

МОДИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РОБУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА ЛЕСОВ РОССИИ

М.Д. Корзухин, В.Н. Коротков*

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, 20Б; **mdkorz@gmail.com*

Реферат. Расчет углеродного баланса лесов необходим для корректной оценки их экологических функций, а также для выполнения обязательств Российской Федерации по Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК ООН). Для расчета углеродного баланса лесов в Национальном кадастре парниковых газов используется компьютерная программа «Региональная оценка бюджета углерода лесов» (РОБУЛ), разработанная Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. Цель предлагаемой статьи – оценить корректность допущений и алгоритмов, принятых в РОБУЛ, и предложить некоторые усовершенствования для уточнения оценки углеродного баланса лесов: – использование гладкой кривой хода роста пород; – учет вклада перестойных лесов; – использование уточненных значений конверсионных коэффициентов [запас древесины – углерод]. Попутно обсуждается качество отчетных данных, используемых в расчетах. Выполнены оценки углеродного баланса лесов с использованием исходной версии программы РОБУЛ и ее модификаций. Сравнение не выявило значимых различий в оценках поглощения углерода. Региональные значения нетто-поглощения углерода лесами в пересчете на единицу площади сопоставимы с оценками этого показателя для стран со сходными природно-климатическими условиями. Предложенные усовершенствования программы РОБУЛ позволили уточнить оценку углеродного баланса лесов России.

Ключевые слова. Углеродный баланс, фитомасса, леса России, парниковые газы, лесной фонд, кривая хода роста, государственный лесной реестр, РОБУЛ.

MODIFICATION OF THE ROBUL MODEL FOR ACCOUNTING THE CARBON BALANCE OF RUSSIAN FORESTS

M.D. Korzukhin, V.N. Korotkov*

Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russia; **mdkorz@gmail.com*

Abstract. Calculating the carbon balance of forests is necessary for correct estimation of their ecological functions as well as for the fulfillment of the obligations of the Russian Federation under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). The computer program "Regional

Assessment of Forest Carbon Budget" (ROBUL) developed by the Center for Ecology and Productivity of Forests of the Russian Academy of Sciences is used for calculations of the carbon balance of forests in the national greenhouse gas inventories. The objective of the proposed article is to evaluate the correctness of the assumptions and algorithms adopted in ROBUL and to propose some improvements to refine the estimation of the carbon balance of forests: – the use of a smooth curve of tree growth; – accounting for the contribution of over-mature forests; – the use of refined values of conversion coefficients [growing stock - carbon]. The paper also discusses the quality of State Forest Register data that are used in calculations. Assessments of the carbon balance of forests have been carried out using the original version of the ROBUL and its modification. The comparison has not revealed significant differences of estimates of the carbon uptake. Regional values of forest carbon balance per unit area are comparable with estimates of this indicator for countries with similar climatic conditions. The proposed improvements to the ROBUL make it possible to clarify the assessment of the carbon balance of Russian forests.

Keywords. Carbon balance, forest of Russia, greenhouse gases, Forest Fund, State forest registry, ROBUL.

Введение

Состояние глобального климата зависит, в частности, от деятельности человека, результатом которой является обогащение атмосферы парниковыми газами. Основная причина современного глобального потепления – антропогенные выбросы углекислого газа, CO_2 . Эти выбросы имеют abiогенную и биогенную природу. Среди последних основная роль в эмиссии или поглощении CO_2 принадлежит лесам, которые (без учета резервных лесов) компенсировали в 2016 г. 25% антропогенных выбросов парниковых газов (без учета сектора «Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство») (Национальный..., 2018).

В соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), Российская Федерация разрабатывает и ежегодно публикует «Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями всех парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом» (Национальный..., 2018). Начиная с 2010 г. для расчета углеродного баланса лесных земель в Национальном кадастре парниковых газов используется программа «Региональная оценка бюджета углерода лесов» (РОБУЛ), разработанная Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (Замолодчиков и др., 2011, 2013).

Следуя соображениям о желательных коррекциях алгоритма, естественно накопившихся в ходе применения РОБУЛ, мы в течение последнего года ввели в программу определенные изменения. Общая цель настоящей статьи – верификация официального метода оценки годового поглощения CO_2 лесами России как необходимой составляющей оценки влияния выбросов углекислого газа с территории России на глобальный климат. В рамках достижения

этой цели мы оценим корректность алгоритма РОБУЛ и предложим некоторые усовершенствования, которые будут оправданы до тех пор, пока РОБУЛ будет использоваться для расчета углеродного баланса лесов в Национальном кадастре парниковых газов. Результаты этих усилий, вместе с сопутствующими соображениями о качестве исходных данных и желательном развитии расчетов для Национального кадастра парниковых газов и составляют предмет данного исследования.

1. Исходные обозначения и понятия

Согласно руководящим указаниям Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (Руководящие указания..., 2003; Руководящие принципы..., 2007) ежегодные изменения запасов углерода рассчитываются как сумма изменений в углеродных пулах: M – фитомасса древостоя (равна сумме надземной и подземной фитомасс, $M = M_{\text{above}} + M_{\text{below}}$; D – дебрис; L – подстилка; S – почва (органическое вещество).

Цикл углерода включает в себя изменения запасов углерода, связанные как с непрерывными процессами (рост и опад фитомассы, разложение мертвого органического вещества), так и с дискретными событиями (нарушениями растительного покрова – пожары, нашествия насекомых, лесозаготовки, изменения в землепользовании и др.). Выбросы CO_2 от нарушений могут происходить длительное время, как, например, разложение поваленных ветром или сгоревших при пожаре деревьев. Для упрощения принимается, что все выбросы, произошедшие после нарушений, оцениваются в год нарушения.

Для оценки изменений запасов углерода в каждом пуле существуют два различных, но методически одинаково верных подхода МГЭИК (Руководящие указания..., 2003; Руководящие принципы..., 2007).

А) Метод баланса потоков, при котором ежегодное изменение запаса углерода находится как алгебраическая сумма притоков и потерь данного года, что для пула k записывается как

$$\Delta C_k = C_{Ik} - C_{Lk}, \quad (1)$$

где ΔC_k – изменение запаса углерода в пуле k , т С год⁻¹;

C_{Ik} – сумма притоков углерода, т С год⁻¹;

C_{Lk} – сумма потерь углерода, т С год⁻¹.

В) Метод, при котором для пула находится разность запасов углерода в соседние моменты времени t_1, t_2 :

$$\Delta C_k = C_k(t_2) - C_k(t_1). \quad (2)$$

2. Исходная схема расчета баланса в РОБУЛе, свойства, недостатки

Расчет баланса C в алгоритме РОБУЛа, строго говоря, не следует ни одному из двух "методов МГЭИК", но содержит элементы "метода А". Основное сходство заключается в одномоментности алгоритма, т. е. в использова-

нии данных, относящихся к одному моменту времени. Кратко алгоритм описан в (Замолодчиков и др., 2011; Алферов и др., 2017), однако, к сожалению, описание алгоритма не является исчерпывающим.

Для каждой преобладающей породы деревьев отчетные данные государственного лесного реестра (ГЛР) содержат величины V_k , м³ – абсолютный запас древесины территориальной единицы (лесничество, субъект РФ), и S_k , га – площади, $k = 1, \dots, 6$ – номер группы возраста $G_1..G_6$ (молодняки 1-го класса, молодняки 2-го класса, средневозрастные, приспевающие, спелые, перестойные), что позволяет найти значения удельных запасов W , м³ га⁻¹ (дискретную кривую хода роста по запасу, КХР):

$$W_k = V_k/S_k. \quad (3)$$

Значения W_k переводятся в углеродные единицы фитомассы M_k , т С га⁻¹ (кривую хода роста по углероду) с помощью заданной таблицы конверсионных коэффициентов K_{WMk} , т С м⁻³ [запас → углерод фитомассы]:

$$M_k = K_{WMk} \cdot W_k. \quad (4)$$

При расчетах, выполняемых для Национального кадастра парниковых газов (Национальный..., 2016, 2018), алгоритм РОБУЛ из всех физически возможных потоков в явном виде использует только два – потери от пожаров (LossF) и от рубок (LossC), рассчитываемых по отчетным данным ГЛР на основе площадей гарей и вырубок с учетом времени их зарастания. Алгоритм прямо вычисляет содержание пулов и приращений углерода в них (δ [имя пула]), минуя нахождение потоков между пулами:

- величины M_k находятся по данным ГЛР о запасах следуя уравнению (4);
- δM_k находятся по величинам M_k (фактически – дифференцированием углеродной кривой хода роста M_k , впервые предложено, по-видимому, в работе (Исаев и др., 1993);
- D_k , т С га⁻¹ – по таблице безразмерных коэффициентов K_{MDk} [фитомасса → дебрис]:

$$D_k = K_{MDk} \cdot M_k; \quad (5)$$

- δD_k – дифференцированием полученной кривой хода роста дебриса D_k ;
- пулы L_k , S_k заданы таблично (зависят от породы, возраста и региона) и от текущих отчетных данных не зависят; дифференцирование зависимостей L_k , S_k по возрасту дает возможность найти δL_k , δS_k .

Исходно расчет ведется для удельных значений в пересчете на 1 га, затем результат умножается на площадь, занимаемую преобладающей породой. Таким образом, алгоритм во многом основан на регрессионных зависимостях; три "физических" вычисления – это нахождение δM_k , δD_k и вычитание потерь от рубок и пожаров (рис. 1). Итоговый баланс углерода для насаждений данной породы (NBP – Net Biome Production) находится как

$$NBP = \Sigma(\delta M_k + \delta D_k + \delta L_k + \delta S_k - \text{LossF}_k - \text{LossC}_k). \quad (6)$$

Баланс для территории находится суммированием по всем представленным породам.

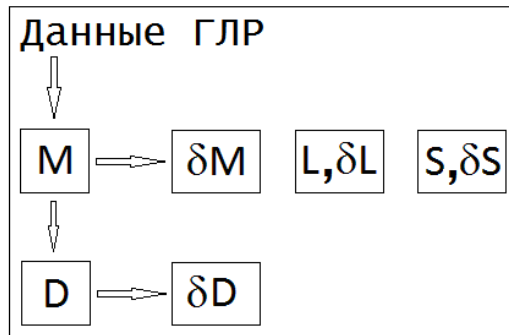


Рисунок 1. Схема расчета по алгоритму РОБУЛ. → – расчет содержания и приращения углерода в пулах по КХР и таблицам параметров

Пулы (содержание углерода): M – фитомасса, D – дробис, L – подстилка, S – почва; приращения углерода в пулах: δ [имя пула]. Сумма приращений равна NEP

Рассмотрим соответствие переменных РОБУЛа и переменных, традиционно используемых при описании баланса углерода. Стандартная последовательность нахождения потоков углерода в экосистеме от фотосинтеза листа до баланса на уровне биома в простейшем варианте выглядит следующим образом (напр., Инсаров и др., 2012):

$$\begin{aligned}
 GPP & \quad \text{– приток углерода в систему (фотосинтез)} \\
 NPP = GPP - Ra; & \quad \text{(чистая первичная продукция)} \\
 NEP = NPP - Rh; & \quad \text{(чистая экосистемная продукция)} \quad (7) \\
 NBP = NEP - LossF - LossC & \quad \text{(чистая биомная продукция = бюджет углерода).}
 \end{aligned}$$

Здесь GPP – Gross Primary Production, NPP – Net Primary Production, NEP – Net Ecosystem Production, NBP – Net Biome Production, Ra и Rh – авто- и гетеротрофное дыхание. Сопоставление формул (6) и (7) для NBP показывает, что должно выполняться равенство

$$GPP - Ra - Rh = \Sigma(\delta M_k + \delta D_k + \delta L_k + \delta S_k). \quad (8)$$

Отсюда видно, что переменные GPP , NPP , Ra и Rh в РОБУЛе прямых аналогов не имеют и в рамках алгоритма РОБУЛ найдены быть не могут.

3. Возможные улучшения алгоритма

Технические ошибки алгоритма были исправлены при освоении программы (в процессе ее переписывания с Excel на Delphi). Ниже отмечены сколь угодно существенные на наш взгляд проблемы и модификации алгоритма.

1. Учет вклада перестойных древостоев. Введены два возрастных класса для группы возраста G_6 (экспертная рекомендация Г.Н. Коровина): группа "перестойные" не имеет верхнего возрастного предела и один класс возраста для нее заведомо мал.

2. Алгоритм настроен на обсчет пяти типов земель земельного фонда, два из которых являются суммами первых трех единичных типов:

- защитные;
- эксплуатационные;
- резервные;
- управляемые = защитные+эксплуатационные;
- суммарные = защитные+эксплуатационные+резервные.

Для обсчета управляемых и суммарных земель исходный алгоритм сначала суммирует площади и запасы, затем вычисляет по ним удельные запасы, служащие основой для определения δM и δD . Результат, очевидно, не будет совпадать при обсчете единичных земель по отдельности с последующим суммированием. Возникающая ошибка невелика и в настоящий момент не исправлена.

3. При нахождении приростов δL , δS для группы возраста G_1 исходный алгоритм принимает нулевую величину интервала возрастного класса, соответствующего не облесенным землям, $a_{c0} = 0$. Ясно, что время возобновления леса конечно, и мы приняли его естественную оценку в виде:

$$a_{c0} = \text{Reforestation Time Aver} = (\tau_C + \tau_B)/2 \quad (9)$$

(характерные времена возобновления леса после рубок, τ_C , и пожаров τ_B , входят в состав справочных баз данных РОБУЛ; эти времена были найдены Г.Н. Коровиным с сотрудниками обработкой отчетных данных по вырубкам и гарям, и литературным данным).

4. В отчетных данных ГЛР присутствуют данные по 66 древесным породам. Для расчетов по РОБУЛу используются данные по 12 первоначальным древесным породам (сосна, ель, пихта, лиственница, сосна кедровая, можжевельник, дуб высокоствольный, дуб низкоствольный, каменная береза, береза, осина, кедровый стланик); остальные 54 породы агрегируются в четыре группы (прочие твердолиственные, прочие мягколиственные, прочие породы, прочие кустарники). Помимо агрегирования по породам, алгоритм РОБУЛа использует агрегирование по группам возраста. В обоих случаях проблема состоит в том, что одна порода может быть представлена несколькими записями в исходном банке данных ГЛР с разными возрастными интервалами групп возраста (записи различаются разными кодами и возрастными рубки – эти два параметра задают размеры интервалов). При агрегировании алгоритм РОБУЛ прямо складывает запасы и площади по группам, интервалы возрастов которых не совпадают, что, конечно, искажает истинные суммарные величины. Недостаток алгоритма в настоящий момент не исправлен.

5. Существенно, что W_k – это возрастные распределения, измеренные в некоторый момент времени, а не собственно кривые хода роста (развитие во времени). Находить непосредственно по ним прирост фитомассы можно только при принятии "эргодической гипотезы": значения W_k , измеренные на разных площадях в некоторый момент времени, дают разумную оценку развития древостоя с возрастом k (Карев, 2001). С этим связан технический недостаток данных, используемых в РОБУЛе: эмпирическим величинам W_k

свойственно отсутствие данных в некоторых группах, немонотонность по возрасту и очевидный измерительный "шум". В результате, расчет прироста запасов δM_k ведется не по гладким КХР, но путем нахождения скользящих средних по 3-м точкам удельных запасов в соседних группах возраста. При нулевом значении в группе G_k , $W_k = 0$, W_k заменяется на как-то найденное среднее значение для данной породы.

С принятой нами точки зрения единственная допустимая немонотонность – это падение W_k в старших возрастах (для спелых и перестойных древостоев – групп G_5, G_6), объясняемое реальными и разнообразными экологическими механизмами, т.е. ситуация, когда

$$W_4 > W_5 > W_6; W_5 > W_6. \quad (10)$$

Проблемы измерительного "шума" снимаются использованием гладкой функции роста, интерполирующей возрастное распределение W_k . Один из возможных вариантов интерполяции путем применения физически интерпретируемой модели описан в (Корзухин, 2018). Модель имеет вид двух динамических уравнений и развивает широко известную базовую модель роста Берталанфи (Bertalanffy, 1957); единица времени – 1 год:

$$dW_1 / dt = p_2 \exp(-p_3 W_2^{p_4}) W_1^{p_4} - p_5 W_1 - p_6 W_1; \quad (11a)$$

$$dW_2 / dt = p_2 W_2^{p_4} + p_5 W_1 - p_7 W_2 \quad (11б)$$

Здесь W_1, W_2 – удельные запасы младшей и старшей когорты, на которые разбито все насаждение ($W(t) = W_1(t) + W_2(t)$); p_k – параметры, в числе которых начальное условие $p_1 = W_1(0), W_2(0) \equiv 0$. Первые два слагаемых равны приросту запаса каждой когорты, который пропорционален листовым поверхностям $W_1^{p_4}, W_2^{p_4}$; множитель с экспонентой описывает подавление роста младшей когорты старшей путем поглощения света; слагаемое $p_5 W_1$ описывает демографический переход из младшей когорты в старшую; слагаемые $p_6 W_1, p_7 W_2$ – потери углерода (в единицах запаса) на дыхание и гибель деревьев в каждой когорте. Отличие модели (11) от имеющихся в литературе – способность описывать гладкими кривыми немонотонные возрастные распределения; для сравнения – в моделях роста (Kurz, Apps, 1999) – модель СВМ, и (Shvidenko et al., 2007) используется эмпирически введенное экспоненциальное уменьшение $W(t)$. Примеры интерполяции приведены на рисунке 2а, б.

4. Замечания о данных ГУЛФ-ГЛР

Качество исходных данных критически важно для получения адекватных результатов, однако ввиду размеров территории, занятой лесами, оно недоступно прямой инструментальной проверке; для их оценки исследователь вынужден прибегать к различным косвенным приемам. В связи с отсутствием данных государственной инвентаризации лесов (ГИЛ) в расчетах углеродного баланса лесов сегодня применяются сведения о количественных и качествен-

ных характеристиках лесов, содержащиеся в ГЛР. Источником этой информации служат, в частности, материалы лесоинвентаризации и лесоустройства 20-ти и более летней давности. Согласно одной из экспертных оценок (Ю.Н. Гагарин, устное сообщение), после 15-ти лет с момента таксации лесного насаждения вероятность сохранения того или иного признака, характеризующего древостой, составляет не более 40%. Критические замечания о качестве данных ГЛР высказывают также Швиденко, Щепашенко (2014) и Филипчук и др. (2016).

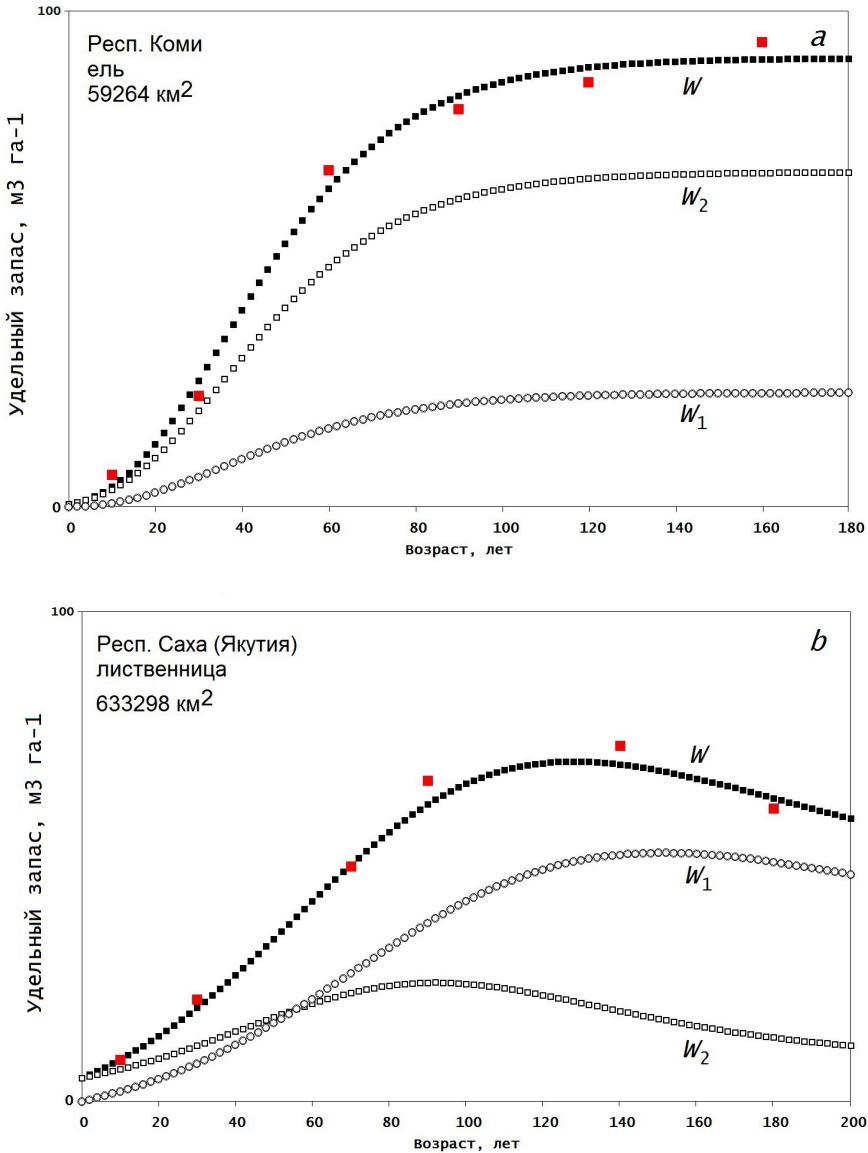


Рисунок 2. Примеры (a, b) интерполяции данных ГЛР по шести точкам (удельные запасы в группах возраста – ■) моделью (11). ◊ – W_1 , □ – W_2 , ■ – суммарный запас $W = W_1 + W_2$

Как нам представляется, мнение о тотальной недостоверности редко изменяемых параметров несправедливо, и оценка ситуации требует дифференцированного взгляда, учитывающего специфику измеряемого параметра и цель его использования.

4.1. Неподвижность возрастных распределений

В публикациях (Коровин и др., 2012 а, б) приведены графики возрастных распределений крупных лесных единиц (напр., "хвойные леса Европейской части РФ", "мягколиственные леса РФ"), а также, выборочно – нескольких пород (напр., "береза каменная"). Временной промежуток наблюдений – 20 лет, интервал – 5 лет, т.е. приведено по 5 кривых. Примеры распределений даны на рисунке 3.

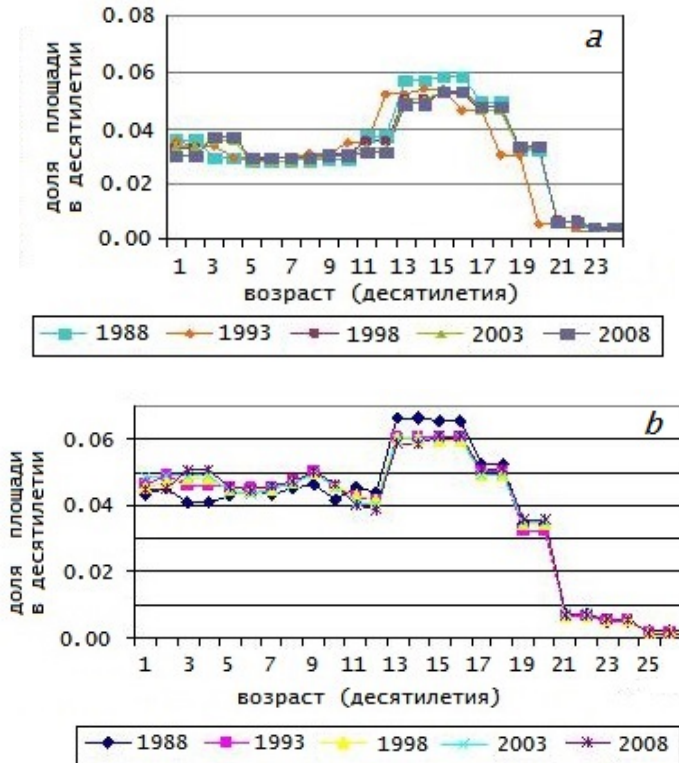


Рисунок 3. Возрастная структура а – хвойных лесов РФ, и б – всех лесов Азиатской части РФ за 1988-2008 гг. (отчетные данные ГУЛФ)

Основное свойство этих и всех остальных возрастных распределений – практическая их “неподвижность”, т.е. отсутствие динамики; все изменения, кроме некоторого падения значений в пиках, выглядят просто измерительным шумом. В то же время очевидно, что за 20 лет распределения 1988 г. должны были сместиться вправо (“повзрослеть”) на 20 лет, немного уменьшившись в значениях за счет рубок и пожаров. Несмотря на заголовок раздела книги "Анализ динамики возрастной структуры лесов", объяснения неподвижности не приведено (принято, правда, типичное для лесной литературы неправиль-

ное словоупотребление – "динамикой" называют одномоментные возрастные распределения). Можно предложить только одно объяснение этому эффекту – на низовом уровне (лесничество) отчетные данные просто переписываются из года в год. В любом случае, их использование для любых задач исследования динамики невозможно, это касается, в том числе, расчета балансов прироста и потерь углерода "методом В" МГЭИК.

4.2. Оценка качества измерения запасов путем расчета LAI

В работе (Грабовский и др., 2015) данные ГЛР за 2007 год были использованы для вычисления индекса листовой поверхности лесов (Leaf Area Index – LAI, $\text{м}^2 \text{м}^{-2}$) на всей территории лесов РФ. Расчет LAI основывался двойным применением конверсионных коэффициентов:

$K_{\text{store-leaf}}$ т м^{-3} «запас древесины → фитомасса листвы», по данным (Замолодчиков и др., 2003),

SLA (Specific Leaf Area), $\text{см}^2 \text{г}^{-1}$ «фитомасса листвы → удельная проекционная листовая поверхность, LAI», по данным (Уткин и др., 2008).

Полученные величины LAI (рисунок 4) близки к оценкам, найденным наземными и дистанционными методами (сводку по 18 литературным источникам см. в (Грабовский и др., 2015). Поскольку точность параметров $K_{\text{store-leaf}}$ и SLA сомнений не вызывает, близость оценок LAI говорит о разумной точности по крайней мере суммарных запасов и площадей преобладающих пород (оба показателя участвовали в нахождении LAI). Нет сомнений в том, что отчетные данные за другие годы дали бы близкий результат.

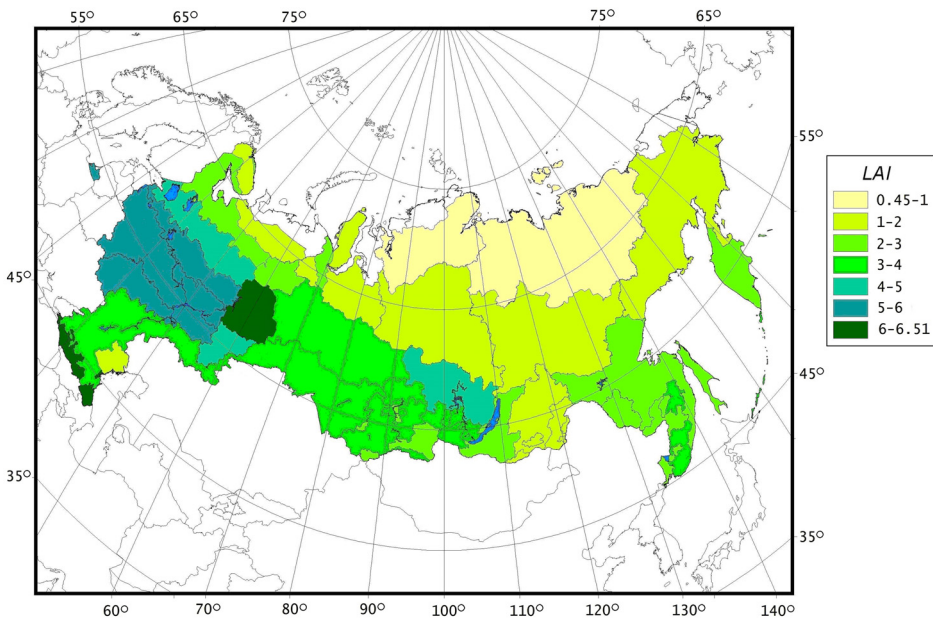


Рисунок 4. Летние значения LAI для 31 лесного района РФ, найденные с помощью конверсионных коэффициентов «запас древесины → LAI» (Замолодчиков и др., 2003; Уткин и др., 2008)

4.3 Площади молодняков I группы возраста, рубок и гарей

Можно провести некоторое частное сравнение внутри самого корпуса данных ГЛР. Из физических соображений ясно, что площади первого года молодняков I класса возникают за счет зарастания старшего года вырубок и гарей, S_C , S_B соответственно; (с отчетной точки зрения это соответствует переводу земель из необлесенных в облесенные). И те, и другие площади содержатся в отчетных данных ГЛР. Площадь годовой когорты молодняков I класса, s_{JUV} , находится делением их полной площади, S_{JUV} , на размер возрастного класса рассматриваемой породы, ac :

$$s_{JUV} = S_{JUV}/ac, \quad (12)$$

а площади годовых когорт для вырубок и гарей (т.е. площади рубок, s_C , и пожаров, s_B) – делением площади вырубок и гарей на их характерные времена зарастания:

$$s_C = S_C/\tau_C; \quad (13)$$

$$s_B = S_B/\tau_B. \quad (14)$$

Удобно ввести суммарную годовую площадь рубок и пожаров

$$s_{CB} = s_C + s_B. \quad (15)$$

Таким образом, сравнению подлежат две величины

$$s_{JUV} \sim s_{CB}. \quad (16)$$

Величины s_{JUV} для каждого Субъекта РФ равны сумме по всем представленным породам; для РФ в целом $s_{JUV} \sim 3.5 \times 10^6$ га, а $s_{CB} \sim 2.8 \times 10^6$ га. В случае их равенства они должны располагаться на диагонали 1:1 соответствующего графика с некоторым ожидаемым измерительным шумом. Взгляд на построенный рис. 5 говорит о том, что имеется сильное систематическое превышение площади s_{JUV} над s_{CB} по Субъектам РФ, в среднем примерно в 2-2.5 раза. (Напомним, что в настоящее время расчеты для Доклада используют среднескользящие величины площади вырубок и гарей, так что наблюдаемый разброс точек это, скорее всего, устойчивое систематическое явление).

В абсолютных единицах разброс точек очень велик – отношение

$$\beta = s_{JUV}/s_{CB} \quad (17)$$

меняется от 0.057 для Краснодарского края до 25 для Респ. Калмыкия.

Причина сильного несоответствия достоверно неизвестна, но, скорее всего, лежит в сильном занижении данными ГЛР значений площадей пожаров. Это предположение соответствует устойчивому экспертному мнению, напр.: «официальные данные относятся только к так называемой «активно охраняемой территории лесного фонда» и занижают фактические площади пожаров в 5–7 раз» (Швиденко и др., 2011). В работе (Bartalev et al., 2012) площадь, пройденную лесными пожарами в 2005-2011 гг., оценили в 5.8 млн га

год⁻¹, что втрое больше отчетного значения. Еще одной причиной несоответствия может быть завышение характерных времен зарастания вырубок и гарей. Ситуация требует специального анализа.

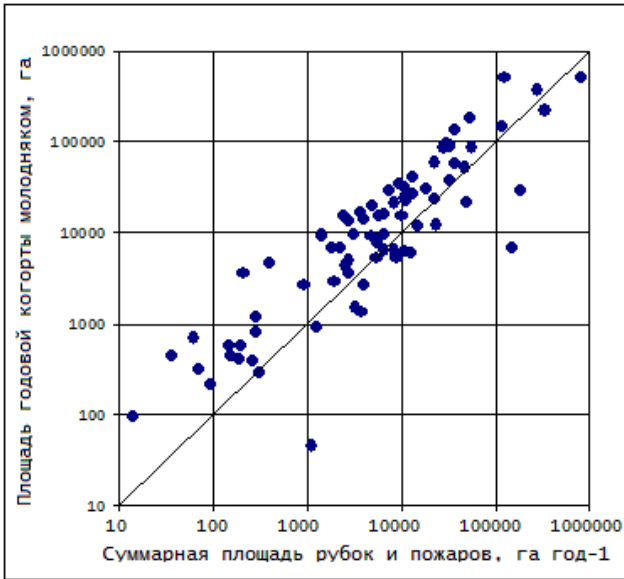


Рисунок 5. Сравнение данных ГЛР по молоднякам, рубкам и пожарам (подробности см. в тексте)

4.4. Сравнение максимальных запасов для сосны (*Pinus*)

Цель сравнения – оценка качества данных ГЛР. Нам неизвестна (возможно, и предпринимаемая) попытка систематического сравнения данных по удельным запасам ГЛР с модальными ТХР. Ниже, в качестве первого оценочного шага, в табл. 1 даются результаты выборочного сравнения максимальных запасов *Pinus* по данным ГЛР 2014 г. в зоне таежных лесов на некоторых территориях Европейской части РФ с двумя литературными источниками (Усольцев, 2002; Швиденко и др., 2008). По существу вопроса, из работ (Усольцев, 2002; Швиденко и др., 2008) были использованы только модальные КХР. Находились средние арифметические M_{max} , м³ га⁻¹ – максимума запаса, достигаемого в каком-либо возрасте по всем представленным бонитетам; использованные нами данные ГЛР бонитетов не содержат (т.е. они уже фактически усреднены по бонитетам), и бралось максимальное значение, достигаемое интерполирующей КХР, построенной по этим данным (см. выше описание процедуры интерполяции).

Будучи, конечно, далеким от статистических стандартов обработки данных, это полуколичественное сравнение показывает, что нет сильных отклонений в данных между тремя источниками (Усольцев, 2002; Швиденко и др., 2008; данные ГЛР на 01.01.2014). Маловероятно, чтобы данные по другим массовым породам показали бы сильные различия. Наш вывод таков, что максимальные запасы пород, даваемые ГЛР, разумно совпадают со значениями, даваемыми ТХР.

Таблица 1. Выборка максимальных запасов *Pinus* по трем источникам для трех макрорегионов Европейской территории РФ (ЕТР)

<i>M</i> _{max} , м ³ га ⁻¹	Расположение	Источник данных
171	Северная часть ЕТР Архангельская, Карелия, Коми	ГЛР на 01.01.2014 г.
164	Ленинградская обл. Северная тайга Карелия, Мурманская обл.	Усольцев, 2002
207		Усольцев, 2002
206		Швиденко и др., 2008
225	Тверская, Псковская, Смоленская обл.	ГЛР, на 01.01.2014 г.
265	Западная часть ЕТР Северная и средняя тайга	Швиденко и др., 2008
261		Усольцев, 2002
263		
273	Владимирская, Калужская, Московская, Нижегородская обл.	ГЛР, на 01.01.2014 г.
240	Центральная часть ЕТР Южная тайга, смеш. и листв. Леса	Усольцев, 2002
239		Швиденко и др., 2008
240		

Примечание. Полу жирным выделены средние данные по макрорегионам (по: Усольцев, 2002; Швиденко и др., 2008)

Нам представляется, что качество данных ГЛР позволят рассчитывать на разумность результатов их применения. Улучшение качества несомненно возможно, однако их использование неизбежно до появления более современной альтернативы.

5. Результаты расчета компонентов баланса *C* и их сравнение с исходным вариантом РОБУЛ

Полученные интерполирующие КХР (по данным ГЛР по состоянию на 01.01.2014, 1326 штук) были использованы при расчетах углеродного баланса лесов по модифицированной программе РОБУЛ-М.

Центральными параметрами расчета являются конверсионные коэффициенты [запас древесины - углерод] (Замолотчиков и др., 2003), которые приведены в табл. 2.

Сравнение результатов было проведено по следующим вариантам счета: 1) исходная версия РОБУЛ; 2) исходная версия РОБУЛ с учетом вклада перестойных древостоев; 3) версия РОБУЛ-М с интерполяцией кривых хода роста; 4) версия РОБУЛ-М с интерполяцией кривых хода роста и с другим, обновленным набором конверсионных коэффициентов (Schepaschenko et al., 2018). Первые три варианта использовали исходные конверсионные коэффициенты (Замолотчиков и др., 2003) – табл. 1. Расчеты углеродного баланса проводились в разрезе субъектов РФ. Сравнение результатов не выявило существенных различий в величинах поглощения углерода пулами *M*, *D*, *L*, *S* (табл. 3). Неопределенность оценок поглощения углерода фитомассой лесов при расчетах с исходным набором конверсионных коэффициентов (Замолотчиков и др.,

2003) оценивается в 32% (Национальный..., 2016); использование нового набора конверсионных коэффициентов (Schepaschenko et al., 2018) позволяет снизить этот показатель до 22% (Национальный..., 2018).

Таблица 2. Конверсионные коэффициенты [запас древесины – углерод], использованные в базовом варианте расчета потоков углерода по модели РОБУЛ

Древесная порода	Группа возраста	Значения конверсионных коэффициентов по зонам					
		Северная тайга		Средняя тайга		Южная тайга и более южные природные зоны	
		Cab	CRt	Cab	CRt	Cab	CRt
1	2	3	4	5	6	7	8
Сосна (101)	1	0.3816	0.0870	0.3425	0.0542	0.3392	0.0951
	2	0.3816	0.0870	0.3425	0.0542	0.3392	0.0951
	3	0.2751	0.0715	0.2725	0.0504	0.2723	0.0793
	4	0.2909	0.0776	0.2767	0.0809	0.2654	0.0638
	5	0.2700	0.0607	0.2794	0.0438	0.2875	0.0684
	6	0.2700	0.0607	0.2794	0.0438	0.2875	0.0684
Ель (102)	1	0.3890	0.0794	0.3890	0.0794	0.4466	0.1669
	2	0.3890	0.0794	0.3890	0.0794	0.4466	0.1669
	3	0.3176	0.0691	0.3005	0.0691	0.2984	0.0700
	4	0.3056	0.0752	0.2818	0.0612	0.2804	0.0708
	5	0.2937	0.0813	0.2710	0.0696	0.2830	0.0809
	6	0.2937	0.0813	0.2710	0.0696	0.2830	0.0809
Пихта (103)	1	0.3234	0.0965	0.3234	0.0965	0.3234	0.0965
	2	0.3234	0.0965	0.3234	0.0965	0.3234	0.0965
	3	0.2533	0.0544	0.2533	0.0544	0.2533	0.0544
	4	0.2170	0.0656	0.2170	0.0656	0.2170	0.0656
	5	0.2182	0.0513	0.2182	0.0513	0.2182	0.0513
	6	0.2182	0.0513	0.2182	0.0513	0.2182	0.0513
Лиственница (104)	1	0.2952	0.2279	0.3498	0.0555	0.3240	0.0682
	2	0.2952	0.2279	0.3498	0.0555	0.3240	0.0682
	3	0.2903	0.1323	0.3636	0.0544	0.2959	0.0751
	4	0.2943	0.1560	0.3681	0.0656	0.3198	0.0779
	5	0.2982	0.1797	0.3522	0.0513	0.3198	0.0779
	6	0.2982	0.1797	0.3522	0.0513	0.3198	0.0779
Сосна кедровая (105)	1	0.2987	0.0928	0.2987	0.0928	0.2987	0.0928
	2	0.2987	0.0928	0.2987	0.0928	0.2987	0.0928
	3	0.2482	0.0928	0.2482	0.0928	0.2482	0.0928
	4	0.2403	0.0779	0.2403	0.0779	0.2403	0.0779
	5	0.3002	0.1496	0.3002	0.1496	0.3002	0.1496
	6	0.3002	0.1496	0.3002	0.1496	0.3002	0.1496

1	2	3	4	5	6	7	8
Можжевельник (106)	1	0.2952	0.2279	0.3498	0.0555	0.3240	0.0682
	2	0.2952	0.2279	0.3498	0.0555	0.3240	0.0682
	3	0.2903	0.1323	0.3636	0.0544	0.2959	0.0751
	4	0.2943	0.1560	0.3681	0.0656	0.3198	0.0779
	5	0.2982	0.1797	0.3522	0.0513	0.3198	0.0779
	6	0.2982	0.1797	0.3522	0.0513	0.3198	0.0779
Дуб высокоствольный (110)	1	0.3739	0.2423	0.3739	0.2423	0.3739	0.2423
	2	0.3739	0.2423	0.3739	0.2423	0.3739	0.2423
	3	0.3755	0.1148	0.3755	0.1148	0.3755	0.1148
	4	0.3445	0.0736	0.3445	0.0736	0.3445	0.0736
	5	0.3923	0.0856	0.3923	0.0856	0.3923	0.0856
	6	0.3923	0.0856	0.3923	0.0856	0.3923	0.0856
Дуб низкоствольный (111)	1	0.5937	0.2017	0.5937	0.2017	0.5937	0.2017
	2	0.5937	0.2017	0.5937	0.2017	0.5937	0.2017
	3	0.3782	0.1627	0.3782	0.1627	0.3782	0.1627
	4	0.4031	0.1595	0.4031	0.1595	0.4031	0.1595
	5	0.4802	0.1563	0.4802	0.1563	0.4802	0.1563
	6	0.4802	0.1563	0.4802	0.1563	0.4802	0.1563
Каменная береза (117)	1	0.5937	0.2017	0.5937	0.2017	0.5937	0.2017
	2	0.5937	0.2017	0.5937	0.2017	0.5937	0.2017
	3	0.3782	0.1627	0.3782	0.1627	0.3782	0.1627
	4	0.4031	0.1595	0.4031	0.1595	0.4031	0.1595
	5	0.4802	0.1563	0.4802	0.1563	0.4802	0.1563
	6	0.4802	0.1563	0.4802	0.1563	0.4802	0.1563
Прочие твердолиственные (112..116,120, 121)	1	0.4285	0.1958	0.4285	0.1958	0.4285	0.1958
	2	0.4285	0.1958	0.4285	0.1958	0.4285	0.1958
	3	0.3838	0.0927	0.3838	0.0927	0.3838	0.0927
	4	0.3237	0.0643	0.3237	0.0643	0.3237	0.0643
	5	0.3537	0.0824	0.3537	0.0824	0.3537	0.0824
	6	0.3537	0.0824	0.3537	0.0824	0.3537	0.0824
Береза (124)	1	0.3424	0.1188	0.3424	0.1188	0.3448	0.0918
	2	0.3424	0.1188	0.3424	0.1188	0.3448	0.0918
	3	0.3186	0.0901	0.3474	0.0901	0.3114	0.0844
	4	0.3326	0.0758	0.3066	0.0758	0.3056	0.0613
	5	0.3466	0.0758	0.2931	0.0758	0.3093	0.0576
	6	0.3466	0.0758	0.2931	0.0758	0.3093	0.0576
Осина (125)	1	0.2660	0.0897	0.2660	0.0897	0.2660	0.0897
	2	0.2660	0.0897	0.2660	0.0897	0.2660	0.0897
	3	0.2731	0.0897	0.2731	0.0897	0.2731	0.0897
	4	0.2503	0.0840	0.2503	0.0840	0.2503	0.0840
	5	0.2866	0.0784	0.2866	0.0784	0.2866	0.0784
	6	0.2866	0.0784	0.2866	0.0784	0.2866	0.0784

1	2	3	4	5	6	7	8
Прочие мягколиствен- ные (126..132)	1	0.3175	0.0633	0.3175	0.0633	0.3175	0.0633
	2	0.3175	0.0633	0.3175	0.0633	0.3175	0.0633
	3	0.2719	0.0643	0.2719	0.0643	0.2719	0.0643
	4	0.2733	0.0605	0.2733	0.0605	0.2733	0.0605
	5	0.2708	0.0663	0.2708	0.0663	0.2708	0.0663
	6	0.2708	0.0663	0.2708	0.0663	0.2708	0.0663
Прочие породы (141..180)	1	0.4285	0.1958	0.4285	0.1958	0.4285	0.1958
	2	0.4285	0.1958	0.4285	0.1958	0.4285	0.1958
	3	0.3838	0.0927	0.3838	0.0927	0.3838	0.0927
	4	0.3237	0.0643	0.3237	0.0643	0.3237	0.0643
	5	0.3537	0.0824	0.3537	0.0824	0.3537	0.0824
	6	0.3537	0.0824	0.3537	0.0824	0.3537	0.0824
Кедровый стланник (191)	1	0.2650	0.3344	0.2650	0.3344	0.2650	0.3344
	2	0.2650	0.4343	0.2650	0.4343	0.2650	0.4343
	3	0.2650	0.5009	0.2650	0.5009	0.2650	0.5009
	4	0.2650	0.5675	0.2650	0.5675	0.2650	0.5675
	5	0.2650	0.7340	0.2650	0.7340	0.2650	0.7340
	6	0.2650	0.9005	0.2650	0.9005	0.2650	0.9005
Прочие кустарники (181..190,193.. 204)	1	0.3424	0.1188	0.3424	0.1188	0.3448	0.0918
	2	0.3424	0.1188	0.3424	0.1188	0.3448	0.0918
	3	0.3424	0.1188	0.3424	0.1188	0.3448	0.0918
	4	0.3424	0.1188	0.3424	0.1188	0.3448	0.0918
	5	0.3424	0.1188	0.3424	0.1188	0.3448	0.0918
	6	0.3424	0.1188	0.3424	0.1188	0.3448	0.0918

Примечания: 1. В скобках указаны коды пород по классификации ГЛР. Cab, CRt – коэффициенты для над- и подземной фитомассы соответственно
2. Широтные зоны: 1 – северная тайга, 2 – средняя тайга, 3 – южная тайга и более южные климатические зоны.

Согласно отчетным данным ГЛР 2014 г. потери C от сплошных рубок $LossC = 73.1 \cdot 10^6$ т C; потери от деструктивных пожаров и прочих естественных причин гибели насаждений при расчетах берутся средними за 10 последних лет, $LossF = 100.5 \cdot 10^6$ т C. В результате, бюджет углерода $NBP = NEP - LossF - LossC$ по разным вариантам счета (табл. 3) составил $NBP = 165.9 - 203.0 \cdot 10^6$ т C. Очевидно увеличение разброса величин NBP относительно NEP из-за вычитания большой константы.

Нам кажется полезным провести приближенную оценку поглощения углерода живой фитомассой для РФ в целом; без нее результат в виде миллионов тонн на миллионах квадратных километров не воспринимается в физически ощутимых терминах. Величины, нужные для оценки, приведены в табл. 4. Значение среднего по РФ конверсионного коэффициента [запас древесины → углерод] $K_{WM} = 31 \cdot 10^9 / 80 \cdot 10^9 = 0.39$ т C м⁻³, с его помощью находится удельный запас углерода $C_{specif} = 104 \times 0.39 = 40$ т C га⁻¹. Зададим интервал времени

достижения величины C_{specific} : $T = 100-140$ лет и найдем средний за это время прирост удельного запаса углерода, $\text{т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$:

$$dC = C_{\text{specific}} / T; \quad (18)$$

умножив результат на площадь, получим оценку абсолютного поглощения углерода лесами РФ.

Таблица 3. Сравнение результатов расчетов накопления углерода по пулам (данные ГЛР 2014 г.)

Варианты расчетов	Единица измерения	Накопление углерода по пулам (NEP) и итоговый баланс углерода (NBP)					
		Фитомасса древостоя	Мертвая древесина	Подстилка	Почва	Чистая экосистемная продукция (NEP)	Чистая биомная продукция (NBP)
Исходная версия РОБУЛ	$10^6 \text{ т С год}^{-1}$	262.7	39.8	12.6	64.5	379.6	203.0
	$\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$	34.1	5.2	1.6	8.4	49.3	26.4
Исходная версия РОБУЛ (с учетом вклада перестойных древостоев)	$10^6 \text{ т С год}^{-1}$	245.2	35.4	10.2	48.7	339.5	165.9
	$\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$	31.8	4.6	1.3	6.3	44.1	21.5
Модифицированная версия РОБУЛ-М (интерполяция кривых хода роста)	$10^6 \text{ т С год}^{-1}$	237.4	35.0	11.7	59.5	343.6	170.0
	$\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$	30.8	4.5	1.5	7.7	44.6	22.1
Модифицированная версия РОБУЛ-М (интерполяция кривых хода роста и новый набор конверсионных коэффициентов (Schepaschenko et al., 2018))	$10^6 \text{ т С год}^{-1}$	240.1	35.0	11.7	59.5	346.3	172.7
	$\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$	31.2	4.5	1.5	7.7	45.0	22.4

Таблица 4. Исходные данные для оценки поглощения углерода живой фитомассой лесов РФ (данные ГЛР 2014 г.)

Площадь, га	Запас абсолютный, м^3	Запас удельный, $\text{м}^3 \text{ га}^{-1}$	Запас углерода абсолютный, т С	C_{specific} запас углерода удельный, т С га^{-1}
$770 \cdot 10^6$	$80 \cdot 10^9$	104	$31 \cdot 10^9$	40

Результаты приведены в табл. 4; их сопоставление со столбцом "Фитомасса древостоя" табл. 3 говорит о том, что наша оценка, основанная на простых реалистических предположениях, служит объясняющим механизмом

результатов модельных расчетов (наибольшая близость оценок достигается при $T = 130$ лет).

Таблица 4. Упрощенная оценка поглощения углерода живой фитомассой лесами РФ (данные ГЛР 2014 г.)

<i>T</i> , время достижения среднего запаса, лет	Прирост удельного запаса углерода <i>dC</i> , т С га ⁻¹ год ⁻¹	Прирост абсолютного запаса углерода, 10 ⁶ т С год ⁻¹
100	0.40	308
110	0.36	277
120	0.33	254
130	0.31	239
140	0.29	223

Сравнение нетто-поглощения углерода по субъектам РФ, NBP, выполненное с использованием исходной версии РОБУЛ и ее модифицированной версии (учет вклада перестойных древостоев, интерполяция кривых хода роста, новый набор конверсионных коэффициентов) показывает, что уточнение расчетов приводит как к увеличению, так и к уменьшению NBP (рис. 6), что связано, по-видимому, с особенностями породно-возрастной структуры древостоев конкретного региона.

Расчеты по РОБУЛ-М показали, что большинство субъектов РФ выступают нетто-поглотителями С (от 1 до 156 г С м⁻² год⁻¹). Восемь субъектов РФ выступают в качестве нетто-источника С (Магаданская область, Ненецкий автономный округ, Чукотский автономный округ, Республика Тыва, Республика Калмыкия, Волгоградская область, Ростовская область, Рязанская область). В основном это малолесные регионы, располагающиеся на крайнем севере или на юге в условиях аридного климата. Исключение составляет Рязанская область, в которой велики потери углерода от лесных пожаров.

Для сравнения удельных значений углеродного баланса субъектов РФ с другими странами были использованы национальные доклады о кадастрах 2018 года, размещенные на официальном сайте РКИК ООН: <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/national-inventory-submissions-2018> (рис. 7). Для расчета удельных значений были использованы таблицы общего формата данных с информацией по площадям и нетто-поглощению СО₂ постоянными лесными землями (управляемые леса) за 2014 год. Результаты были пересчитаны в г С м⁻² год⁻¹.

Сравнение удельных значений углеродного баланса лесов показывает, что этот показатель для Карелии, Ленинградской и Новгородской областей близок к аналогичному показателю для Финляндии и Швеции. По удельным значениям углеродного баланса леса Литвы и Польши сопоставимы с лесами Псковской, Новгородской и Калининградской областей, леса США – с лесами Кавказа, леса Канады – с лесами Якутии.

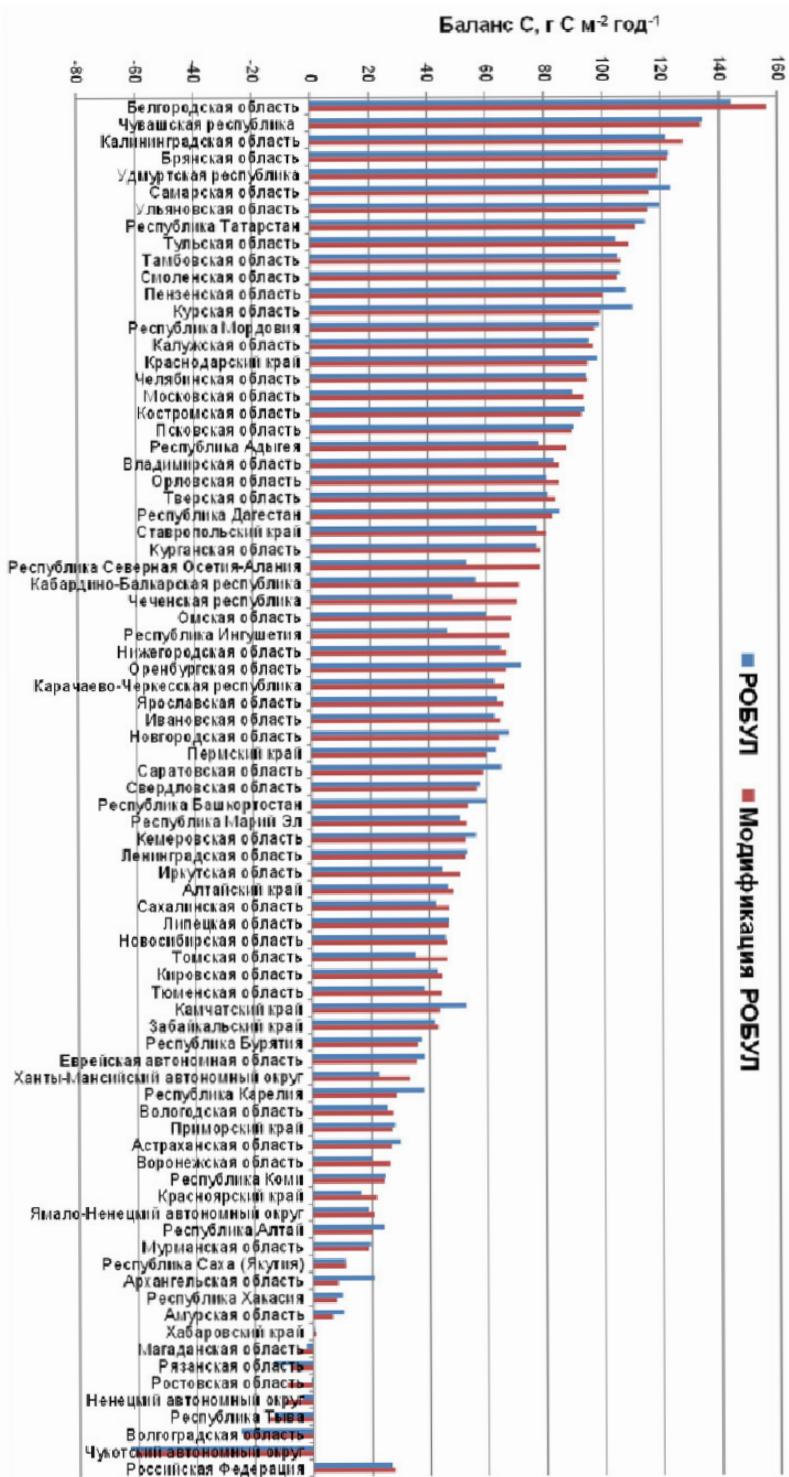


Рисунок 6. Сравнение двух вариантов расчета нетто-поглощения С (величин NBP) лесами субъектов РФ. Отрицательные значения означают, что потери углерода в результате деструктивных нарушений превышают его поглощение, т.е. леса выступают источником выбросов

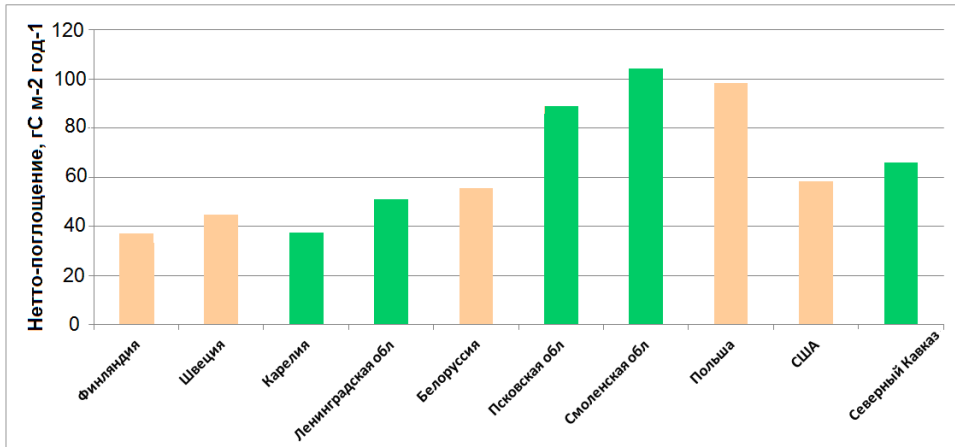


Рисунок 7. Сравнение углеродного баланса лесов некоторых субъектов РФ и зарубежных стран со сходными природно-климатическими условиями

Полезно сравнить полученные результаты с оценками баланса CO₂ для РФ по данным современных авторов. Прежде всего, заметим, что компоненты баланса – потоки углерода (7) для больших территорий недоступны прямому инструментальному измерению и должны быть найдены применением каких-либо расчетных методов к натурным данным. Разнообразие этих методов (моделей) и типов данных приводит к значительному разбросу результатов. Задача сравнения методов и результатов расчетов далеко выходит за рамки настоящей работы (и, по нашему мнению, удовлетворительное ее решение при нынешнем положении дел в отечественном лесоведении и экологии практически невозможно).

Согласно обзору (Замолодчиков и др., 2005), удельный запас углерода в фитомассе лесов для покрытых лесом земель (площадь 7.6-8.9 10⁶ км²) для последних 20 лет по разным методам расчета находится в диапазоне 38-45 т С га⁻¹; то же для земель лесного фонда, т.е. для лесного биома (площадь 12 10⁶ км²) 28-35 т С га⁻¹.

Согласно обзору (Замолодчиков и др., 2007), бюджет углерода (величина NBP) для 1990-205 гг. по разным методам расчета находится в диапазоне 107-500 10⁶ т С год⁻¹ (примерно 0.13-0.62 т С га⁻¹ год⁻¹). Большой диапазон значений NBP нуждается в комментарии. Величины NBP ~ 500 получены группой авторов (Моисеев, 2007; Моисеев, Алябина, 2007; Филипчук и др., 2016), которые прирост фитомассы в возрасте древостоя *A* находят как $dC = C(A)/A$. Очевидно, что при реальных кривых хода роста (рис. 2) начиная с некоторого возраста, величина dC превышает реальный прирост $DC = dC/dA$. Поскольку в старших возрастах сосредоточены большие площади насаждений, найденный с помощью dC суммарный прирост DC , скорее всего, будет завышен относительно реального. Этот механизм – одно из наиболее вероятных объяснений больших получаемых значений NBP. Результаты, основанные на при-

менении этого алгоритма, приводятся, в частности, в книге (Федоров, 2017) и служат обоснованием вывода о высокой способности к поглощению углерода лесами РФ. В группе очень высоких величин поглощения углерода находится величина NBP $\sim 546 \cdot 10^6$ т С год⁻¹ (Швиденко, Щепашенко, 2014), полученная "применением принципов системного анализа и ландшафтно-экосистемного подхода"; описание метода содержится в недоступном отчете IIASA. Тот же метод дал NBP = $692 \cdot 10^6$ т С год⁻¹ (Dolman et al., 2012). Сравнение результатов применения различных методов содержится в Швиденко, Щепашенко (2014); разброс величин NBP весьма велик.

Заключение

Выполненное исследование показало, что алгоритм РОБУЛ успешно справляется с расчетом баланса углерода для Национального кадастра парниковых газов, и что введенные нами коррекции и модификации качественно не изменили предыдущих результатов. Помимо нахождения баланса, расчет по РОБУЛ дает разумную величину удельного запаса $C_{\text{specif}} \sim 4.0$ кг С м⁻², что близко к другим оценкам (напр., по Замолодчиков и др., 2005: $C_{\text{specif}} \sim 4.35$ кг С м⁻²; Швиденко, Щепашенко, 2014: $C_{\text{specif}} \sim 4.56$ кг С м⁻²).

Заметим, что модификации алгоритма РОБУЛ частично следовали критике (Швиденко, Щепашенко, 2014; Филипчук и др., 2016): мы отказались от фиксированного нулевого прироста для группы перестойных лесов; потоки и баланс рассчитываются для всех, а не только "управляемых" лесов; принят модернизированный массив конверсионных коэффициентов [запас древесины \rightarrow углерод]. Однако, расчет приростов «по разности запасов» в последовательных возрастных группах является фактически дифференцированием КХР – объекта устойчивого к разнородным методам измерения, представляется правильным и по существу оставлен неизменным (с точностью до использования непрерывных КХР).

Из свойств алгоритма РОБУЛ видно, что это – модель с "закрытой архитектурой". Преимущественная регрессионность и отсутствие в явном виде элементарных потоков делает невозможным решение задач, стандартных для современной углеродной тематики – введения зависимостей от климатических факторов и прогноза динамики компонент углеродного цикла. Модели другого типа, с "открытой архитектурой" (десятки моделей имитационного типа (process-based), и сотни работ в мировой литературе), напротив, доступны для включения любых экологических данных и механизмов и, как правило, описывают динамику системы. В частности, шаг в этом направлении сделан авторами книги Алферов и др. (2017) при нахождении NPP экосистемного уровня. Мы склонны рассматривать параметры и оценки компонент баланса углерода, получаемые в программе РОБУЛ как промежуточный этап на пути построения имитационной модели, которая была бы пригодна для учета климатических параметров.

Список литературы

Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолодчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Ивахов В.М., Карабань Р.Т., Карелин Д.В., Калюжный И.Л., Кашин Ф.В., Конюшков Д.Е., Коротков В.Н., Кровотынцев В.А., Лавров С.А., Марунич А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Трунов А.А., Шилкин А.В., Юзбеков А.К. 2017. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах /под ред. Д.Г. Замолодчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского, В.Г. Блинова. – Саратов, Амирит, 279 с.

Грабовский В.И., Зукерт Н.В., Корзухин М.Д. 2015. Оценка индекса листовой поверхности (LAI) для территории РФ по данным государственного лесного реестра. – Лесоведение, № 4, с. 255-259.

Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Честных О.В. 2003. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу основных лесобразующих пород России. – Лесная таксация и лесоустройство, вып. 1 (32), с. 119-127.

Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н., Честных О.В. 2005. Динамика пулов и потоков углерода на территории лесного фонда России. – Экология, № 5, с. 323-333.

Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л. 2007. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации. – Лесоведение, № 6, с. 23-34.

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н. 2011. Динамика бюджета углерода лесов России за два прошедших десятилетия. – Лесоведение, № 6, с. 16-28.

Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л., Блинов В.Г., Дмитриев В.В., Курц В.А. 2013. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации в 1990-2050 гг.: ретроспективная оценка и прогноз. – Метеорология и гидрология, № 10, с. 73-92.

Инсаров Г.Э., Борисова О.К., Корзухин М.Д., Кудяров В.Н., Минин А.А., Ольчев А.В., Семенов С.М., Сирин А.А., Харук В.И. 2012. Гл. 6 "Природные экосистемы суши" – в кн.: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем /под ред. С.М. Семенова. – М., Росгидромет, с. 190-265.

Исаев А.С., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Пряжников А.А., Замолодчиков Д.Г. 1993. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России. – Лесоведение, № 5, с. 3-10.

Карев Г.П. Системное моделирование лесных сообществ 2001. – Сибирский экологический журнал, № 4, с. 518-528.

Корзухин М.Д. 2018. Обобщенная модель Бергаланфи, примененная к построению кривых хода роста по данным государственного лесного реестра. – Лесоведение (в печати).

Коровин Г.Н., Корзухин М.Д., Бутусов О.Б., Голованов А.С. 2012 а. Долгосрочное прогнозирование динамики породно-возрастной структуры и ресурсного потенциала лесов. – В кн.: Разнообразие и динамика лесных экосистем России. В 2-х кн. Книга 1. /Под ред. А.С. Исаева. – М., Товарищество научных изданий КМК, с. 53-95.

Коровин Г.Н., Нефедьев В.В., Зукерт Н.В., Голованов А.С. 2012 б. Ретроспективный анализ породно-возрастной структуры лесов. В кн.: Разнообразие и динамика лесных экосистем России. В 2-х кн. Книга 1. /под ред. А.С. Исаева. – М., Товарищество научных изданий КМК, с. 16-53.

Моисеев Б.Н. 2007. Баланс органического углерода в растительном покрове России. – Лесное хозяйство, № 1.

Моисеев Б.Н., Алябина И.О. 2007. Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомах России. – Известия РАН. Серия географическая, № 5, с. 1-12.

Национальный доклад Российской Федерации о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990 – 2014 гг. 2016. Часть 1. – М., ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 476 с. – Режим доступа: <https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories/submissions-of-annual-greenhouse-gas-inventories-for-2017/submissions-of-annual-ghg-inventories-2016>, свободный.

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом. 2018. Часть 1. – М., ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 466 с. Режим доступа: <https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories/submissions-of-annual-greenhouse-gas-inventories-for-2017/submissions-of-annual-ghg-inventories-2018>, свободный.

Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. в 5-ти тт. 2007. Том 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. – Хаяма: Институт глобальных стратегий окружающей среды. Режим доступа: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol4.html>

Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. 2003. – Хаяма: Институт глобальных стратегий окружающей среды. Режим доступа: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_languages.html

Усольцев В.А. 2002. Фитомасса лесов Северной Евразии: Нормативы и элементы географии. – Екатеринбург, УрО РАН, 762 с.

Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А. 2008. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. – М., Наука, 292 с.

Федоров Б.Г. 2017. Российский углеродный баланс. – М., Изд-во «Научный Консультант», 82 с.

Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Страхов В.В. 2016. Аналитический обзор методик учёта выбросов и поглощения лесами парниковых газов из атмосферы. – Лесохозяйственная информация: электронный сетевой журнал, № 3, с. 36–85. Режим доступа: <http://lhi.vniilm.ru/index.php/ru/filipchuk-a-n-malysheva-n-v-moiseev-b-n-strakhov-v-v-analiticheskij-obzor-metodik-uchjota-vybrosov-i-pogloshcheniya-lesami-pannikovyykh-gazov-atmosfery>, свободный

Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. 2008. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Изд. второе, дополненное. – М., Рослесхоз, 886 с.

Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г., Ваганов Е. А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКаллум И., Лакида И.П. 2011. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет. – Доклады Академии Наук, т. 441, № 4, с. 544–548.

Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. 2014. Углеродный бюджет лесов России. – Сибирский лесной журнал, № 1, с. 69-92.

Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Flitman E.V., Loupian E.A., Stytsenko F.V. 2012. Assessment of burned forest areas over the Russian Federation from MODIS and Landsat-TM/ETM+Imagery. – Global forest monitoring from Earth observation /ed. by F. Achard & M.C. Hansen. – Taylor & Francis Group, CRC Press, pp. 259-286.

Bertalanffy, Von. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. – The Quarterly Review of Biology, vol. 32, pp. 217-231.

Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciais P., Tchebakova N., Chen T., van der Molen M. K., Belelli Marchesini L., Maximov T.C., Maksyutov S., and Schulze E.-D. 2012. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods. – Biogeosciences, vol. 9, pp. 5323-5340.

Kurz W.A., Apps M.J. 1999. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. – Ecological Applications, vol. 9, No. 2, pp. 526-547.

Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F. 2018. Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests. – Forests, vol. 9, No. 6, 312 p. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/f9060312>, свободный.

Shvidenko A., Schepaschenko D., Nilsson S., Boulou Y. 2007. Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests. – Ecological Modelling, vol. 204, No. 1-2, pp. 163-179.

Статья поступила в редакцию: 09.07.2018 г.

После переработки: 29.07.2018 г.