

DOI 10.31509/2658-607x-202362-128
УДК 630.43

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К КАРТОГРАФИРОВАНИЮ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

© 2023 г.

Д. В. Ершов *, Е. Н. Сочилова, Н. В. Королева

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

* E-mail: dvershov67@gmail.com

Поступила в редакцию 10.06.2023
После рецензирования: 23.06.2023
Принята к печати: 23.06.2023

Данные о вертикальной структуре и запасах лесных горючих материалов (ЛГМ) в пространстве имеют большое значение для достоверных оценок прямых пожарных эмиссий углерода. Цель статьи — продемонстрировать методические подходы к картографированию допожарных запасов ЛГМ, в основе которых используются наборы многомерных регрессионных моделей и тематических продуктов характеристик лесов, извлеченных из данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Модели позволяют рассчитать долю подверженных горению фракций биомассы (ветви, листва, подрост, подлесок, напочвенный покров, лесная подстилка, крупные древесные остатки) лесных экосистем для основных лесообразующих пород разного возраста, относительной полноты и бонитета на всей территории России с учетом географического районирования. В статье приводятся входные тематические продукты лесов, которые используются в моделях расчета фракций биомассы. Приводятся результаты предварительного сравнения оценок запасов биомассы верхнего полога, полученных на основе спутниковых продуктов и данных лесной таксации на уровне лесничеств Костромской области.

Ключевые слова: лесные горючие материалы, биомасса, углерод, дистанционный мониторинг, дистанционное зондирование Земли

Современное картографирование лесных (растительных) горючих материалов развивается в области определения пирологических категорий растительности. В основе составления карт лесных горючих материалов (ЛГМ) лежит классификация этих материалов. Исторически сложилось так, что в крупнейших лесных державах России, Канаде, США использо-

вались разные подходы к классификации растительных горючих материалов (РГМ).

Первые попытки построить карты типов горючих материалов в лесах сделаны в США в 1930-х гг., с 1941 г. при составлении карт стали использовать аэрофотоснимки. В последующие годы разработки классификаций горючих материалов продолжались (Hornby, 1935; Bruce, 1951;

Davis et al., 1959; Muraro, 1965), и в 1972 г. в США была разработана национальная система оценки пожарной опасности NFDRS (National Fire Dander Rating System), в которой вся растительность разделяется на пирологические типы — топливные модели как типовые комплексы РГМ.

Типовой метод нашел свое развитие и в Канаде. Современная канадская система оценки пожарной опасности в лесах CFFDRS (Canadian Forest Fire Danger Rating System) создавалась с 1968 г. Она состоит из подсистемы FWI для оценки пожарной опасности и подсистемы FBP для прогноза поведения пожаров (Фильков, 2014). При разработке системы прогноза поведения лесных пожаров для Канады выделялись типовые комплексы РГМ (Alexander et al., 1984; Forestry Canada, 1992). Система CFFDRS на сегодняшний день является одной из самых разработанных и широко применяющейся. Кроме Канады ее адаптировали для своих территорий Новая Зеландия, Фиджи, Мексика, США и страны Юго-Восточной Азии.

В России оценивать пожарную опасность в лесу стали с 1930-х гг. Лесные горючие материалы делили на первичные (опад, сухая трава, определенные виды живого напочвенного покрова, валеж, гнилые пни, порубочные остатки) и вторичные (надземные части леса, сухостойные деревья) объекты загорания (Мелехов, 1936, 1947; Мелехов, Душа-Гудым, 1979). В России проводились многолетние фундаментальные исследования скорости пожарно-

го созревания растительных материалов и динамики их горения в разных регионах. Разработка детальной классификации РГМ была начата и продолжается по настоящее время в лаборатории лесной пирологии Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (Волокитина, Софронова, 2014). Профессор Н. П. Курбатский (1962, 1970) выделил группы РГМ, учитывая их местоположение в биогеоценозе и выполняемую ими функцию при пожаре, а также разделил их на три категории: 1) проводники горения, 2) поддерживающие горение, 3) задерживающие горение. К настоящему времени разработаны разные методы составления карт РГМ различных масштабов.

Исследования, представленные в данной статье, демонстрируют возможности построения карт ЛГМ для всей территории России с использованием многомерных регрессионных моделей оценки фитомассы по слоям вертикального профиля лесных насаждений и тематических карт характеристик лесов, полученных на основе обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), как входных параметров в регрессионные модели.

Растительная масса лесного биогеоценоза образует сложную и неоднородную вертикальную структуру меняющихся в пространстве слоев горючих материалов, по которым распространяется природный пожар. Полнота сгорания органической лесной массы, скорость распространения огня, интенсивность и другие характеристики горения зависят от свойств горючих

материалов, их количества и структуры. Лесные горючие материалы классифицируются по типам проводников горения лесов для низовых и верховых пожаров. Основными проводниками горения для верховых пожаров служат хвоя в кронах деревьев, ветви, сучья, для низовых пожаров — напочвенный растительный покров и лесная подстилка. Все остальные фракции ЛГМ в основном поддерживают (задерживают) горение, или способствуют переходу от низовых пожаров в верховые и обратно (Курбатский, 1970; Волокитина, Софронов, 2002; Волокитина, Софронова, 2014). В зависимости от участия в процессе горения ЛГМ структурно разделены на следующие слои:

1. Фитомасса деревьев (верхний ярус)
 - 1.1. Ветви живые, диаметр менее 1 см
 - 1.2. Листья и хвоя
2. Нижние яруса леса
 - 2.1. Подрост и подлесок
 - 2.2. Живой напочвенный покров — совокупность мхов, лишайников, травянистых растений и полукустарников
3. Крупные древесные остатки (КДО)
 - 3.1. Сухостой (включая сухие ветви в кронах живых деревьев) — стоящие погибшие деревья в лесу, на горях, вырубках, в местах массового размножения вредных насекомых, от засух, пни на вырубках
 - 3.2. Валеж — упавшие стволы деревьев
4. Лесная подстилка — наземный и подземный опад растений напочвенного покрова и древесного яруса разной степени разложения и трансформации (опад кустарничков, трав, лишайников, мхов, ветошь, опавшая с деревьев хвоя, листва, веточки, а также мелкие порубочные остатки на вырубках), формирующий горизонт подстилки лесных почв.

Запасы фитомассы по фракциям оцениваются с помощью многомерных регрессионных моделей, регионально-адаптированных к спутниковым тематическим продуктам и данным наземных измерений характеристик растительности лесных экосистем.

Спутниковые данные позволяют поддерживать актуальность с определенной точностью тематических карт растительного покрова наземных экосистем с использованием методов ежегодного мониторинга территории России. Однако достоверность и полнота оценки площадей пожаров и прямых пирогенных эмиссий от лесных пожаров зависит от пространственного разрешения, точности распознавания классов и актуальности спутниковых тематических продуктов, учета данных для всех слоев ЛГМ, на основе которых создаются карты растительных горючих материалов основных проводников горения наземных экосистем (Kukavskaya et al., 2013; van Wees et al., 2022). В результате различий подходов и исходных дан-

ных допожарных запасов ЛГМ существующие оценки пирогенных эмиссий от лесных пожаров находятся в очень широком диапазоне (Kukavskaya et al., 2013; Ершов, Сочилова, 2020, 2022). Пространственная база данных ЛГМ, созданная в ЦЭПЛ РАН для повышения достоверности оценок прямых пирогенных эмиссий углерода от лесных пожаров, постоянно обновляется новыми слоями и данными с использованием новых спутниковых тематических продуктов, данных наземных измерений и математических моделей оценки фитомассы и углерода.

Можно выделить несколько периодов создания карт запасов ЛГМ для всей России в рамках научных исследований лабораторией мониторинга лесных экосистем ЦЭПЛ РАН.

I. 2003–2008 гг. Создание карт ЛГМ с использованием карты растительности наземных экосистем (SPOT-VEGETATION, пространственное разрешение 1 км) (Bartalev et al., 2003), а также статистических данных учета лесного фонда за 2003 г. (Лесной фонд..., 2004) по лесхозам, данных о запасах фитомассы подроста и подлеска на уровне субъектов (Швиденко и др., 2007), базы наземных обследований фитомассы (Уткин и др., 1994), конверсионных коэффициентов (Замолотчиков и др., 2003).

II. 2006–2022 гг. Создание карт ЛГМ с использованием карты растительности России (MODIS, пространственное разрешение 230 м) (Барталев и др., 2011). При-

менялись те же статистические данные учета лесного фонда и данные о запасах фитомассы, база наземных обследований фитомассы, что и на I этапе.

III. С 2022 г. по настоящее время. Использование новых типов тематических продуктов, полученных по данным MODIS (пространственное разрешение 230 м): карты лесных пород, их возраста, классов бонитета, относительной полноты, сомкнутости и запасов древостоев (Карточка проекта РФ 19-77-30015); а также конверсионных коэффициентов (Schepaschenko et al., 2018; Швиденко и др., 2008; Shvidenko et al., 2023; Щепашенко и др., 2013). Использованные регрессионные модели позволили дополнить пространственную базу ЛГМ данными о крупных древесных остатках (валеж, сухостой).

Цель представленного в статье исследования — продемонстрировать методические подходы по оценке запасов ЛГМ на основе использования наборов многомерных регрессионных моделей, которые описывают долю различных фракций биомассы (ветви, листва, подрост, подлесок, напочвенный покров, лесная подстилка, крупные древесные остатки) лесных насаждений в зависимости от среднего возраста древостоя, класса бонитета, относительной полноты основных лесобразующих пород на территории РФ с учетом географического районирования, а также провести анализ и сравнение полученных оценок с оценками, полученными по таксационным данным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Принципиальным отличием нового подхода к оценке запасов ЛГМ от предыдущей версии (Сочилова и др., 2009) является использование в расчетах спутниковых продуктов среднего пространственного разрешения MODIS с такими характеристиками лесов на пиксельном уровне, как преобладающая порода, возраст, полнота, запас стволовой древесины, класс бонитета (Карточка проекта РНФ 19-77-30015), а также использование регрессионных моделей расчета запасов основных проводников горения (Швиденко и др., 2008; Щепашенко и др., 2013; Schepaschenko et al., 2018; Shvidenko et al., 2023). Преимуществом нового подхода является возможность создания технологии и ежегодно обновляемой базы запасов ЛГМ на пиксельном уровне.

Для расчета фитомассы ЛГМ в предыдущей версии используются данные государственного учета лесного фонда (ГУЛФ) (Лесной фонд..., 2004) по лесничествам, которые содержат площади (га) и запасы (м^3) основных лесообразующих пород по группам возраста, а также спутниковый продукт по данным SPOT-VEGETATION — карта наземных экосистем (Bartalev et al., 2003), позднее карта растительности по данным MODIS (Барталев и др., 2011), экспериментальные измерения фитомассы подроста, подлеска, напочвенного покрова и лесной подстилки на тестовых площадках в различных типах лесорастительных условий (Уткин и др., 1994), данные о запасах фи-

томассы подроста и подлеска на уровне субъектов (Швиденко и др., 2007), карта лесничеств, карта субъектов. Для определения надземной фитомассы используются конверсионные коэффициенты, настроенные под данные запасов древесных пород и групп возраста из ГУЛФ (Замолотчиков и др., 2003). Запасы фитомассы рассчитываются для каждого лесного класса, представленного на карте растительности в границах лесничеств. База запасов ЛГМ создается на уровне пикселей, но фактически является осреднением запасов групп древесных пород и их возрастов на уровне лесничеств и субъектов РФ. Ежегодное обновление запасов ЛГМ невозможно из-за низкой периодичности обновления базы данных учета лесов ГУЛФ и других исходных данных.

Новый метод расчета запасов фитомассы базируется на анализе спутниковых тематических продуктов MODIS с пространственным разрешением 230 метров (Карточка проекта РНФ 19-77-30015), в каждом пикселе которых записаны следующие характеристики древостоя: преобладающая древесная порода, возраст, класс бонитета, относительная полнота, относительный запас стволовой древесины древостоя ($\text{м}^3/\text{га}$) (рис. 1). В качестве аналитических формул используются регрессионные модели (Швиденко и др., 2008; Щепашенко и др., 2013; Schepaschenko et al., 2018; Shvidenko et al., 2023), с помощью которых для каждой породы с учетом возраста, полноты и бонитета рассчитываются за-

пасы фитомассы. Также используется карта лесорастительных зон (классификация С. Ф. Курнаева) для географического районирования. Оценка ЛГМ с использованием спутниковых тематических продуктов проводилась в геоинформационной системе ArcGISArcMap10. Для этого были разработаны графические модели, созданные таким образом, чтобы можно было их запускать в пакетном режиме для разных

лет. Это необходимо для реализации возможности автоматически обновлять базу данных в случае появления новых версий спутниковых продуктов. В результате создаются карты запасов ЛГМ с пространственным разрешением 230 м с пиксельной детальностью на уровне каждой древесной породы. В настоящее время алгоритмы адаптируются для открытых геоинформационных систем типа Quantum GIS.

(a)

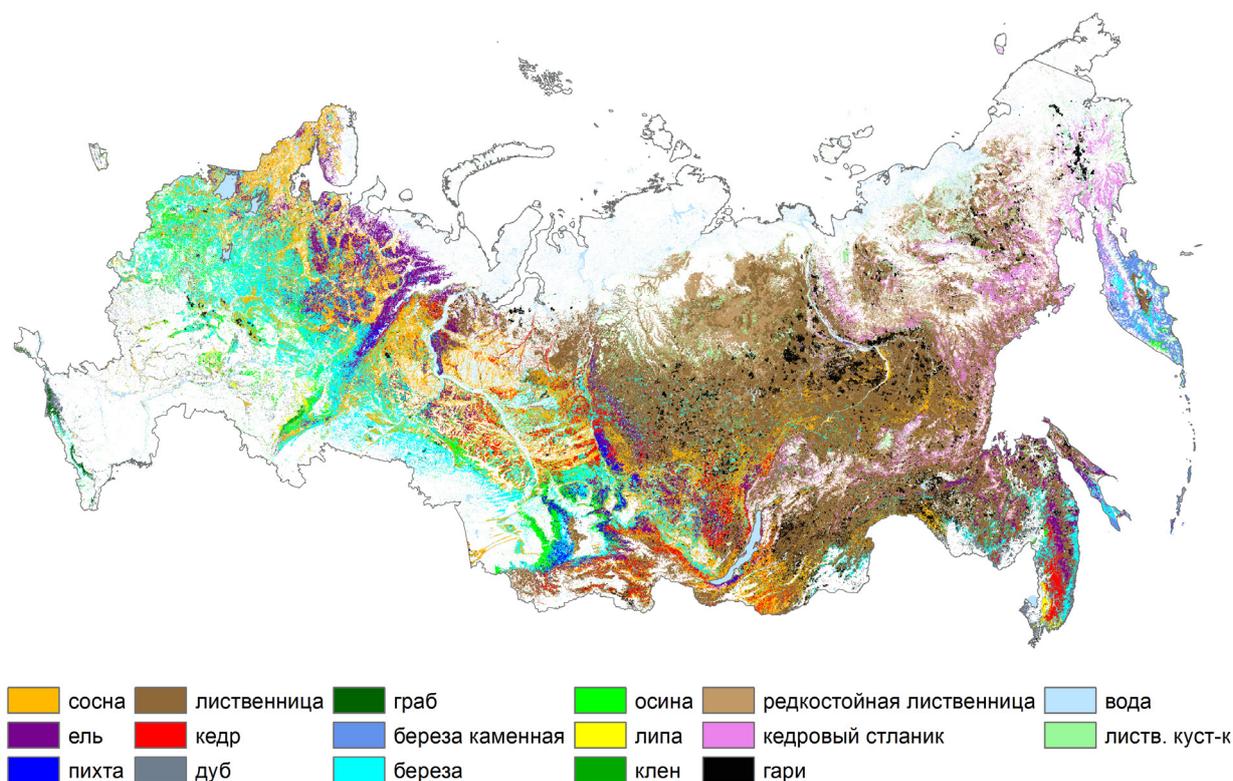
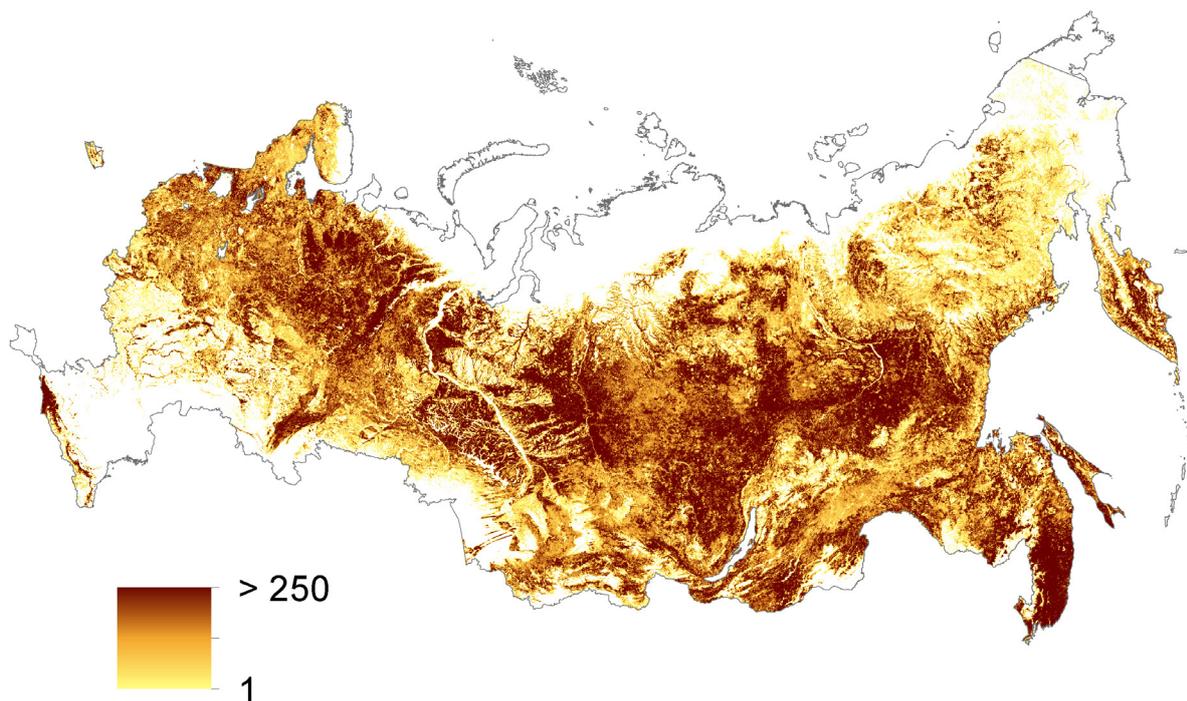


Рисунок 1. Спутниковые тематические продукты (разрешение 230 м) — входные данные для расчета запасов ЛГМ: а — основные лесообразующие породы

(б)



(в)

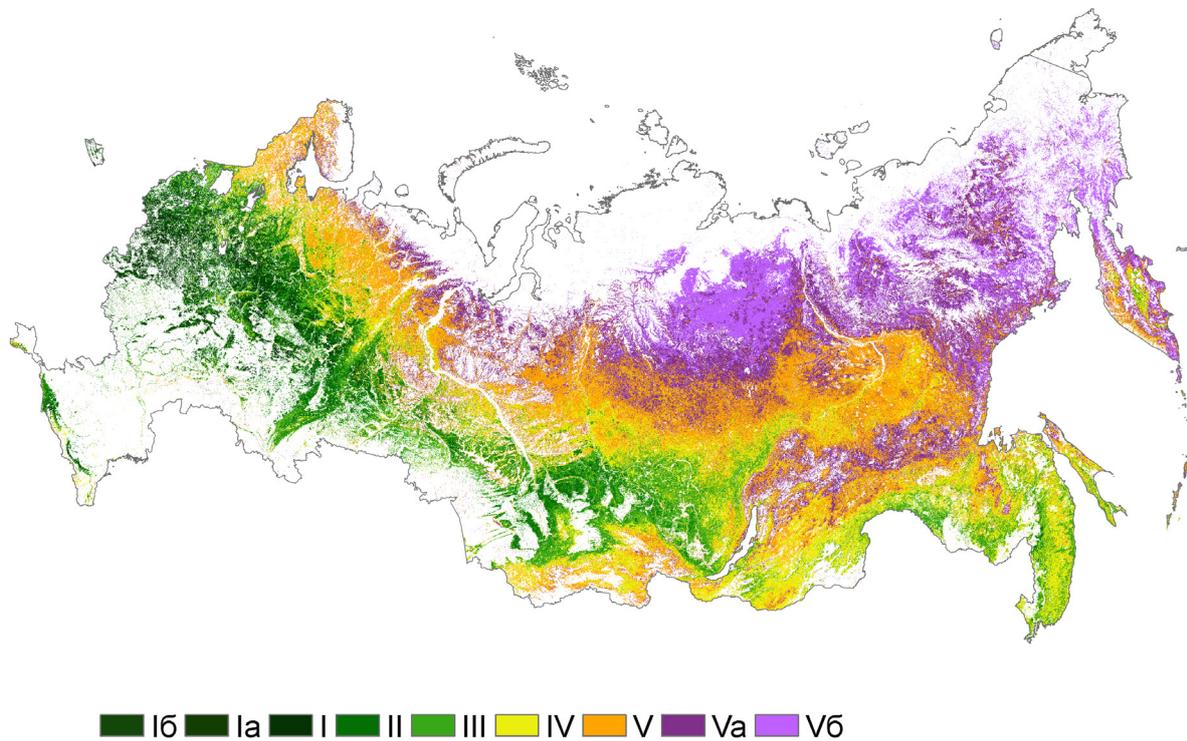
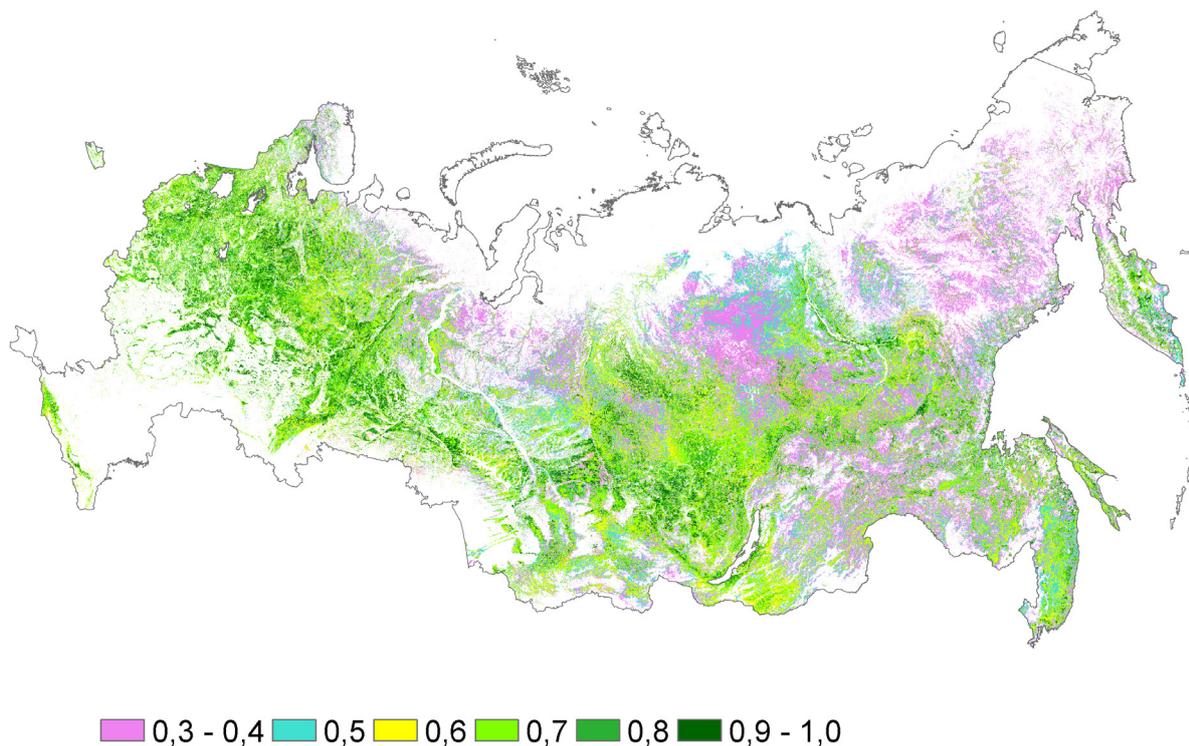


Рисунок 1. Спутниковые тематические продукты (разрешение 230 м) — входные данные для расчета запасов ЛГМ:
 б — возраст насаждений, лет, в — класс бонитета

(г)



(д)

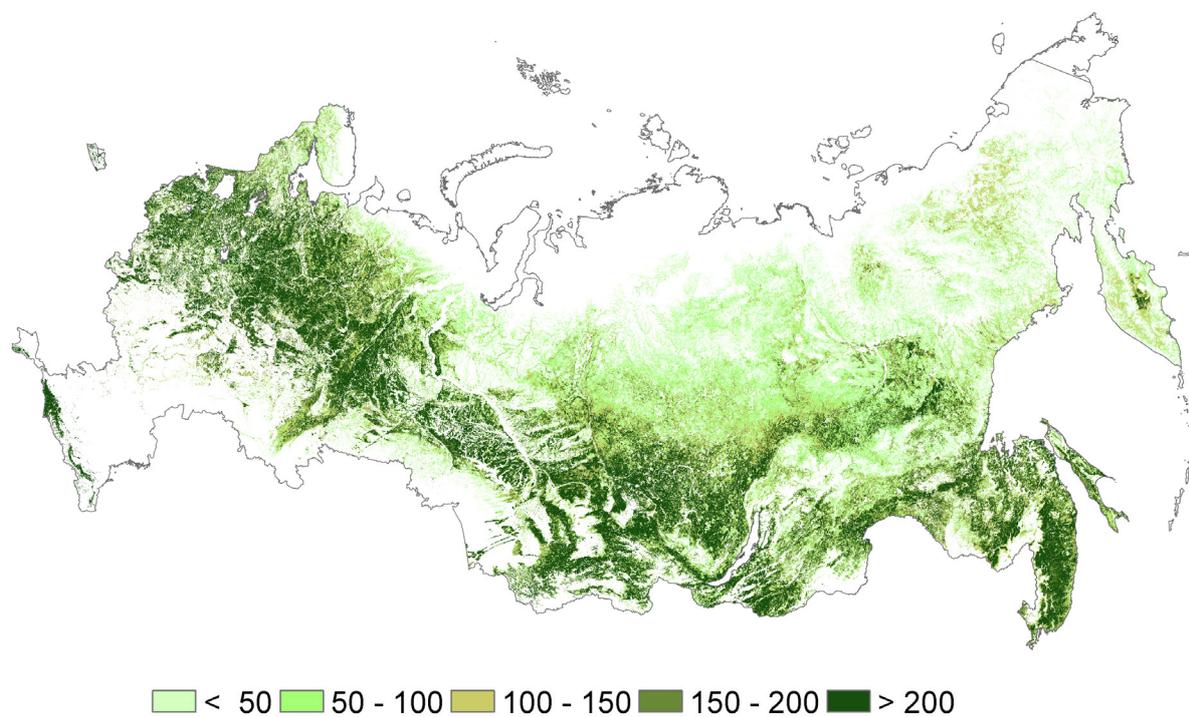


Рисунок 1. Спутниковые тематические продукты (разрешение 230 м) — входные данные для расчета запасов ЛГМ: г — относительная полнота, д — запас стволовой древесины, м³/га

Расчеты запасов верхнего полога по продуктам ДЗЗ

Масса хвои/листвы и мелких веточек в кронах деревьев, являющихся проводниками горения при верховых пожарах, определяется через запасы стволовой древесины с помощью конверсионных коэффициентов.

В качестве аналитической формулы используется регрессионная модель (Schepaschenko et al., 2018), по которой для каждой породы с учетом возраста, полноты и класса бонитета рассчитываются конверсионные коэффициенты перехода от запасов стволовой древесины к запасам фитомассы листвы/хвои и живых ветвей в кронах деревьев. На вход в модель подаются характеристики древостоя в виде спутниковых продуктов с пространственным разрешением 230 м:

где A — возраст (лет); SI — класс бонитета (кодируется через среднюю высоту древостоя в возрасте спелости); RS — относительная полнота; a_0 – a_5 — регрессионные коэффициенты.

Пример кодировки классов бонитета и регрессионные коэффициенты для оценки фитомассы различных фракций древостоя дифференцировано по породам приводятся в публикации Д. Г. Щепашенко с соавторами (Schepaschenko et al., 2018). Схематическое представление модели расчетов конверсионных коэффициентов для верхнего полога представлено на рис. 2.

Расчеты проводились для спутниковых продуктов породной структуры лесов, возраста древостоя, класса бонитета, полноты и запаса стволовой древесины, полученных по данным ДЗЗ в 2018 г.

$$kf = 1/(1 + \exp^{-(a_0+a_1 \times \ln A + a_2 \times \ln SI + a_3 \times \ln RS + a_4 \times A + a_5 \times RS)}) \tag{1}$$

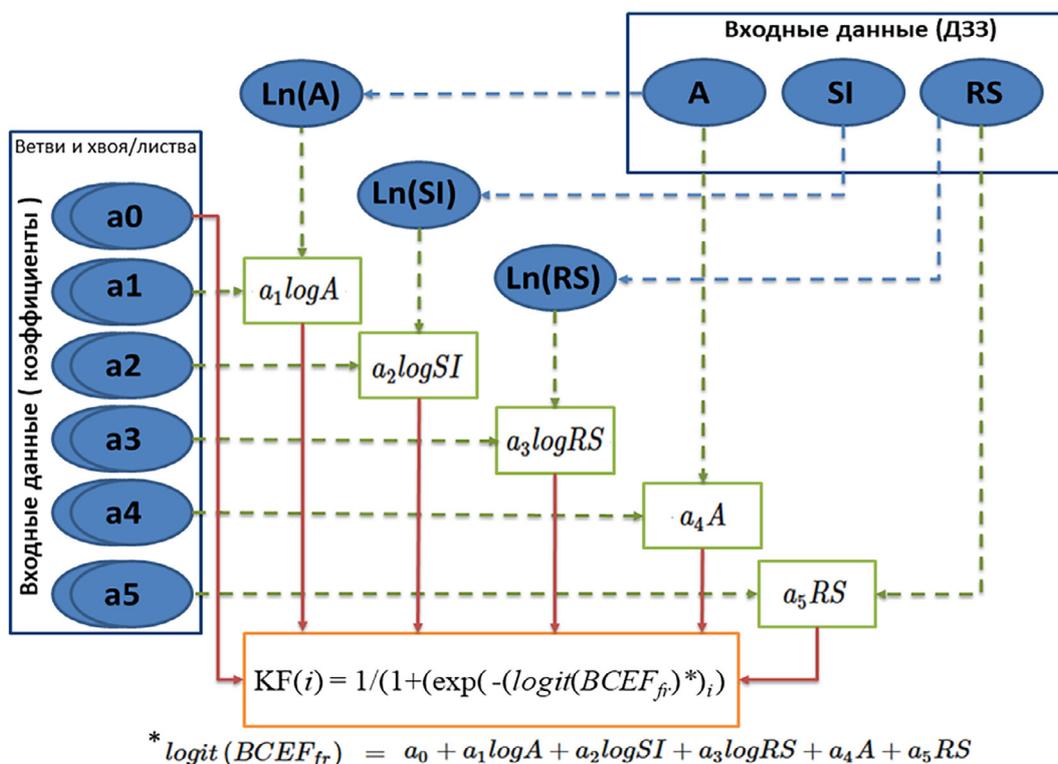


Рисунок 2. Схема расчета конверсионных коэффициентов для i — преобладающей породы хвои/ листвы и ветвей с учетом возраста (A), класса бонитета (SI) и полноты (RS) древостоя

В результате применения модели для каждой древесной породы получены две карты, в пикселах которых записаны значения конверсионных коэффициентов для хвои/листвы или для ветвей (рис. 3). Умножение запаса стволовой древесины ($\text{м}^3/\text{га}$) на соответствующие конверсионные коэффициенты ($\text{т}/\text{м}^3$) дает в каждом пикселе значение фитомассы ($\text{т}/\text{га}$) ветвей или хвои/листвы.

В верхнем пологе древостоя проводниками горения служат тонкие живые ветви деревьев диаметром менее 1 см. Для того

чтобы определить долю фитомассы тонких веток относительно общей фитомассы ветвей крон деревьев, мы провели дополнительный анализ данных о фитомассе древесного яруса на тестовых площадках базы данных фитомассы и продуктивности (Уткин и др., 1994). Оказалось, что в перечне показателей фитомассы ветвей кроме общей их фитомассы в базе данных по 55 тестовым площадкам содержится информация о запасе фитомассы толстых ветвей (диаметром более 1 см). Это позволило нам исследовать связь общей фито-

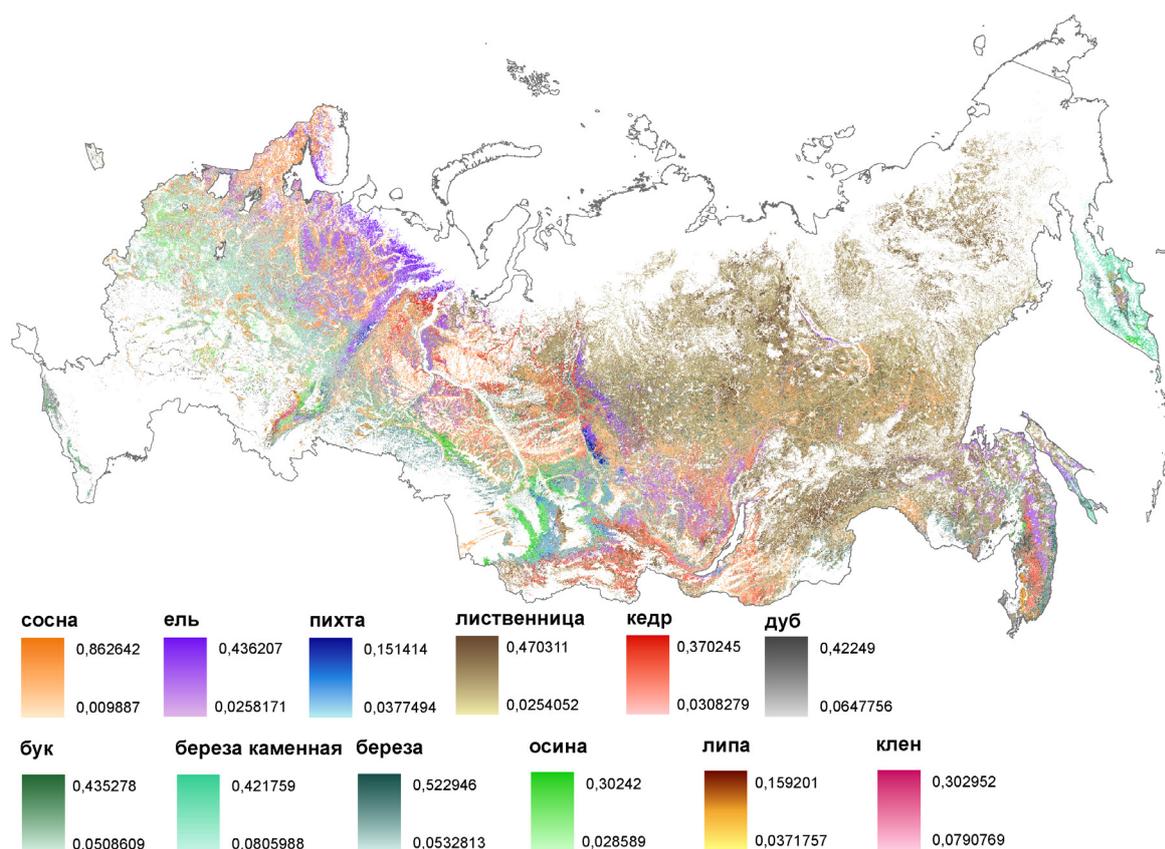


Рисунок 3. Карта конверсионных коэффициентов ($\text{т}/\text{м}^3$) для оценки запаса фитомассы ветвей в кронах деревьев основных лесобразующих пород России

массы ветвей с фитомассой толстых ветвей деревьев. Проанализировав эти два показателя, мы установили, что наблюдается уверенная линейная связь между этими двумя характеристиками (рис. 4), на основе которой можно определить долю запаса фитомассы толстых веток, зная общий запас фитомассы ветвей для всех остальных тестовых площадок, где нет данных о запасе фитомассы толстых ветвей. Величина достоверности аппрок-

симации функции очень высокая ($R^2 = 0.9$), что позволяет использовать уравнение конверсии (2). Затем, восстановив оба параметра, мы смогли вычислить запас фитомассы тонких веток как разность между общей фитомассой и фитомассой толстых ветвей в кронах деревьев:

$$F_{bb} = 0.8125 \times F_{tb} - 2.4323, \quad (2)$$

где F_{bb} — фитомасса ветвей диаметром более 1 см; F_{tb} — общая фитомасса ветвей.

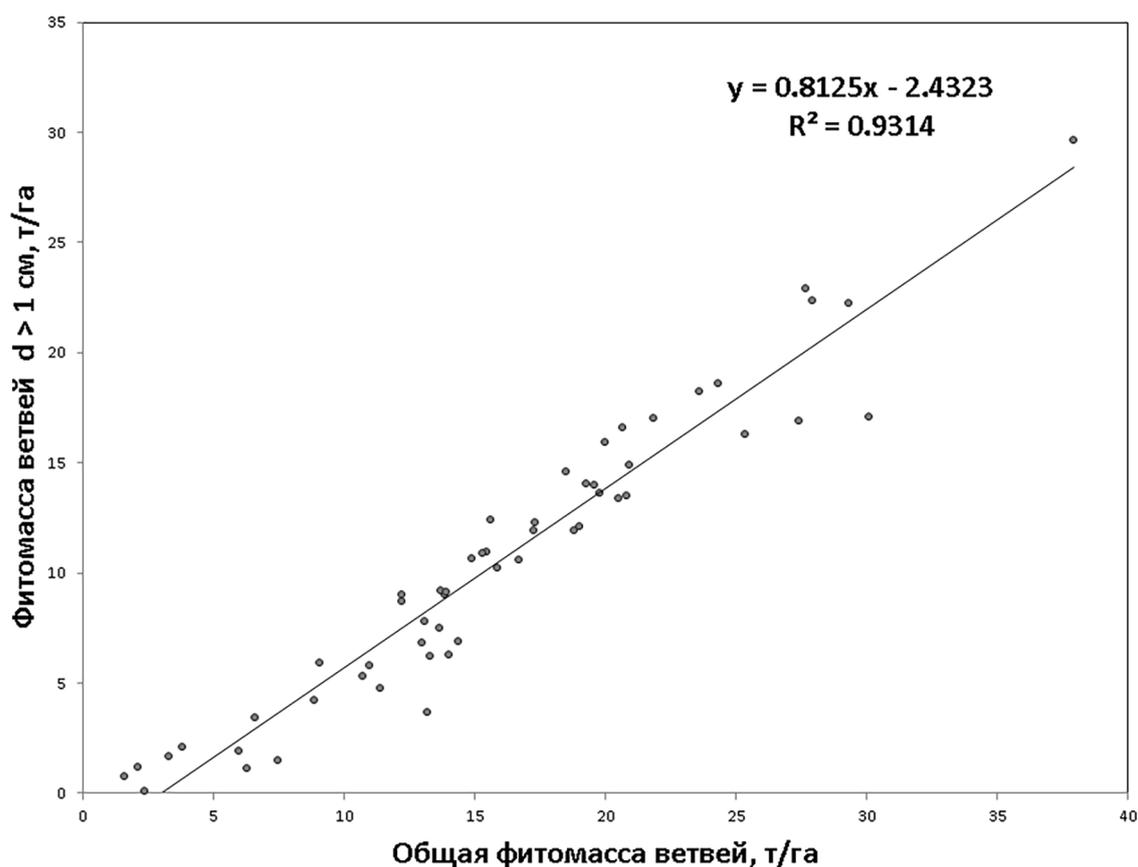


Рисунок 4. Определение фитомассы ветвей толщиной более 1 см

Расчеты запасов ЛГМ нижних ярусов леса

К нижним ярусам леса в структуре ЛГМ относятся фитомасса подроста и подлеска, поддерживающие горение при низовых и верховых пожарах, а также фитомасса живого напочвенного покрова, являющегося проводником горения при низовых пожарах.

Для создания новой базы запасов ЛГМ подроста, подлеска и напочвенного покрова используется регрессионная экспоненциальная модель (3). Фитомасса нижних ярусов $U_{(i)}$ оценивается по моделям конверсионных коэффициентов (Швиденко и др., 2008):

$$U_{(i)} = c_0 \times A^{c_1} \times SI^{c_2} \times RS^{c_3} \times \exp(c_4 \times A + c_5 \times RS), \quad (3)$$

где A — возраст; SI — класс бонитета, кодируется — 4, 5 ..., 12 для Ib, Ia, I ..., Vb классов соответственно, коды класса бонитета являются порядковыми величинами; RS — относительная полнота (скаляр, для покрытых лесом земель 0.2–1.0); c_0 – c_5 — регрессионные коэффициенты.

Входными параметрами в модели являются характеристики древостоя — порода, возраст, класс бонитета, относительная полнота и регрессионные коэффициенты, опубликованные в работе А. З. Швиденко с соавторами (2008). На вход модели характеристики подаются в виде спутниковых продуктов с пространственным разрешением 230 м.

Расчеты запасов крупных древесных остатков (КДО)

Древесный детрит (надземная часть) — древесные остатки, включающие в себя такие фракции, как сухостой, валеж, пни, сухие ветви живых деревьев. Древесный детрит является важным компонентом лесных экосистем. Накопление древесного детрита существенно усиливает пожарную опасность и интенсивность пожаров, особенно в лесах таежной зоны. Масса валежа и захламленности лесной экосистемы увеличивает интенсивность горения при устойчивых низовых и верховых пожарах. Учет запасов мертвой древесины повышает точность оценки пирогенных эмиссий углерода (Швиденко и др., 2009). Для оценки объема древесного детрита по основным лесообразующим породам используются многомерные регрессионные модели с логарифмическим преобразованием (4, 5) (Shvidenko et al., 2023). Данные модели указывают, что запасы КДО зависят главным образом от породы деревьев, возраста, интенсивности лесохозяйственной обработки и возраста древостоев, а также от географического положения (биоклиматической зоны) и уровня продуктивности леса:

$$\text{logit}(R_{fr}) = a_0 + a_1 \times \ln A + a_2 \times \ln SI + a_3 \times A + \varepsilon, \quad (4)$$

$$R_{fr} = \exp(\text{logit}(R_{fr}) / (1 + \exp(\text{logit}(R_{fr}))), \quad (5)$$

где R_{fr} — коэффициент пересчета, равный отношению объема fr фракции КДО (коряги, бревна, пни, сухие ветви живых

деревьев) к запасу растущей древесины; A — средний возраст древостоя, лет; SI — класс бонитета, выражается как средняя высота (м) зрелого леса (50 лет для березы, осины и других мягколиственных пород и 100 лет для других пород), a_0 – a_3 — параметры модели.

Технология расчета конверсионных коэффициентов для КДО аналогична расчетам верхнего полога. Коэффициенты пересчета (t/m^3) при умножении на запас стволовой древесины ($m^3/га$) дают массу КДО ($t/га$) для различных фракций.

Расчеты запасов лесной подстилки

Лесная подстилка является основным проводником горения при низовых пожарах. По экспериментальным данным, в результате пожара может выгорать от 14 до 100% запаса подстилки в лесных экосистемах. В среднем, потери органического материала подстилки при пожарах составляют около 40% (Волокитина, Софронова, 2014).

Органическое вещество почвы представляет собой значительный резервуар углерода. Подстилкой считают поверхностный горизонт минеральных почв, состоящий из органического материала, мощность которого не превышает 10 см.

Запас углерода в лесной подстилке рассчитывается (Щепащенко и др., 2013, Чернова и др., 2021) на основании почвенной карты России масштаба 1:2.5 млн (Фридланд, 1988), базы данных почвенных профилей (Stolbovoi, Mccallum, 2002),

информации о преобладающей древесной породе и основных типов наземных экосистем (Карточка проекта РНФ № 19-77-30015).

База типичных почвенных профилей содержит описание почвенных характеристик (мощность горизонтов, содержание органического вещества, плотность) и диапазон их возможного варьирования для каждого типа почв. Используя материалы этой базы данных, были рассчитаны минимальные и максимальные запасы органического углерода (Щепащенко и др., 2013).

Один и тот же тип почв территориально может быть представлен в нескольких природных зонах и регионах. Запасы подстилок на одной и той же почве могут отличаться в разных зонах/регионах. Кроме того, на содержание углерода в почве оказывает влияние тип растительности и характер землепользования, а также возможные различные нарушения. Для учета этих факторов используются соответствующие поправочные коэффициенты K_{sp} , K_{reg} , K_{LU} . Запасы углерода в лесной подстилке рассчитываются по модели (6) (Щепащенко и др., 2013):

$$C = \left(C_{\min} + \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2} \times K_{reg} \times K_{sp} \right) \times K_{LU}, \quad (6)$$

где C — запасы органического углерода в подстилке, $кг/м^2$; C_{\min} , C_{\max} — минимальное и максимальное содержание углерода в подстилке, $кг/м^2$; K_{reg} — региональный поправочный коэффициент; K_{sp} — поправочный коэффициент, учитывающий для

покрытых лесом земель влияние преобладающей древесной породы; K_{LU} — поправочный коэффициент для различных типов землепользования и возможных нарушений (гарь, сенокос, пастбища, заброшенные сельскохозяйственные земли, залежи). Для лесных земель при отсутствии нарушений поправочный коэффициент K_{LU} равен 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В моделях расчета запасов фитомассы используются в качестве входных данных спутниковые тематические продукты MODIS с пространственным разрешением 230 м за 2018 г. (Карточка проекта РНФ № 19-77-30015).

Результатом применения модели (1) являются конверсионные коэффициенты для фракций хвоя/листва и ветви деревьев (рис. 5), которые при перемножении на запас древостоя конвертируют его в фитомассу живых ветвей деревьев и хвои/листвы.

Выполнены доработки моделирования запасов ветвей с диаметром менее 1 см. В результате оценки запасов тонких веток (2) сформировано изображение запасов ЛГМ верхнего полога: фитомасса (т/га) ветвей диаметром менее 1 см и хвои/листвы (рис. 6).

В табл. 1 приводятся количественные оценки запасов фитомассы хвои, листвы и ветвей по основным лесообразующим породам в результате произведенных рас-

(а)



Рисунок 5. Карта конверсионных коэффициентов (т/м³) для оценки запаса фитомассы ветвей (а) и хвои/листвы (б) в кронах деревьев основных лесообразующих пород России

(б)

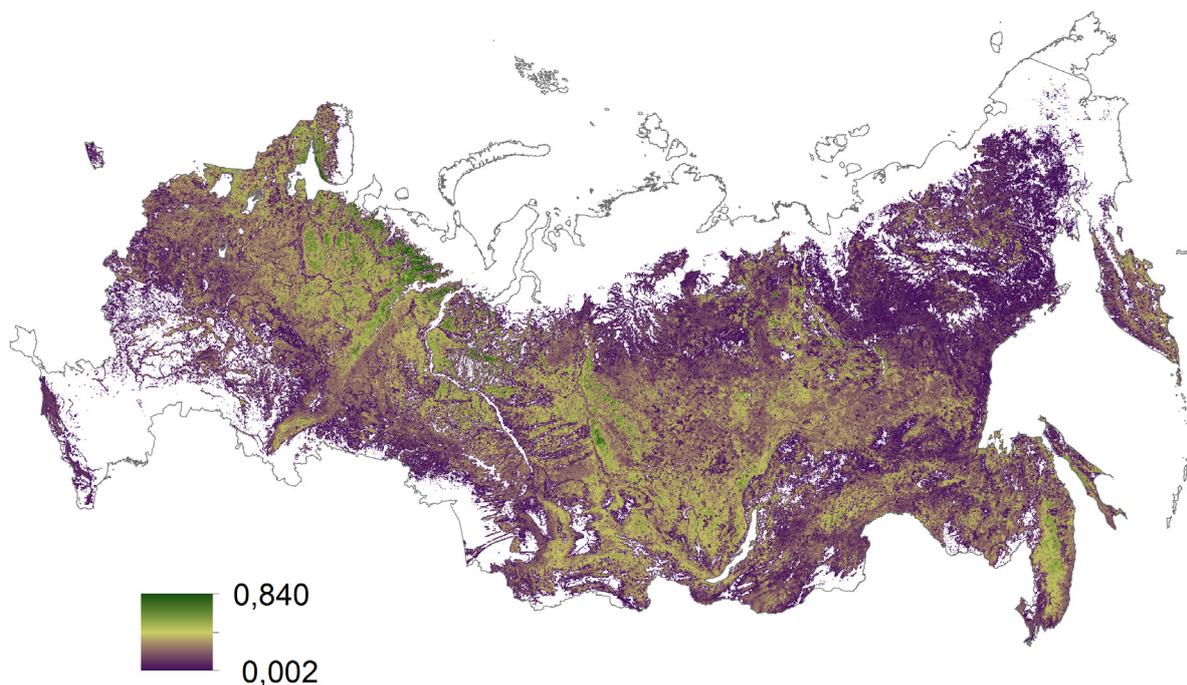


Рисунок 5. Карта конверсионных коэффициентов (т/м³) для оценки запаса фитомассы ветвей (а) и хвои/листвы (б) в кронах деревьев основных лесобразующих пород России



Рисунок 6. Карта запасов фитомассы верхнего полога, т/га

четов. Представленные в табл. 1 расчеты относительных запасов фитомассы совпадают с исследованиями других авторов и находятся примерно в известных диапазонах (Андреев и др., 2015; Кукавская и др., 2015; Иванов, 2019).

В результате применения модели к нижним ярусам леса (3) для каждого пикселя определяется запас фитомассы

подроста, подлеска и живого напочвенного покрова (рис. 7, 8). На рис. 9 приведены примеры расчетов по моделям (4, 5) КДО фракций сухостоя и валежа. Пример карты запасов углерода лесной подстилки представлен на рис. 10.

Предварительная оценка результатов моделирования слоев ЛГМ была выполнена в части сравнения запасов фи-

Таблица 1. Количественные оценки запасов фитомассы хвои, листвы и ветвей основных лесобразующих пород по данным ДЗЗ на территории РФ

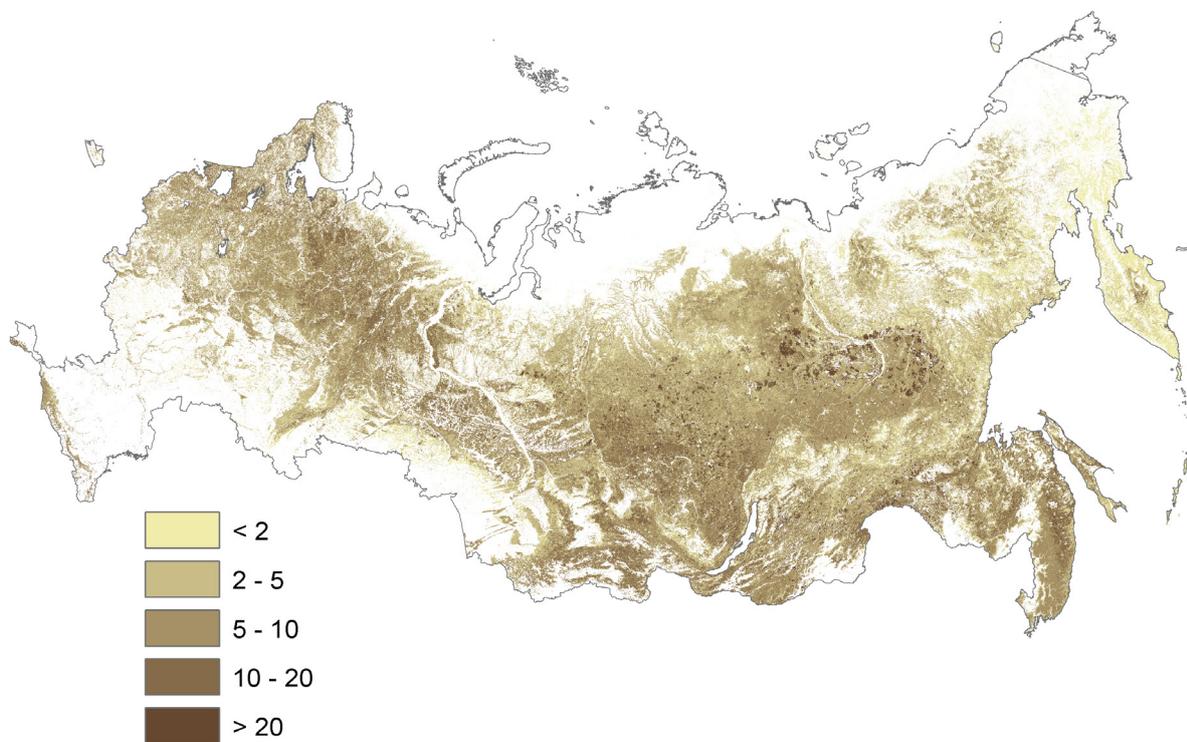
№	Порода	Площадь, млн га	Листва, млн т	Ветви, млн т	Всего, млн т	Листва и хвоя, т/га	Ветви, т/га	Всего, т/га
1	сосна	117.0	497.2	1214.9	1712.1	4.3	10.4	14.6
2	ель	65.1	576.9	917.0	1494.0	8.9	14.1	22.9
3	пихта	8.7	76.8	145.9	222.7	8.8	16.8	25.6
4	лиственница	287.7	518.4	2217.6	2736.0	1.8	7.7	9.5
5	кедр	44.8	304.2	688.2	992.4	6.8	15.4	22.2
6	дуб	11.1	29.7	263.0	292.7	2.7	23.7	26.3
7	береза	126.1	467.2	2099.3	2566.5	3.7	16.6	20.4
8	осина	29.4	78.6	386.4	465.0	2.7	13.1	15.8



Рисунок 7. Запасы фитомассы подроста и подлеска, т/га



(а)



(6)

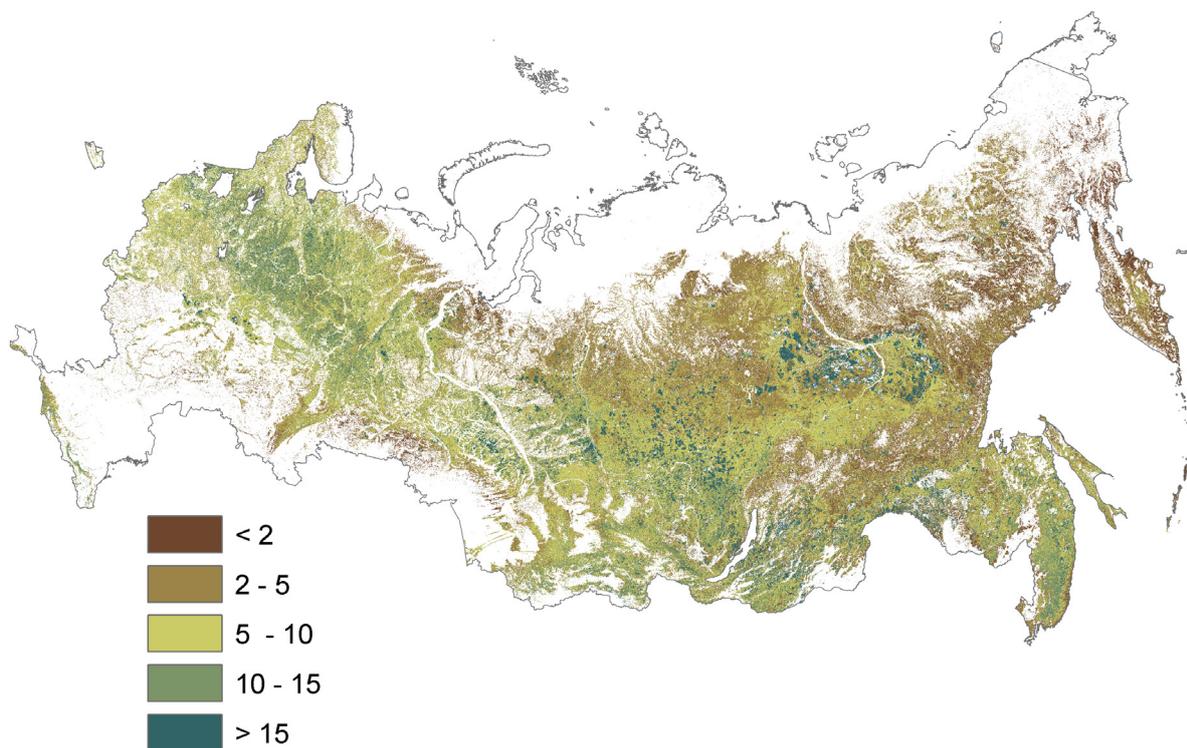


Рисунок 9. Карты запасов КДО, т/га: б — валеж

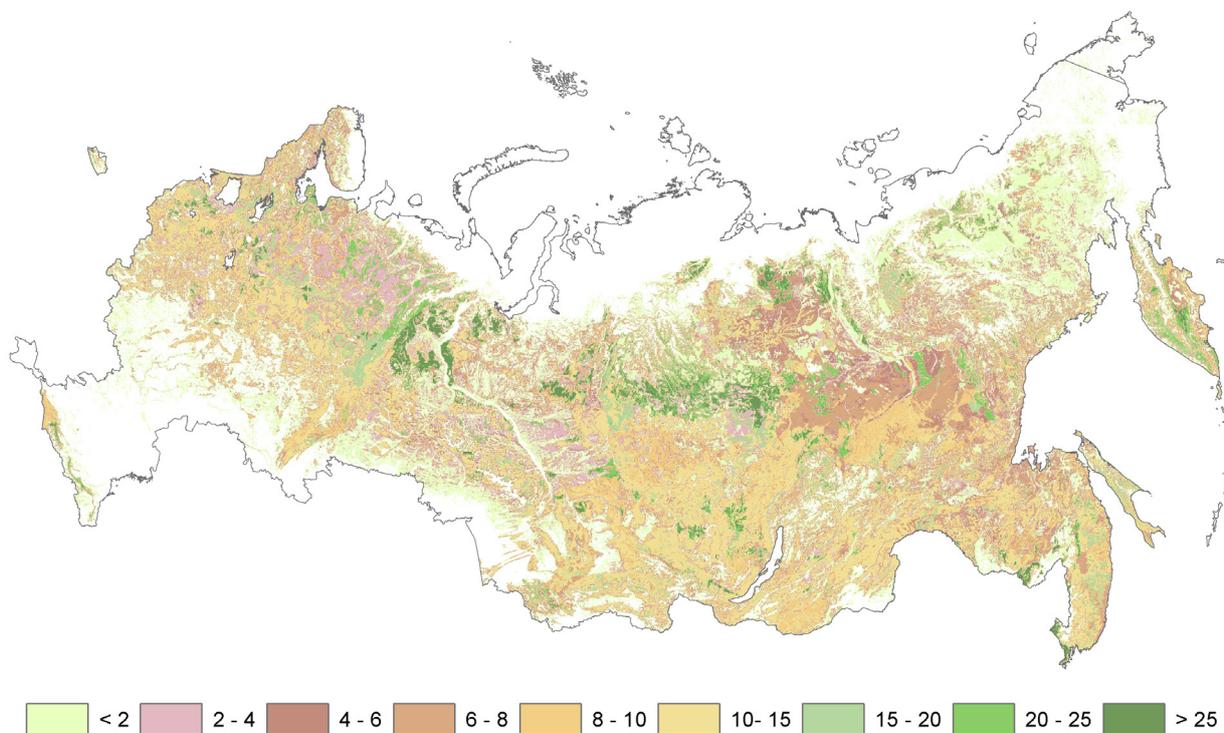


Рисунок 10. Карта запасов углерода в лесной подстилке, т С/га

томассы верхнего полога по данным ДЗЗ и данным лесной таксации в разрезе лесничеств Костромской обл. (рис. 11). В границах лесного фонда по лесничествам рассчитаны запасы фракций ветвей и хвои/листья. Используются те же аналитические формулы (1), что и для данных ДЗЗ. В качестве входных параметров — данные таксации ближайшего к спутниковым продуктам года

лесоустройства по высоте, возрасту, классу бонитета и запасу. Сравнение результатов представлено в табл. 2. Анализ результатов показывает, что расчеты запасов по данным ДЗЗ в среднем имеют превышение приблизительно на 20%. В то же время полученные расчеты относительных запасов фитомассы находятся примерно в известных диапазонах.

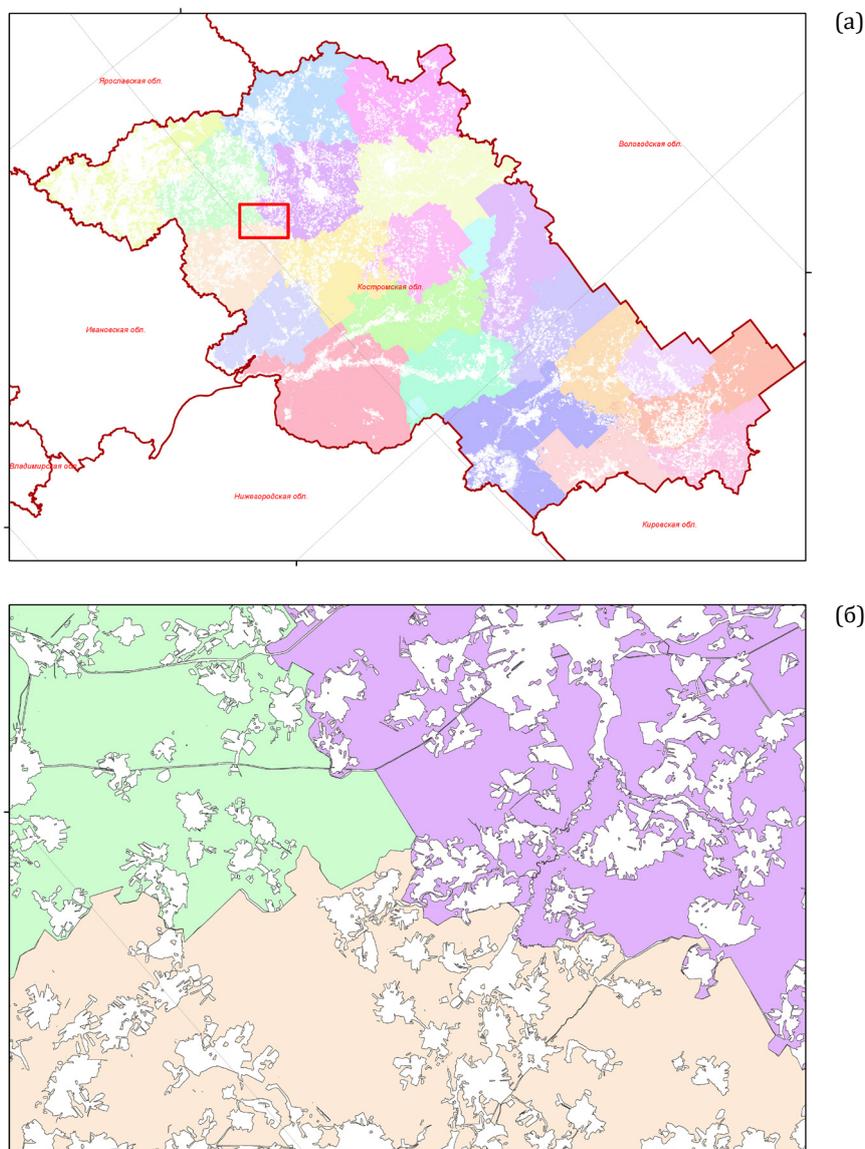


Таблица 2. Результаты расчетов запасов верхнего полога по данным ДЗЗ и лесной таксации в Костромской области

Лесничество	Таксация			ДЗЗ			Ошибка	
	Абсолютные значения запаса, тыс. т	Площадь, тыс. га	Относительные запасы, т/га	Абсолютные значения запаса, тыс. т	Площадь, тыс. га	Относительные запасы, т/га	Запас, %	Площадь, %
Антроповское	3013.6	198.9	15.2	3572.1	198.7	20.3	15.6	-0.1
Буйское	3743.8	243.4	15.4	4885.4	243.7	23.2	23.4	0.1
Вохомское	3926.5	242.5	16.2	5411.8	244.1	23.8	27.5	0.7
Галичское	2763.8	184.3	15.0	2979.2	183.8	17.4	7.2	-0.3
Кадыйское	2605.9	196.3	13.3	3544.1	196.6	19.8	26.5	0.2
Кологривское	4437.2	270.5	16.4	5877.1	272.0	26.5	24.5	0.5
Костромское	2165.8	157.4	13.8	2163.1	156.9	14.1	-0.1	-0.3
Макарьевское	5669.3	428.4	13.2	8005.1	429.0	21.1	29.2	0.2
Мантуровское	2988.9	215.5	13.9	3984.9	215.2	20.1	25.0	-0.1
Межевское	2992.4	208.5	14.4	4202.8	208.9	22.9	28.8	0.2
Нейское	3460.9	225.6	15.3	4722.1	226.1	25.2	26.7	0.2
Октябрьское	2221.4	148.0	15.0	3090.4	149.1	20.3	28.1	0.7
Островское	2783.9	185.1	15.0	3207.5	186.1	18.6	13.2	0.5
Павинское	1936.5	126.3	15.3	2575.5	127.4	19.8	24.8	0.9
Парфеньевское	2534.4	175.8	14.4	3426.2	176.3	23.4	26.0	0.3
Поназыревское	2101.1	173.6	12.1	3514.0	173.7	20.5	40.2	0.0
Пыщугское	2612.4	172.0	15.2	3370.6	173.0	20.5	22.5	0.6
Солигаличское	3712.5	261.3	14.2	5021.7	261.0	22.3	26.1	-0.1
Судиславское	2300.6	156.4	14.7	2259.5	157.1	15.0	-1.8	0.4
Чухломское	4599.7	307.3	15.0	5893.2	306.5	23.0	22.0	-0.3
Шарьинское	4980.7	355.4	14.0	7013.1	356.2	21.0	29.0	0.2
ЗП «Кологр. Лес»	834.3	58.9	14.2	1300.6	59.0	26.8	35.9	0.2
Ср.отн. ош., %							22.7	0.2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиальным отличием нового подхода оценки запасов ЛГМ от предыдущей версии является использование в расчетах спутниковых тематических продуктов среднего пространственного разрешения MODIS с такими характеристиками лесов на пиксельном уровне, как преобладающая порода, возраст, полнота, запас древесины, класс бонитета (Карточка проекта РНФ № 19-77-30015), а также использование регрессионных моделей расчета запасов основных проводников горения (Швиденко и др., 2008; Щепашенко и др., 2013; Schepaschenko et al., 2018; Shvidenko, 2023).

Новая версия расчетов запасов ЛГМ имеет потенциал ежегодного обновления и, как следствие, получение более достоверных оценок прямых пирогенных выбросов углерода от лесных пожаров.

На данный момент описанные в статье методические подходы имеют ограничения в использовании для мониторинга эмиссии углерода, так как представленные результаты требуют дополнительной работы по их проверке. Необходимо про-

вести верификацию полученных на основе моделей тематических продуктов всех слоев ЛГМ (подрост, подлесок, КДО, живой напочвенный покров, лесная подстилка) на основе большого объема данных по всем слоям. Однако это отдельная сложная работа по сбору и анализу литературных и полевых исследований запасов ЛГМ в разных регионах России, что является предметом отдельной статьи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Методические разработки и создание спутниковых тематических продуктов характеристик лесов были выполнены в рамках проекта РНФ (Карточка проекта РНФ № 19-77-30015). Создание тематических карт запасов ЛГМ на основе математических моделей расчета по конверсионным коэффициентам запасов фитомассы различных слоев ЛГМ и их выборочная проверка выполнена в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем» № 121121600118-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев Ю. А., Андреев А. Ю., Михайлов П. В., Паутяк В. Г., Коморовский В. С. Оценка запаса лесных горючих материалов при государственной инвентаризации лесов // Труды СПбНИИЛХ. 2015. № 1. С. 39–46.
- Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В., Исаев А. С., Лулян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- Волокитина А. В., Софронов М. А. Классификация и картографирование растительных горючих материалов. Новосибирск: СО РАН, 2002. 306 с.
- Волокитина А. В., Софронова Т. М. Картографирование растительных горючих материалов // Сибирский лесной журнал. 2014. № 6. С. 8–28.
- Ершов Д. В., Сочилова Е. Н. Количественные оценки прямых пирогенных эмиссий углерода в лесах России по данным дистанционного мониторинга 2021 года // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 4. Статья № 117. DOI: 10.31509/2658-607x-202254-117
- Ершов Д. В., Сочилова Е. Н. Оценка прямых пирогенных эмиссий углерода в лесах России за 2020 год по данным дистанционного мониторинга // Вопросы лесной науки. Т. 3. № 4. 2020. С. 1–8.
- Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Честных О. В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу для основных лесообразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. Сибирский государственный технологический университет. 2003. Вып. 1 (32). С. 119–127.
- Иванов А. В. Горимость леса и запасы лесных горючих материалов в насаждениях Суводского лесничества Кировской области // Труды Поволжского государственного технологического университета. 2019. Вып. 7. С. 16–23.
- Карточка проекта РНФ № 19-77-30015 «Разработка методов и технологии комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса для развития системы национального мониторинга бюджета углерода лесов России в условиях глобальных изменений климата». 2019–2022. URL: <https://rscf.ru/project/19-77-30015/> (дата обращения: 25 мая 2023).
- Кукавская Е. А., Жила С. В., Иванова Г. А., Буряк Л. В. Оценка эмиссии углерода при пожарах в светлохвойных и лиственных насаждениях Красноярского края // Сибирский лесной журнал. 2015. Т. 4. № 2. С. 185–189.
- Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Крас-

- ноябрьск: ИЛИД им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1970. С. 5–58.
- Курбатский Н. П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962. 154 с.
- Лесной фонд России (по данным государственного учета лесного фонда по состоянию на 1 января 2003 г.) / Справочник. М.: ВНИИЛМ, 2004. 640 с.
- Мелехов И. С. Лесные пожары и борьба с ними. М.: Гослестехиздат, 1936. 100 с.
- Мелехов И. С. Природа леса и лесные пожары. Архангельск: ОГИЗ, 1947. 60 с.
- Мелехов И. С., Душа-Гудым С. И. Лесная пирология. М.: МЛТИ, 1979. Вып. 2. 80 с.
- Сочилова Е. Н., Ершов Д. В., Коровин Г. Н. Методы создания карт запасов лесных горючих материалов низкого пространственного разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. II. С. 441–449.
- Уткин А. И., Гульбе Я. И., Гульбе Т. А., Ермолова Л. С. Биологическая продуктивность лесных экосистем. Компьютерная база данных // Москва, ИЛ РАН, ЦЭПЛ РАН, 1994.
- Фильков А. И. Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 276 с.
- Фридланд В. М. Почвенная карта РСФСР масштаба 1 : 2 500 000. М.: ГУГК, 1988.
- Чернова О. В., Голозубов О. М., Алябина И. О., Щепашенко Д. Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286.
- Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г., Нильссон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Издание 2-е, доп. М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.
- Швиденко А., Щепашенко Д., МакКаллум Я., Нильссон С. «Леса и лесное хозяйство России». Международный институт прикладного системного анализа и Российская Академия наук. Лаксенбург, Австрия. CD-ROM, 2007.
- Швиденко А., Щепашенко Д., Нильссон С. Оценка запасов древесного детрита в лесах России // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. № 1 (41). С. 133–147.
- Щепашенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.
- Alexander M. E., Lawson B. D., Stocks B. G., Van Wagner C. E. User Guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System: Rate of Spread Relationships. Canadian Forestry Service, 1984. 73 p.

- Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S.* A new SPOT4-VEGETATION derived Land Cover Map of Northern Eurasia // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24. No 9. P. 1977–1982.
- Bruce D.* Fuel weights on the Osceola National Forest // *Fire Control Notes*. 1951. No 12 (3). P. 20–23.
- Davis K. P., Byram G. M., Krumm W. R.* Forest fire: control and use. N. Y., Toronto, London, 1959. 584 p.
- Forestry Canada. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Inf. Rep. ST-X-3. Ottawa, 1992. 63 p.
- Hornby L. G.* Fuel type mapping in region one // *Journal of Forestry*. 1935. Vol. 33. P. 67–72.
- Kukavskaya E. A., Soja A. J., Petkov A. P., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Conard S. G.* Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Canadian Journal of Forest Research*. 2013. Vol. 43. No 5. P. 493–506.
- Muraro S. J.* Fuel classification: a review of the literature and discussion of principles // *Proc. Second Federal Fire Res. Conf. Victoria, B. C., Canada, 1965*. 23 p.
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchyk V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F.* Improved estimates of biomass expansion factors for Russian forests // *Forests*. 2018. Vol. 9. No 6. Article 312.
- Shvidenko A., Mukhortova L., Kapitsa E., Kraxner F., See L., Pyzhev A., Gordeev R., Fedorov S., Korotkov V., Bartalev S., Schepaschenko D.* A modelling system for dead wood assessment in the forests of Northern Eurasia // *Forests*. 2023. Vol. 14. No 1. Article 45.
- Stolbovoi V., Mccallum I., 2002. Land Resources of Russia [online]. IIASA & RAS. Laxenburg, Austria. URL: <https://clck.ru/36QrC6> (дата обращения 17 июня 2023).
- van Wees D., van der Werf G. R., Randerson J. T., Rogers B. M., Chen Y., Veraverbeke S., Giglio, L., Morton D. C.* Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500 m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED) // *Geoscientific Model Development* 2022. Vol. 15. P. 8411–8437. DOI: 10.5194/gmd-15-8411-2022

REFERENCES

- Alexander M. E., Lawson B. D., Stocks B. G., Van Wagner C. E., User guide to the Canadian forest fire behaviour prediction system: rate of spread relationships, *Canadian Forestry Service Fire Danger Group*, 1984, 73 p.
- Andreev Ju. A., Andreev A. Ju., Mihajlov P. V., Pautjak V. G., Komorovskij V. S., Ocenka zapasa lesnyh gorjuchih materialov pri gosudarstvennoj inventarizacii lesov (Stock assessment of forest combustible materials in the state forest inventory), *Trudy SPbNILH*, 2015, No 1, pp. 39–46.

- Bartalev S. A., Belward A. S., Erchov D. V., Isaev A. S., A new SPOT4-VEGETATION derived Land Cover Map of Northern Eurasia, *International Journal of Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, No 9, pp. 1977–1982.
- Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Lupjan E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometra MODIS (Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
- Bruce D., Fuel weights on the Osceola National Forest, *Fire Control Notes*, 1951, No 12 (3), pp. 20–23.
- Chernova O. V., Golozubov O. M., Aljabina I. O., Shhepashhenko D. G., Kompleksnyj podhod k kartograficheskoj ocenke zapasov organicheskogo ugleroda v pochvah Rossii (Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in Russian Federation), *Pochvovedenie*, 2021, No 3, pp. 273–286.
- Davis K. P., Byram G. M., Krumm W. R., *Forest fire: control and use*, N.Y., Toronto, London, 1959, 584 p.
- Ershov D. V., Sochilova E. N., Kolichestvennye ocenki prjamyh pirogennyh jemissij ugleroda v lesah Rossii po dannym distancionnogo monitoringa 2021 goda (Quantitative estimates of direct pyrogenic carbon emissions in forest of Russia according to remote monitoring data 2021), *Voprosy lesnoj nauki*, 2022, Vol. 5, No 4, Article 117.
- Ershov D. V., Sochilova E. N., Ocenka prjamyh pirogennyh jemissij ugleroda v lesah Rossii za 2020 god po dannym distancionnogo monitoringa (Assessment of direct pyrogenic carbon emissions in forests of Russia for 2020 according to remote monitoring data), *Voprosy lesnoj nauki*, 2020, Vol. 3, No 4, pp.1–8.
- Fil'kov A. I., *Fiziko-matematicheskoe modelirovanie voznikovenija prirodnyh pozharov* (Physical and mathematical modeling of the occurrence of wildfires), Tomsk: Izdatel'skij Dom TGU, 2014, 276 p.
- Forestry Canada, *Development and structure of the Canadian forest fire behavior prediction system*, Information Report ST-X-3, Ottawa, 1992, 63 p.
- Fridland V. M., *Pochvennaja karta RSFSR masshtaba 1 : 2 500 000* (Soil map of the RSFSR scale 1 : 2 500 000), Moscow: GUGK, 1988.
- Hornby L. G., Fuel type mapping in region one, *Journal of Forestry*, 1935, Vol. 33, pp. 67–72.
- Ivanov A. V., Gorimost' lesa i zapasy lesnyh gorjuchih materialov v nasazhdenijah Suvodskogo lesnichestva Kirovskoj oblasti (The combustibility of the forests and forest reserves of combustible materials in spaces Zavodskogo forestry of the Kirov region), *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta*, 2019, Issue 7, pp. 16–23.
- Kartochka proekta RNF No 19-77-30015 "Razrabotka metodov I tehnologii komplek-*

- snogo ispo'zovanija dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa dlja razvitija sistemy naciona'nogo monitoringa bjudzhetnogo ugleroda lesov Rossii v uslovijah globa'nyh izmenenij klimata" (Development of methods and technologies for the integrated use of Earth remote sensing data from space for the development of the Russian forest carbon budget national monitoring system under conditions of global climate change), 2019–2022, available at: <https://rscf.ru/project/19-77-30015/> (2023, 25 May)
- Kukavskaja E. A., Zhila S. V., Ivanova G. A., Burjak L. V., Ocenka jemissii ugleroda pri pozharah v svetlohvojnyh i listvennyh nasazhdenijah Krasnojarskogo kraja (Estimation of carbon emissions from fires in light-coniferous and deciduous forests of Krasnojarsk krai), *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2015, Vol. 4, No 2, pp.185–189.
- Kukavskaya E. A., Soja A. J., Petkov A. P., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Conard S. G., Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption, *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, Vol. 43, No 5. pp. 493–506.
- Kurbatskij N. P., Issledovanie kolichestva i sostava lesnyh gorjuchih materialov (Investigation of quantity and composition of the forest fire fuels), [in:] *Voprosy lesnoj pirologii* (Questions of forest pyrology), Krasnojarsk, 1970, pp. 5–58.
- Kurbatskij N. P., *Tehnika i taktika tushenija lesnyh pozharov* (Forest fire extinguishing techniques and tactics), Moscow: Goslesbumizdat, 1962, 154 p
- Lesnoj fond Rossii, po dannym gosudarstvennogo ucheta lesnogo fonda po sostojaniju na 1 janvarja 2003 g.*, (Forest Fund of Russia), Spravochnik, Moscow: VNIILM, 2004, 640 p.
- Melehov I. S., *Lesnye pozhary i bor'ba s nimi* (Forest fires and their control), Moscow: Goslestehizdat, 1936, 100 p.
- Melehov I. S., *Priroda lesa i lesnye pozhary* (Nature of forests and forest fires), Arhangel'sk: OGIZ, 1947, 60 p.
- Melehov I. S., Dusha-Gudym S. I., *Lesnaja pirologija* (Forest pyrology), Moscow: MLTI, 1979, Issue 2, 80 p.
- Muraro S. J., Fuel classification: a review of the literature and discussion of principles, *Proceedings of the Second Federal Fire Research Conference*, Victoria, B.C., Canada, 1965, 23 p.
- Schepaschenko D. G., Muhortova L. V., Shvidenko A. Z., Vedrova Je. F., Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvah Rossii (The Pool of organic carbon in the soils of Russia), *Pochvovedenie*, 2013, No 2, pp. 123–132.
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Shvidenko A., Blyshchik V., Dmitriev E., Martynenko O., See L., Kraxner F., Improved Estimates of Biomass Expansion Factors for Russian Forests, *Forests*, 2018, Voll. 9 (6), Article 312, DOI: 10.3390/f9060312
- Shvidenko A., Mukhortova L., Kapitsa E., Kraxner F., See L., Pyzhev A., Gordeev R., Fedorov S., Korotkov V., Bartalev S., Schepas-

- chenko D., A Modelling System for Dead Wood Assessment in the Forests of Northern Eurasia, *Forests*, 2023, Vol. 14, Article 45.
- Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G., Nil'sson S., Buluj Ju. I., *Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnyh lesoobrazujushhih porod Severnoj Evrazii* (normativno-spravochnye materialy) (Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials)), Moscow: Federal'noe agentstvo lesnogo hozjajstva, 2008, 886 p.
- Shvidenko A., Schepaschenko D., Maccallum Ja., Nil'sson S. "Lesy i lesnoe hozjajstvo Rossii" (Forests and forestry of Russia), Mezhdunarodnyj institut prikladnogo sistemnogo analiza i Rossijskaja Akademiya nauk, Laksenburg, Avstrija, CD-ROM, 2007.
- Shvidenko A., Schepaschenko D., Nil'sson S., Ocenka zapasov drevesnogo detrita v lesah Rossii (Assessment of woody detritus in forests of Russia), *Lesnaja taksacija i lesoustrojstvo*, 2009, No 1(41), pp. 133–147.
- Sochilova E. N., Ershov D. V., Korovin G. N., Metody sozdaniya kart zapasov lesnyh gorjuchih materialov nizkogo prostranstvennogo razresheniya (Methods of course resolution forest fuel load mapping), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Issue 6, Vol. 2, pp. 441–449.
- Stolbovoi V., Mccallum I., *Land Resources of Russia*, IIASA & RAS, Laxenburg, Austria, 2002, URL: <https://clck.ru/36QrC6> (2023, 17 June).
- Utkin A. I., Gul'be Ja. I., Gul'be T. A., Ermolova L. S., *Biologicheskaja produktivnost' lesnyh jekosistem* (Biological productivity of forest ecosystems), Database, Moscow, 1994, IL RAN, CEPL RAN.
- van Wees D., van der Werf G. R., Rander-son J. T., Rogers B. M., Chen Y., Veraverbeke S., Giglio L., Morton D. C., Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500 m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED), *Geoscientific Model Development*, 2022, No 15, pp. 8411–8437, 2022, DOI: 10.5194/gmd-15-8411-2022
- Volokitina A. V., Sofronov M. A., *Klassifikacija i kartografirovanie rastitel'nyh gorjuchih materialov* (Vegetation fuel classification and mapping), Novosibirsk, iz-vo SO RAN, 2002, 306 p.
- Volokitina A. V., Sofronova T. M., Kartografirovanie rastitel'nyh gorjuchih materialov (Vegetation Fuel Mapping), *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2014, No 6, pp. 8–28.
- Zamolodchikov D. G., Utkin A. I., Chestnyh O. V., Kojefficienty konversii zapasov nasazhdenij v fitomassu dlja osnovnyh lesoobrazujushhih porod Rossii (Conversion factors of forest stocks volumes in biomass for the main dominated forest species of Russia), *Lesnaja taksacija i lesoustrojstvo*, 2003, Issue 1 (32), pp. 119–127.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO MAPPING FOREST FUELS

D. V. Ershov *, E. N. Sochilova, N. V. Koroleva

*Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russian Federation*

* E-mail: dvershov67@gmail.com

Received: 10.06.2023

Revised: 23.06.2023

Accepted: 23.06.2023

Spatial data on the vertical structure and forest fuel loads are a very importance for reliable estimates of direct fire carbon emissions. Main purpose of our paper is to demonstrate methodological approaches to mapping pre-fire forest fuels, which sets of multidimensional regression models and thematic satellite products of forest stand characteristics are based on. The used models make it possible to calculate the parts of combustible biomass fractions (branches, foliage, undergrowth layer, ground vegetation cover, forest litter, detritus) of forest ecosystems for the main dominated species of different ages, relative density and site index for all the forested area of Russia in the different geographic zones. The article provides thematic input remote sensing data, which are used in models for calculating biomass fractions. The paper provides thematic input remote sensing data, which are used in models for calculating biomass fractions. The results of a preliminary comparison of estimates of biomass reserves of the upper canopy obtained based on satellite products and forest inventory data at the level of forest districts of the Kostroma region are presented.

Key words: *Forest Fire Fuels, Biomass, Carbon, Remote Sensing Monitoring*

Рецензент: к. физ-мат. н., доцент Барановский Н. В.