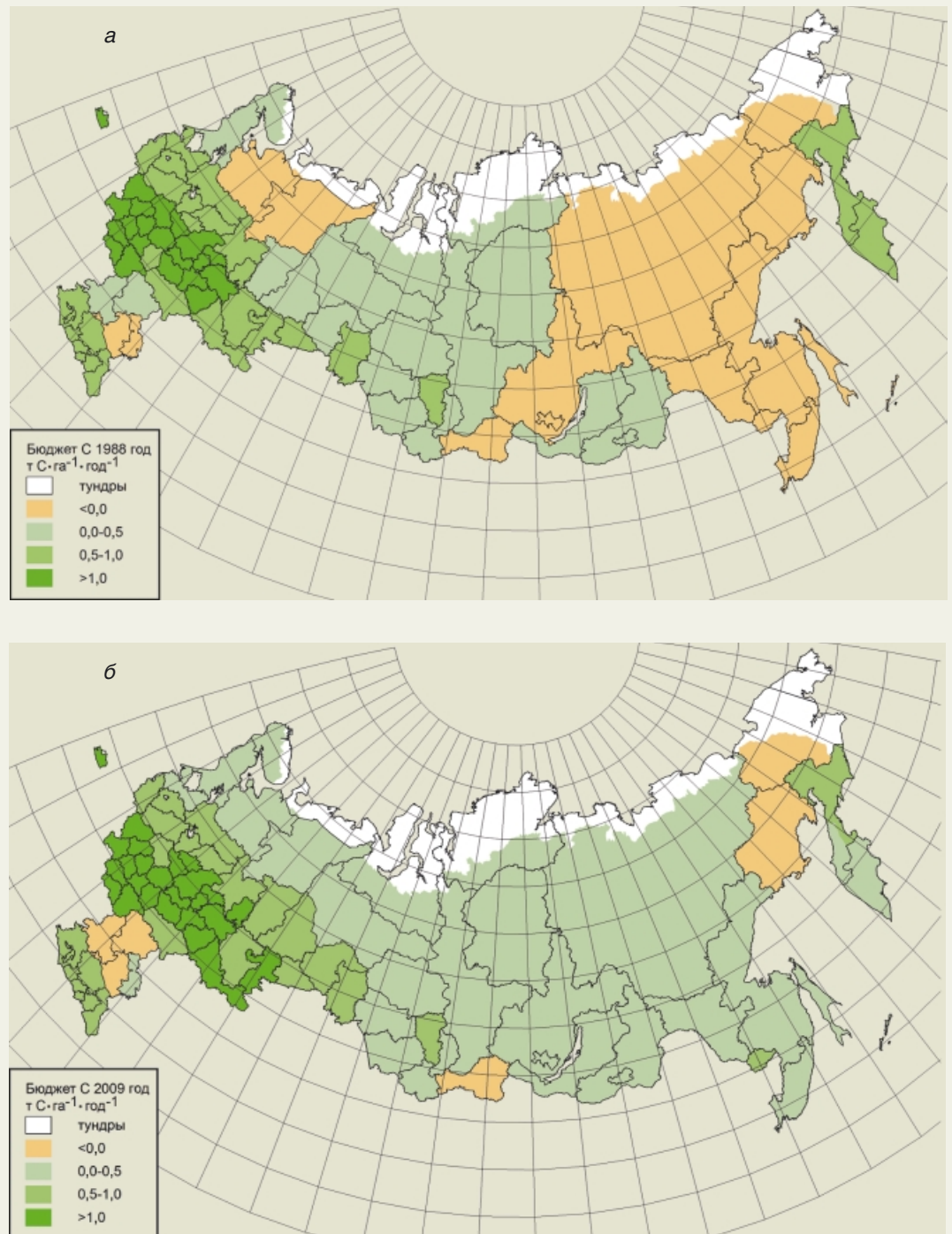


Рис. 5. Распределение средних величин бюджета углерода лесов по субъектам Российской Федерации в 1988 (а) и 2009 (б) годах согласно системе «РОБУЛ» [8]



в органы РКИК ООН и потому доступные на сайте этой конвенции [30]. 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 [16].

Резюмируя, систему «РОБУЛ» следует охарактеризовать как конверсионно-картографическую, построенную на основе региональной схемы баланса потоков углерода (согласно рис. 2). Специфическая черта системы — возмож-

ность 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.

Продолжение следует



## ЛИТЕРАТУРА

1. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
2. Ведрова Э. Ф. Трансформация растительных остатков в 25-летних культурах основных лесообразующих пород Сибири // Лесоведение. 1995. № 4. С. 13–21.
3. Ведрова Э. Ф. Разложение органического вещества лесных подстилок // Почвоведение. 1997. № 2. С. 216–223.
4. Замолодчиков Д. Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.
5. Замолодчиков Д. Г., Зукерт Н. В., Честных О. В. Подходы к оценке углерода сухостоя в лесах России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 61–71.
6. Замолодчиков Д. Г., Коровин Г. Н., Уткин А. И. и др. Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. М.: КМК, 2005. 212 с.
7. Замолодчиков Д. Г., Коровин Г. Н., Гитарский М. Л. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение. 2007. № 6. С. 23–34.
8. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Краев Г. Н. Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.
9. Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Честных О. В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесообразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. 2003. Вып. 1 (32). С. 119–127.
10. 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.
11. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Официальный русский перевод. ООН, 1997. 27 с.
12. Кононова М. М. Органическое вещество почвы, его природа, свойства и методы изучения. М.: Наука, 1963. 315 с.
13. 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.
14. 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.
15. Рамочная конвенция ООН об изменении климата. Официальный русский перевод. ООН, 1992. 30 с.
16. Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. МГЭИК, 2003.
17. 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.
18. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 706 с.
19. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 761 с.
20. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: предельная продуктивность и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 405 с.
21. Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии. Методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 635 с.
22. Усольцев В. А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 570 с.
23. 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.
24. Честных О. В., Лыжин В. А., Кокишарова А. В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
25. 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.
26. Швиденко А. З., Шеняченко 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.
27. Швиденко А. З., Шеняченко Д. Г., Нильссон С. Оценка запасов древесного детрита в лесах России // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. № 1 (41). С. 133–147.
28. Шеняченко Д. Г., Швиденко А. З., Шалаев В. С. Биологическая продуктивность и бюджет углерода лиственных лесов Северо-Востока России. М.: МГУЛ, 2008. 296 с.
29. Cartus O., Santoro M., Schmullius 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.
30. [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/5888.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/5888.php) (дата обращения: 10.09.2011).
31. <http://www.cepl.rssi.ru/carbon.htm> (дата обращения: 10.09.2011).
32. [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).
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. Kuzakov 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.
38. Luyssaert S., Schulze E.-D., Börner A. et al. Old-growth forests as global carbon sinks // Nature. V. 455. P. 213–215.
39. Lynch J. M., Whipps J. M. Substrate flow in the rhizosphere // Plant and Soil. 1990. V. 129. № 1. P. 1–10.
40. Meng Q., Cieszewski C. J., Madden B., 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.
41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., Boulou Yu. Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests // Ecological Modelling. 2007. V. 204. P. 163–179.
47. 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.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. Walker T. S., Bais H. P., Grotewold E., Vivanco J. M. Root exudation and rhizosphere biology // Plant Physiology. 2003. V. 132. P. 44–51.