

**Анализ возможности уточнения «периодов полураспада»
древесной продукции для оценки запасов углерода
в заготовленных лесоматериалах**

П.Д. Полумиева, А.А. Трунов*

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107058, Москва, ул. Глебовская, 20Б

*Адрес для переписки: pollipolumieva@igce.ru

Реферат. Леса и продукция из древесины могут способствовать усилиям по смягчению последствий изменения климата, поскольку деревья являются поглотителем CO₂, а некоторые продукты из древесины могут хранить углерод в течение длительного времени. Руководящие принципы Межправительственной группы экспертов по изменению климата для расчета запасов углерода в продукции из древесины предлагают использовать метод разложения первого порядка с коэффициентами и «периодами полураспада» (“half-life”) по умолчанию. Однако значения по умолчанию не отражают национальную специфику производства и использования древесины, а также не учитывают тот факт, что модели производства древесной продукции меняются с течением времени и, соответственно, расчетные средние значения «периода полураспада» тоже будут меняться с течением времени. Все эти факторы могут привести к недооценке запасов углерода в заготовленных лесоматериалах в Российской Федерации. Цель данного исследования – анализ возможности уточнения «периодов полураспада» различных видов продукции лесной промышленности, которая является частью национальной отчетности по парниковым газам Российской Федерации в секторе «Землепользование, изменение в землепользовании и лесное хозяйство».

Ключевые слова. Парниковые газы, углерод, продукция лесозаготовки, кадастр парниковых газов, МГЭИК.

**Analysis of the possibility of refinement the “half-lives”
of wood products to assess carbon stocks
in the harvested wood products**

P.D. Polumieva, A.A. Trunov*

Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: pollipolumieva@igce.ru

Abstract. Forests and wood products can contribute to climate change mitigation efforts because trees are a CO₂ sink and some wood products can store carbon for long periods of time. The Intergovernmental Panel on Climate Change

guidelines for calculating carbon stocks in harvested forest products suggest using a first-order decomposition method with default coefficients and «half-lives». However, the default values do not reflect national specifics of wood production and use, and do not take into account the fact that timber production patterns change over time and, accordingly, the estimated average “half-lives” values will also change over time. All of these factors may lead to underestimation of carbon stocks in harvested wood products in the Russian Federation. The purpose of this study is to analyze the possibility of clarifying the “half-lives” of various types of harvested wood products, which is part of the national reporting on greenhouse gases of the Russian Federation in the sector “Land use, land-use changes and forestry”.

Keywords. Greenhouse gases, carbon, timber products, greenhouse gas inventory, IPCC.

Введение

Целью данного исследования является анализ возможности уточнения «периода полураспада» различных видов продукции лесной промышленности, которая является частью национальной отчетности по парниковым газам Российской Федерации в секторе «Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство» (ЗИЗЛХ).

Продукция из заготовленных лесоматериалов (ЗЛМ) начала рассматриваться как средство связывания углерода во второй период действия обязательств Киотского протокола (2013-2020 гг.). На конференции ООН по изменению климата в 2011 г. в Дурбане (Австралия) было принято решение 2/СМР.7, касающееся ЗЛМ, в котором каждая Сторона, включенная в Приложение I, обязана отчитываться за углерод, хранящийся в этом пуле.

Рассмотрение продукции лесозаготовок в качестве механизма накопления углерода является относительно новым, хотя существуют исследования, которые признают, что ЗЛМ могут сокращать выбросы углерода и вносить вклад в стратегии смягчения последствий изменения климата (Steel, 2021). Углерод хранится в ЗЛМ до тех пор, пока они находятся в использовании или в утилизации. Таким образом, накопление углерода в ЗЛМ вносит вклад в общий баланс лесной биомассы. Тем не менее, до сих пор не хватает надежной и исчерпывающей информации для количественной оценки функции ЗЛМ по накоплению углерода (Steel, 2021). Несмотря на то, что были предложены различные подходы к учету, хранение углерода в ЗЛМ рассматривается в основном для национальной отчетности по парниковым газам и с помощью подходов, предложенных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), которая, в свою очередь, имеет ряд ограничений и недостатков, которые будут рассмотрены далее.

Методы, применяемые для оценки накопления углерода в ЗЛМ

Руководящие принципы МГЭИК (МГЭИК, 2006) описывают методы, т. е. так называемые уровни (Tier), для оценки накопления углерода в ЗЛМ.

Уровни в основном различаются наличием данных о деятельности и уровнем агрегирования ЗЛМ. Последние Руководящие принципы МГЭИК (IPCC, 2019) содержат следующие уровни:

- На Уровне 1 предполагается, что углерод в ЗЛМ окисляется в год лесозаготовки. Таким образом, этот подход делает упрощенное предположение об отсутствии накопления углерода в пуле ЗЛМ.

- Метод Уровня 2 требует оценки пула углерода ЗЛМ и его изменений для трех стандартных категорий ЗЛМ с использованием метода затухания первого порядка с применением коэффициентов по умолчанию.

- Метод Уровня 3 предусматривает оценку углеродного пула ЗЛМ и его изменений с использованием значений «периода полураспада» для конкретной страны и/или национальных методологий учёта.

Руководство МГЭИК (IPCC, 2019) включает четыре основных подхода к учету накопления углерода в ЗЛМ: подход «изменение запасов», «производственный» подход, подходы «атмосферный поток» и «простое разложение». Все перечисленные подходы отличаются по следующим параметрам:

- 1) Основная концептуальная основа. Первая концепция основывается на оценке изменений в запасах углерода в пределах определенных пулов ЗЛМ и требует отслеживания изменений в запасах углерода в пуле ЗЛМ, которые происходят из года в год, а затем получения чистых выбросов и абсорбции CO₂ от ЗЛМ за счет изменения этих запасов. Вторая концепция направлена на выявление и количественную оценку фактических потоков CO₂ из пула ЗЛМ в атмосферу.

- 2) Системные границы, применяемые при расчете хранения углерода, которые не обязательно аналогичны национальным границам стран.

Подход «изменение запасов» и «производственный» подход основаны на первой концептуальной основе, а подходы «атмосферный поток» и «простое разложение» – на второй концептуальной основе (IPCC, 2019). Первые два подхода учитывают изменения запасов в пулах углерода биомассы, тогда как последние два учитывают потоки углерода в атмосферу и из атмосферы. Кроме того, подходы, основанные на «изменении запасов» и «атмосферных потоках», охватывают изменения запасов или потоки CO₂, связанные с потребляющей страной, тогда как подходы «производства» и «простого разложения» охватывают те, которые связаны со страной-производителем, независимо от того, где потребляются ЗЛМ. МГЭИК предоставляет подробную информацию о формировании данных о деятельности для каждого подхода, а также о методах расчета, используемых для оценки вклада пула ЗЛМ в общий баланс парниковых газов в секторе ЗИЗЛХ (МГЭИК, 2006; IPCC, 2014, 2019).

Метод изменения запасов оценивает чистое изменение запасов углерода в лесах и в пуле ЗЛМ в пределах национальных границ. Таким образом, изменения запасов углерода в лесах учитываются в стране, представляющей отчет, тогда как изменения запасов в ЗЛМ учитываются в стране, представляющей отчетность, в которой используются изделия из древесины, т. е. сообщается страной-потребителем. Метод изменения запасов оценивает чистые измене-

ния в запасах углерода в лесах и пулах ЗЛМ через прирост и потерю углерода. Углерод, переносимый из лесных пулов углерода в пул ЗЛМ, сначала учитывается как потеря углерода из пула лесных земель в стране, представляющей отчет, а затем как прирост углерода в пуле ЗЛМ в странах-потребителях.

«Производственный» подход также оценивает чистые изменения в запасах углерода в лесах и в пуле ЗЛМ, но в границах страны-производителя. Таким образом, пул ЗЛМ состоит из всех изделий из древесины, которые потребляются внутри страны, и тех изделий, которые экспортируются и используются в других странах. Другими словами, при применении «производственного» подхода страна-производитель сообщает об изменениях накопления углерода, независимо от того, где используются ЗЛМ. «Производственный» подход учитывает только запасы ЗЛМ внутреннего производства, а влияние импортируемой древесины не оценивается. Углерод, переносимый из пула лесной биомассы в пул ЗЛМ, сначала учитывается как потеря углерода в пуле лесных земель в стране, представляющей отчет, а затем как прирост углерода в пуле ЗЛМ страны-производителя.

Подход «атмосферного потока» оценивает потоки углерода между биосферой и атмосферой в пределах национальных границ. Поглощение углерода в результате роста лесов учитывается в стране-производителе, а выбросы углерода в результате окисления древесины или изделий из древесины учитываются в стране-потребителе. Подход с использованием «атмосферного потока» учитывает выбросы от окисления ЗЛМ по стране-потребителю, т. е. там, где они фактически происходят. Таким образом, углерод, переносимый из пула биомассы лесов в пул ЗЛМ, учитывается не как потеря углерода в пулах лесных земель в стране-производителе, а как выбросы в момент окончания срока службы ЗЛМ в стране-потребителе.

Подобно подходу «атмосферного потока», подход «простого разложения» учитывает фактические потоки углерода в атмосферу. Однако метод простого разложения охватывает выбросы CO_2 от древесины, заготовленной страной-производителем, поэтому выбросы от ЗЛМ и древесной биомассы, используемой для производства энергии, представляются страной-производителем. Таким образом, перенос углерода из лесных пулов углерода в пул ЗЛМ учитывается не как потеря углерода в пулах лесных земель страны-производителя, а как выбросы из пула ЗЛМ в момент окончания срока службы ЗЛМ в стране-производителе. Как и в подходе «атмосферный поток», требуются данные о деятельности, включая данные о сырье для переработки древесины для ее использования в качестве материала, и о древесной биомассе, сжигаемой для получения энергии.

Кроме того, в литературе описан метод изменения запасов местного происхождения – stock-changes approach for HWP of domestic origin (SCAD) (Sato, Nojiri, 2019). Однако МГЭИК не рассматривает SCAD как независимый подход (Sanquetta et al., 2019). Подход SCAD оценивает чистые изменения в запасах углерода в лесах и пулах ЗЛМ, учитывает только произведенные внутри страны ЗЛМ, потребляемые в стране-производителе, в то время как воздействие импортируемой и экспортируемой древесины не оценивается.

Изменения в углеродном пуле леса учитываются в стране, в которой выращивается древесина, т.е. в стране-производителе. Углерод, перенесенный из лесного пула углерода в пул ЗЛМ, учитывается как потеря углерода в пуле лесных площадей страны-производителя, а затем учитывается как прирост углерода в пуле ЗЛМ в стране-производителе, но только для внутреннего потребления ЗЛМ (Sato, Nojiri, 2019).

Для всех вышеперечисленных подходов применяются значения «периода полураспада» по умолчанию: 35 лет для пиломатериалов, 25 лет для древесных плит и 2 года для бумаги и картона (IPCC, 2019).

В Руководящих принципах МГЭИК понятие «периода полураспада» (“half-life”) принимается как средний срок службы древесного изделия для определения периода учета депонирования углерода в изделиях из древесины (используется для вычисления коэффициента распада $k = \ln(2)/\text{half-life}$). «Период полураспада» представляет собой время, когда половина продукции, произведенная в определенном году, т.е. полуобработанная древесная продукция, достигает конца своего срока службы. Все ЗЛМ имеют разные сроки службы и, следовательно, разные «периоды полураспада». Срок службы древесных изделий в основном определяется физическими и химическими условиями, а также социально-экономическими факторами (Pingoud, Wagner, 2006; Chang et al., 2014). Также на срок жизни древесного изделия влияет характер использования продукции, т.е. для древесных изделий, используемых в гражданском строительстве или для наружных работ, или древесных изделий для внутренней декоративной отделки или мебели будут различные физические и химические воздействия и, соответственно, различные сроки эксплуатации (Soimakallio et al., 2022). Продукция лесозаготовки имеет различное конечное использование, и ожидаемая продолжительность жизни даже в пределах одного вида продукции может существенно различаться (Soimakallio et al., 2022). Таким образом, важно понимать, как используется древесная продукция, поскольку информация о продолжительности жизни или «периоде полураспада» ЗЛМ обычно связана с конкретными функциями конечного использования.

Обзор литературных источников

Значения «периода полураспада», как правило, являются наиболее неопределенной частью расчетов запасов углерода в категории заготовленных лесоматериалов. Основная проблема заключается в отсутствии данных для оценки скорости удаления углерода из пула ЗЛМ, поскольку отсутствуют надежные данные о полном жизненном цикле ЗЛМ для различных стран (Brunet-Navarro et al., 2016). Кроме того, в литературе отсутствуют сведения о сроке службы и «периоде полураспада» для недавно появившихся продуктов на основе древесины, таких как текстиль из древесного сырья, биохимические вещества и биокompозиты, хотя их доля на рынке лесного сектора увеличивается, а некоторые из них могут составлять относительно длительное хранение углерода (Soimakallio et al., 2022).

Если рассматривать ЗЛМ с точки зрения баланса углерода в атмосфере, срок службы ЗЛМ состоит из времени использования и возможной переработки для повторного использования, а также времени, в течение которого ЗЛМ не используется, например, на свалках. Очевидно, что «периоды полураспада» различны для ЗЛМ как для полуобработанной продукции, так и для конечных продуктов. Значения «периода полураспада» ЗЛМ по умолчанию, представленные в Руководящих принципах МГЭИК (IPCC, 2019), являются результатом усреднения сроков службы различных древесных продуктов. Значения по умолчанию предназначены для применения ко всем отчитывающимся странам и являются приближенными. В действительности ключевые параметры для оценки изменения накопления углерода в ЗЛМ, такие как «периоды полураспада», коэффициенты преобразования углерода и использование материалов для производства, различаются от страны к стране (Pingoud, Wagner, 2006).

Существует ряд исследований, которые приводят оценки «периодов полураспада», отличные от значений по умолчанию МГЭИК. Так, согласно исследованиям, приведённым в работе (Skog, Nicholson, 1998), «период полураспада» для древесной продукции, использованной в строительстве деревянных односемейных домов, составляет 80-100 лет, многоквартирных домов – 70 лет, 67 лет для нежилых сооружений и 30 лет для шпал. В работе (Bird, 2013) было установлено, что реальный «период полураспада» бумажной продукции в Австрии составляет 4.6 года, что более чем в два раза превышает период полураспада по умолчанию, составляющий 2 года, как это предлагается в руководящих принципах МГЭИК. В работе (Dymond, 2012) приводится средний «период полураспада» для односемейных домов 90 лет (минимально 78 лет и максимально 350 лет), для многоквартирных домов и коммерческих зданий – 75 лет (минимально 48 лет и максимально 350 лет). Авторы (Karjalainen et al., 1994) дают период полураспада для пиломатериалов – 50 лет, для бумажной продукции от 5.3 до 7 лет. В работе (Nabuurs, 1996) для пиломатериалов «период полураспада» указан как диапазон от 18 до 45 лет в зависимости от породы дерева, из которого они сделаны. В работе (Jasinevicius et al., 2018) для пиломатериалов был принят период полураспада 45 лет, для бумажной продукции 5 лет. В работе (Profft, 2009) для строительной древесины и древесных панелей средний срок службы составлял около 50 лет. Согласно данным (Skog, 2008) период полураспада для твёрдой древесины, которая используется в строительстве односемейных домов, составляет 75 лет (для 1920-х годов и ранее) и 80 лет (для временного периода 1920-1939 гг.). В исследовании (Matsumoto et al., 2022) было установлено, что «период полураспада» деревянного дома, согласно данным японских компаний, составляет от 66 до 101 года. Согласно международным исследованиям, «период полураспада» древесины, используемой для строительства зданий и жилых домов, составляет в Германии по различным оценкам от 65 (Burschel et al., 1993) до 150 лет (Vasquez et al., 2016), 71 год в Австрии (Braun et al., 2016), 80 лет в Соединённом Королевстве Великобритании (Pingoud et al., 2003; Miatto et al., 2017), 61-100 лет в США (Kapur et al., 2008; Aktas et al., 2012), 125 лет в Норвегии (Sandberg et al., 2014).

За последние десятилетия технологические усовершенствования в деревообрабатывающей промышленности достигли высоких результатов, что привело к возможности использовать низкокачественные бревна и бревна малого диаметра, повышению эффективности переработки изделий из древесины, разработке инновационных изделий из древесины с более длительным сроком службы и увеличению степени переработки, что потенциально может привести к увеличению запасов углерода в пуле ЗЛМ (Li et al., 2022). Например, технологический прогресс в деревообрабатывающей промышленности способствовал увеличению выхода пиломатериалов до 70% для бревен малого диаметра, что еще несколько десятилетий назад было невозможно (Shmulsky, Jones, 2019). Кроме того, с изобретением и распространенным использованием изделий из древесных композитов лесопильные заводы распределяют свои отходы переработки между производителями изделий из древесины, расположенных ниже по технологической цепочке, практически не оставляя отходов (Bowyer et al., 2012). Помимо сжигания для выработки энергии, использование деревьев малого диаметра и отходов переработки для производства пиломатериалов и изделий из древесных композитов может сохранять углерод в течение более длительного периода. Инновационные изделия из древесины, такие как массивные древесные панели и жесткие изоляционные панели из древесного волокна низкой плотности, широко используются в строительных системах для замены материалов с высоким содержанием углерода из стали, бетона, кирпича и изоляции на нефтяной основе, которые могут расширить применение древесины и сокращение воплощенного углерода (Cetiner, Shea, 2018; Cabeza et al., 2021).

Кроме того, передовые технологии обработки древесины, такие как прессование и термическая обработка пиломатериалов, позволяют продлить срок службы деревянных изделий для наружного использования до 50 лет и больше (Brischke et al., 2006).

Представление отчетности по заготовленным лесоматериалам в Национальном кадастре выбросов и поглощений парниковых газов Российской Федерации

Структура лесной промышленности и цепочки движения материалов лесозаготовки в Российской Федерации в общем виде представлена на рис. 1.

Продукция лесозаготовки включена в Национальную систему инвентаризации парниковых газов Российской Федерации как одна из категорий сектора ЗИЗЛХ (НДК, 2023). В Национальном кадастре выбросов и поглощений парниковых газов Российской Федерации применяется «производственный» подход. Как уже отмечалось выше, при применении «производственного» подхода страна-производитель сообщает об изменениях запасов углерода в результате производства ЗЛМ внутри страны, независимо от того, где физически потребляются и используются ЗЛМ. Таким образом, пул ЗЛМ состоит из всех продуктов, изготовленных из древесины, которые производятся внутри страны, то есть тех продуктов, которые потребляются внутри страны, а также

тех продуктов, которые экспортируются и используются в других странах. Для расчетов используются коэффициенты и «периоды полураспада» по умолчанию, приведенные в Руководящих принципах МГЭИК (IPCC, 2019). Оценка запасов углерода в ЗЛМ приводится с 1961 года согласно методологии МГЭИК (рис. 2).

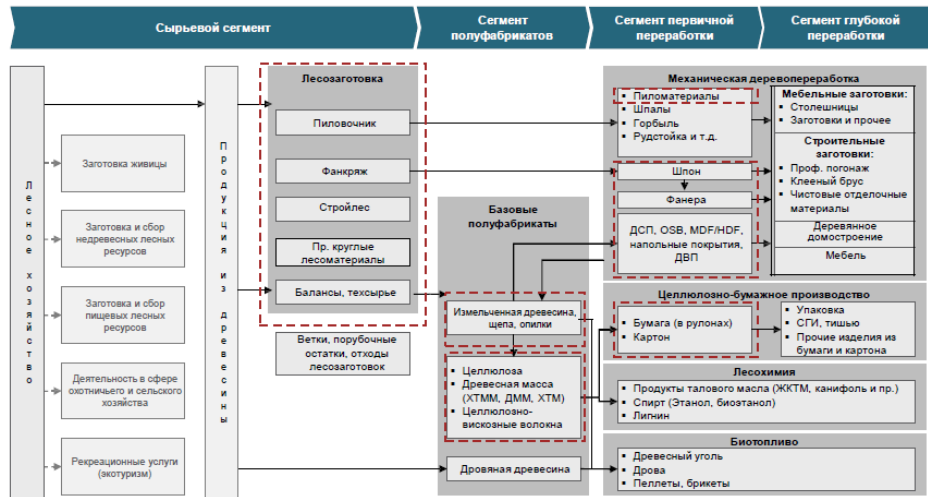


Рисунок 1. Структура лесной промышленности Российской Федерации.

Источник: исследование *What Wood* в рамках сотрудничества с FSC (Forest Stewardship Council) России, открытый доступ (<https://ru.fsc.org/preview.fsc-2016-2018.a-3141.pdf>)

Figure 1. Structure of the forest industry of the Russian Federation.

Source: *WhatWood* research in the framework of cooperation with FSC (Forest Stewardship Council) of Russia, open access (<https://ru.fsc.org/preview.fsc-2016-2018.a-3141.pdf>)

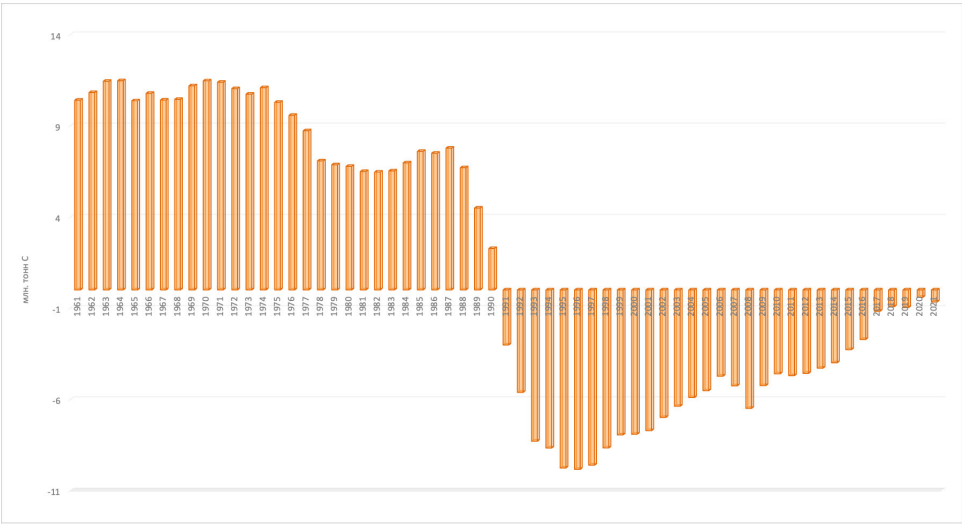


Рисунок 2. Годовое изменение запасов углерода в пуле заготовленных лесоматериалов (НДК, 2023)

Figure 2. Annual change in carbon stocks in the harvested wood product pool (NDK, 2023)

Основными факторами, влияющими на изменение запасов углерода в пуле ЗЛМ на национальном уровне, являются: внутренний уровень заготовки древесины, доли пиловочника, балансовой и древесины для энергетических целей, а также срок службы древесных изделий и их конечное использование, в том числе утилизация или переработка.

Исходными данными для расчёта баланса парниковых газов в пуле ЗЛМ являются информация, характеризующая хозяйственную деятельность лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, данные о производстве, импорте и экспорте круглого леса, пиломатериалов, фанеры, древесно-стружечные плит (ДСП), древесноволокнистых плит (ДВП) и бумажной продукции за период с 1961 г. по отчётный год Национального кадастра.

Данные по производству основных видов древесной продукции в 1961-1989 гг. были взяты из статистических ежегодников «Народное хозяйство Российской Советской Федеративной Социалистической Республики (РСФСР)», а начиная с 1990 года и по настоящее время – из «Российских статистических ежегодников» (1991-2022).

Данные по экспорту и импорту за 1961-1990 гг. были получены из ежегодных статистических сборников «Внешняя торговля СССР», за 1990-1993 гг. – из статистических ежегодников Росстата, с 1994 по настоящее время используются данные Федеральной таможенной службы (ФТС) России.

В динамике баланса углерода в пуле заготовленных лесоматериалов условно можно выделить два периода: 1961-1990 гг. и 1991 г. – по настоящее время (см. рис. 2). В период с 1961 г. по 1990г. баланс углерода отражает накопление углерода в ЗЛМ. В дальнейшем, в период с 1991 по 2021 г. пул ЗЛМ являлся нетто-источником потерь углерода. Общее ухудшение экономической ситуации в РФ в начале 1990-х годов привело к кризису в лесопромышленном комплексе, вследствие чего снизились объёмы вывоза древесины с мест заготовок (невостребованная древесина), значительно сократились объёмы производства древесной продукции и увеличился экспорт древесины и продуктов ее переработки. Отсюда можно наблюдать резкое изменение знака на графике в 1991 году. С 1996 г. наблюдается сокращение потерь углерода. Такая тенденция связана в первую очередь с увеличением производства ЗЛМ и уменьшением экспорта необработанной древесины и пиломатериалов. Однако, пул ЗЛМ по-прежнему остается нетто-источником парниковых газов и не достигает показателей докризисного периода.

Заключение

В данной работе представлен обзор литературных источников, которые приводят уточненные значения «периода полураспада» различных категорий древесной продукции на основе подробных данных по древесной продукции по конкретным странам и регионам. Как видно из приведенных в литературе исследованиях, «периоды полураспада» по умолчанию МГЭИК, которые в настоящее время используются для расчетов в Национальном кадастре,

сильно занижены. Кроме того, значения по умолчанию не учитывают тот факт, что модели производства древесной продукции меняются с течением времени и, соответственно, расчетные средние значения «периода полураспада» будут также меняться с течением времени. Хотя в Руководящих принципах (МГЭИК, 2006, том 4, глава 12, табл. 12.6) упоминалось, что «период полураспада (может) изменяться с течением времени», очень немногие исследования посвящены динамическим изменениям «периода полураспада» на национальном уровне в течение более длительного периода времени. В работе (Skog, 2008), например, использует метод Уровня 3, который включает изменение «периода полураспада» с течением времени для оценки вклада углерода ЗЛМ.

Основная проблема по оценке пула ЗЛМ и «периодов полураспада» связана, главным образом, с неопределенностью допущений в распределении ЗЛМ в каждой категории и подкатегории древесных изделий. Оценочные неопределенности для значений «периода полураспада» варьируются от $\pm 30\%$ (Donlan et al., 2012) до $\pm 50\%$ (IPCC, 2003). Повышение достоверности может быть достигнуто за счет дальнейших исследований распределения ЗЛМ по различным категориям и разработки полного набора национальных «периодов полураспада»/сроков службы для всех древесных изделий.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Распоряжения Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 г. № 3240-р «Об утверждении инновационного проекта «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Список литературы

МГЭИК (2006) *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 г. Подготовлены Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов.* Под ред. С. Игглестона, Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара и К.Танабе, ИГЕС, Хайяма.

НДК (2023) *Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2021 гг. в 2 томах,* Москва.

Aktas, C.B., Bilec, M.M. (2012) Impact of lifetime on US residential building LCA results, *Int. J. Life Cycle Assess*, no. 17, pp. 337-349.

Bird, D.N. (2013) The benefits of using an Austrian specific model for emissions from paperproducts, *Working paper* http://www.smartforests.at/linked/d.05_hwp_-_paper_accounting.pdf.

Bowyer, J.L., Bratkovich, D.S., Fernholz, K. (2012) *Utilization of harvested wood by the North American forest products industry*, Dovetail Partners Outlook, 22 p.

- Braun, M., Winner, G., Schwarzbauer, P., Stern, T. (2016) Apparent half-life-dynamics of harvested wood products (HWPs) in Austria, Development and analysis of weighted time-series for 2002 to 2011, *Forest Policy and Economics*, no. 63, pp. 28-34.
- Brischke, C., Bayerbach, R., Otto Rapp, A. (2006) Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products, *Wood Mater. Sci. Eng.*, no. 1, pp. 91-107, doi: 10.1080/17480270601019658.
- Brunet-Navarro, P., Jochheim, H., Muys, B. (2016) Modelling carbon stocks and fluxes in the wood product sector: a comparative review, *Glob Chang Biol*, vol. 22(7), pp. 2555-2569.
- Burschel, P., Kursten, E., Larson, B.C., Weber, M. (1993) Present role of German forests and forestry in the national carbon budget and option to increase, *Water, Air, and Soil Pollution*, no. 70, pp. 325-340.
- Cabeza, L.F., Boquera, L., Chafer, M., Verez, D. (2021) Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis, *Energy Build.*, vol. 231, 66 p., doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110612, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110612.
- Cetiner, I., Shea, A.D. (2018) Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings, *Energy Build.*, no. 168, pp. 374-384, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.019.
- Chang, Y.S., Han, Y., Park, J.H., Son, W.L., Park, J.S., Park, M.J., Yeo, H. (2014) Study on methods for determining half-life of domestic wooden panel among harvested wood products, *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, no. 42(3), pp. 309-317, doi: 10.5658/WOOD.2014.42.3.309.
- Donlan, J., Skog, K., Byrne, K. A. (2012) Carbon storage in harvested wood products for Ireland 1961-2009, *Biomass and Bioenergy*, 46, 731-738, <https://doi.org/http://10.1016/j.biombioe.2012.06.018>.
- Dymond, C. (2012) Forest carbon in North America: annual storage and emissions from British Columbia's harvest, *Carbon Balance and Management*, p. 1-20.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2003) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa Prefecture, Japan..
- IPCC (2019) *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, in Calvo Buendia, E. Tanabe, K. Kranjc, A. Baasansuren, J. Fukuda, M. Ngarize, S. Osako, A. Pyrozhenko, Y. Shermanau, P. and Federici, S. (eds), Published IPCC, Switzerland.
- IPCC (2014, 2013) *Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol*, in T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T.G. Troxler (eds.), Published IPCC, Switzerland.
-

- Jasinevicius, G., Marcus, Lindner, Emil, Cienciala, Markku, Tykkylainen (2018) Carbon Accounting in Harvested Wood Products: Assessment Using Material Flow Analysis Resulting in Larger Pools Compared to the IPCC Default Method, *Journal of Industrial Ecology, Yale University*, vol. 22(1), pp. 121-131.
- Kapur, A., Keoleian, G., Kendall, A. Kesler, S.E. (2008) Dynamic modeling of in-use cement stocks in the United States, *J. Ind. Ecol.*, no. 12, pp. 539-556.
- Karjalainen, T., Kellomaki, S., Pussinen, A. (1994) Role of Wood-based Products in Absorbing Atmospheric Carbon, *Silva Fennica*, no. 28(2), pp. 67-80.
- Li, L., Wei, X., Zhao, J., Hayes, D., Daigneault, A., Weiskittel, A., et al. (2022) Technological advancement expands carbon storage in harvested wood products in Maine, USA, *Biomass Bioenergy*, vol. 161, 26 p., doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106457.
- Matsumoto, R., Kayo, C., Kita, S. et al. (2022) Estimation of carbon stocks in wood products for private building companies, *Sci Rep.*, no. 12. pp. 1-10, doi: 10.1038/s41598-022-23112-0.
- Miatto, A., Schandl, H., Tanikawa, H. (2017) How important are realistic building lifespan assumptions for material stock and demolition waste accounts, *Resour. Conserv. Recycl.*, no.122, pp. 143-154.
- Nabuurs, G.J. (1996) *Significance of wood products in forest sector carbon balances. Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle*, NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Pingoud, K., Perälä, A. L., Soimakallio, S., Pussinen, A. (2003) *Greenhouse gas impacts of harvested wood products*, Evaluation and development of methods, VTT research notes 2189, Espoo, Finland.
- Pingoud, K., Wagner F. (2006) Methane emissions from landfills and carbon dynamics of harvested wood products: the first-order decay revisited, *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, no. 11, pp. 961-978.
- Profft, I., Mund, M., Weber, G.E., Weller, E., Schulze, E.D. (2009) Forest management and carbon sequestration in wood products, *Eur J Forest Res.*, doi: 10.1007/s10342-009-0283-5.
- Sandberg, N. H., Sartori, I., Brattebo, H. (2014) Using a dynamic segmented model to examine future renovation activities in the Norwegian dwelling stock, *Energy Build.*, no. 82, pp. 287-295.
- Sanquetta, C., Tomé, M., Dias, A., Maas, G., Sanquetta, F. and Corte, A. (2019) Carbon storage and CO₂ dynamics from wood products harvested in Brazil during 1900-2016, *Carbon Management*, no. 10(4), 417-429.
- Sato, A., Nojiri, Y. (2019) Assessing the contribution of harvested wood products under greenhouse gas estimation: accounting under the Paris Agreement and the potential for double-counting among the choice of approaches, *Carbon Balance and Management*, no. 14(1), pp. 1-19.
-

Shmulsky, R., Jones, P.D. (2019) *Forest products and wood science*. An introduction Hoboken NJ, John Wiley Sons, Inc, doi: 10.1002/9781119426400.

Skog, K. (2008) Sequestration of carbon in harvested wood products for the United States, *Forest Products Journal*, no. 58(6), pp. 56-72.

Skog, K., Nicholson, G. (1998) Carbon cycling through wood products: the role of wood and paper products in carbon sequestration, *For. Prod. J*, no. 48 (7-8), pp. 75-83.

Soimakallio, Sampo, Fehrenbach, Horst, Sironen, Susanna, Myllyviita, Tanja, Adballa, Nabil, Seppälä, Jyri (2022) Fossil carbon emission substitution and carbon storage effects of wood-based products, *Reports of the Finnish Environment Institute*, no. 22, 93 p.

Steel, E.A. (2021) *Carbon Storage and Climate Change Mitigation Potential of Harvested Wood Products*, Draft Background Paper prepared for the 61st Session of the FAO Advisory Committee on Sustainable Forest-based Industries. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Forest Products and Statistics Team, 37 p.

Vásquez, F., Løvik, A.N., Sandberg, N.H., Müller, D.B. (2016) Dynamic type-cohort-time approach for the analysis of energy reductions strategies in the building stock, *Energy Build*, no. 111, pp. 37-55.

References

MGEIK (2006) *Rukovodyashchie principy nacional'nyh inventarizacij parnikovyh gazov MGEIK 2006 g./Podgotovleny Programmoj MGEIK po nacional'nym kadastram parnikovyh gazov* [National Greenhouse Gas Inventory Guidelines Prepared by the IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme] in S. Igglestona, L. Buendia, K. Miva, T. Ngara, K.Tanabe (eds.), vol. 1-5, IGES, Hajyama.

NDK (2023) *Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov Iz istochnikov I absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov, ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom za 1990-2021 gg. v 2 tomah* [National Report on the Inventory of Anthropogenic Emissions by Sources and Removals by Sinks of Greenhouse Gases Not Controlled by the Montreal Protocol, 1990-2021, 2 volumes], Moscow, Russia.

Aktas, C.B., Bilec, M.M. (2012) Impact of lifetime on US residential building LCA results, *Int. J. Life Cycle Assess*, no. 17, pp. 337-349.

Bird, D.N. (2013) The benefits of using an Austrian specific model for emissions from paperproducts, *Working paper* http://www.smartforests.at/linked/d.05_hwp_-_paper_accounting.pdf.

Bowyer, J.L., Bratkovich, D.S., Fernholz, K. (2012) *Utilization of harvested wood by the North American forest products industry*, Dovetail Partners Outlook, 22 p.

- Braun, M., Winner, G., Schwarzbauer, P., Stern, T. (2016) Apparent half-life-dynamics of harvested wood products (HWPs) in Austria, Development and analysis of weighted time-series for 2002 to 2011, *Forest Policy and Economics*, no. 63, pp. 28-34.
- Brischke, C., Bayerbach, R., Otto Rapp, A. (2006) Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products, *Wood Mater. Sci. Eng.*, no. 1, pp. 91-107, doi: 10.1080/17480270601019658.
- Brunet-Navarro, P., Jochheim, H., Muys, B. (2016) Modelling carbon stocks and fluxes in the wood product sector: a comparative review, *Glob. Chang. Biol.*, vol. 22(7), pp. 2555-2569.
- Burschel, P., Kursten, E., Larson, B.C., Weber, M. (1993) Present role of German forests and forestry in the national carbon budget and option to increase, *Water, Air and Soil Pollution*, no. 70, pp. 325-340.
- Cabeza, L.F., Boquera, L., Chafer, M., Verez, D. (2021) Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis, *Energy Build.*, vol. 231, 66 p., doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110612.
- Cetiner, I., Shea, A.D. (2018) Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings, *Energy Build.*, no. 168, pp. 374-384, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.019.
- Chang, Y.S., Han, Y., Park, J.H., Son, W.L., Park, J.S., Park, M.J., Yeo, H. (2014) Study on methods for determining half-life of domestic wooden panel among harvested wood products, *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, no.42(3), pp. 309-317, doi: 10.5658/WOOD.2014.42.3.309.
- Donlan, J., Skog, K., Byrne, K. A. (2012). Carbon storage in harvested wood products for Ireland 1961-2009, *Biomass and Bioenergy*, 46, 731-738, <https://doi.org/http://10.1016/j.biombioe.2012.06.018>.
- Dymond, C. (2012) Forest carbon in North America: annual storage and emissions from British Columbia's harvest, *Carbon Balance and Management*, p. 1-20.
- Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2003) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry; Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa Prefecture, Japan..
- IPCC (2019) *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, in Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds.). Published IPCC, Switzerland.
- IPCC (2014, 2013) *Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol*, in T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, T.G. Troxler (eds.), Published IPCC, Switzerland.
-

- Jasinevicius G., Marcus Lindner, Emil Cienciala, Markku Tykkylainen (2018) Carbon Accounting in Harvested Wood Products: Assessment Using Material Flow Analysis Resulting in Larger Pools Compared to the IPCC Default Method, *Journal of Industrial Ecology*, Yale University, vol. 22(1), pp. 121-131.
- Kapur, A., Keoleian, G., Kendall, A. Kesler, S.E. (2008) Dynamic modeling of in-use cement stocks in the United States, *J. Ind. Ecol.*, no. 12, pp. 539-556.
- Karjalainen, T., Kellomaki, S., Pussinen, A. (1994) Role of Wood-based Products in Absorbing Atmospheric Carbon, *Silva Fennica*, no. 28(2), pp. 67-80.
- Li, L., Wei, X., Zhao, J., Hayes, D., Daigneault, A., Weiskittel, A., et al. (2022) Technological advancement expands carbon storage in harvested wood products in Maine, USA, *Biomass Bioenergy*, doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106457.
- Matsumoto, R., Kayo, C., Kita, S. et al. (2022) Estimation of carbon stocks in wood products for private building companies, *Sci Rep.*, no. 12. pp. 1-10, doi: 10.1038/s41598-022-23112-0.
- Miatto, A., Schandl, H., Tanikawa, H. (2017) How important are realistic building lifespan assumptions for material stock and demolition waste accounts, *Resour. Conserv. Recycl.*, no.122, pp. 143-154.
- Nabuurs, G.J. (1996) *Significance of wood products in forest sector carbon balances. Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle*, NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Pingoud, K., Perälä, A. L., Soimakallio, S., Pussinen, A. (2003) *Greenhouse gas impacts of harvested wood products*. Evaluation and development of methods, VTT research notes 2189, Espoo, Finland.
- Pingoud, K., Wagner F. (2006) Methane emissions from landfills and carbon dynamics of harvested wood products: the first-order decay revisited, *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, no. 11, pp. 961-978.
- Profft, I., Mund, M., Weber, G.E., Weller, E., Schulze, E.D. (2009) Forest management and carbon sequestration in wood products, *Eur. J. Forest Res.*, doi: 10.1007/s10342-009-0283-5.
- Sandberg, N. H., Sartori, I., Brattebo, H. (2014) Using a dynamic segmented model to examine future renovation activities in the Norwegian dwelling stock, *Energy Build.*, no. 82, pp. 287–295.
- Sanquetta, C., Tomé, M., Dias, A., Maas, G., Sanquetta, F. and Corte, A. (2019) Carbon storage and CO₂ dynamics from wood products harvested in Brazil during 1900-2016, *Carbon Management*, no. 10(4), 417-429.
- Sato, A., Nojiri, Y. (2019) Assessing the contribution of harvested wood products under greenhouse gas estimation: accounting under the Paris Agreement and the potential for double-counting among the choice of approaches, *Carbon Balance and Management*, no. 14(1), pp. 1-19.
-

Shmulsky, R., Jones, P.D. (2019) Forest products and wood science. An introduction Hoboken NJ, *John Wiley Sons, Inc.*, doi: 10.1002/9781119426400.

Skog, K. (2008) Sequestration of carbon in harvested wood products for the United States, *Forest Products Journal*, no. 58(6), pp. 56-72.

Skog, K., Nicholson, G. (1998) Carbon cycling through wood products: the role of wood and paper products in carbon sequestration, *For. Prod. J.*, no. 48 (7-8), pp. 75-83.

Soimakallio, Sampo, Fehrenbach, Horst, Sironen, Susanna, Myllyviita, Tanja, Adballa, Nabil, Seppälä, Jyri (2022) Fossil carbon emission substitution and carbon storage effects of wood-based products, *Reports of the Finnish Environment Institute*, no. 22, 93 p.

Steel, E.A. (2021) *Carbon Storage and Climate Change Mitigation Potential of Harvested Wood Products*, Draft Background Paper prepared for the 61st Session of the FAO Advisory Committee on Sustainable Forest-based Industries. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Forest Products and Statistics Team. 37 p.

Vásquez, F., Løvik, A.N., Sandberg, N.H., Müller, D.B. (2016) Dynamic type-cohort-time approach for the analysis of energy reductions strategies in the building stock, *Energy Build*, no. 111, pp. 37-55.

Статья поступила в редакцию (Received): 29.01.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 19.05.2024.

Для цитирования / For citation

Полумиева, П.Д., Трунов, А.А. (2024) Анализ возможности уточнения «периодов полураспада» древесной продукции для оценки запасов углерода в заготовленных лесоматериалах, *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*, т. XXXV, № 1-2, с. 124-139, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-124-139.

Polumieva, P.D., Trunov, A.A. (2024) Analysis of the possibility of refinement the “half-lives” of wood products to assess carbon stocks in the harvested wood products, *Ecological monitoring and ecosystem modelling*, vol. XXXV, no. 1-2, с. 124-139, doi:10.21513/0207-2564-2024-1-2-124-139.