

Совершенствование метода картографирования органического углерода в лесной подстилке на примере лесов Центрального федерального округа

Д. В. Ершов, Е. Н. Соколова, Н. В. Королева, Д. Г. Щепашенко

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Москва, 117997, Россия
E-mail: Ershov@ifl.rssi.ru*

Представлен метод пространственного моделирования запаса углерода в лесной подстилке, усовершенствованный в части картографирования основных типов лесных почв почвенной карты России масштаба 1:2 500 000. Цель исследований — приблизить по детальности и пространственному разрешению карту почв масштаба 1:2 500 000 на покрытых лесом территориях к спутниковым тематическим продуктам MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (230 м) и на её основе смоделировать запасы углерода в лесной подстилке. Предлагаемый метод оценки запасов углерода в подстилке призван объединить ранее разработанную модель и более детальную информацию о почвах и растительности. Математическая модель расчёта углерода в лесной подстилке для преобладающей древесной породы и типа наземных экосистем учитывает типы почвы, минимальные и максимальные значения углерода в них, поправочные коэффициенты, характеризующие состояние и нарушенность почв в разных регионах. В статье даётся описание входных данных, которые используются в модели расчёта, их подготовки, классификация почвенной карты методом Random Forest. Приводятся результаты предварительного сравнения оценок запасов углерода в лесной подстилке, полученных в настоящей работе, с литературными данными и с ранее полученной картой.

Ключевые слова: лесная подстилка, запас углерода, почвенная карта, типы лесных почв, MODIS, Random Forest, Центральный федеральный округ

Одобрена к печати: 03.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-212-222

Введение

Лесная подстилка представляет собой поверхностный горизонт минеральных почв, состоящий в основном из органического материала (более 35 % от массы горизонта), мощность которого не превышает 10 см (Шишов и др., 2004). В органогенных почвах подстилкой считали очёс мхов. Лесные подстилки играют важную экологическую роль в качестве запаса элементов питания для растений, среды обитания для многочисленных организмов, динамического резервуара органического углерода и многого другого, в частности они представляют собой запас лесных горючих материалов и являются проводниками горения при низовых пожарах.

На долю низовых пожаров в лесах приходится более 95 % всех пожаров в России (Исаев и др., 1995). При низовых пожарах наибольший вклад в эмиссии углерода вносит лесная подстилка — от 40 до 88 % (Волокитина, Софронова, 2014; Ершов, Соколова, 2022; Иванова, Иванов, 2021). По экспериментальным данным, в результате пожара может выгорать от 14 до 100 % запаса подстилки в лесных экосистемах и тундрах (Щепашенко и др., 2013). В среднем потери органического материала подстилки при пожарах составляют около 40 %, в связи с чем пространственные данные о допожарных запасах углерода в лесной подстилке имеют большое значение для получения достоверных оценок размеров выбросов углерода от лесных пожаров на разных пространственных уровнях.

Лесная подстилка пополняется за счёт опада и отпада, поэтому запасы углерода в ней зависят от типа растительности. Скорость разложения органического вещества и выноса углерода зависит также от локальных условий, находящих своё выражение в типе почв.

Результаты оценки запаса фитомассы и органического углерода в лесной подстилке в разных лесорастительных условиях России, опубликованные во многих научных жур-

налах (Ведрова и др., 2010; Грязькин и др., 2021; Каплина, Кулакова, 2021; Матвеев, 2006; Матвеева, Цыкалов, 2010; Телеснина и др., 2017, 2023; Фуряев, Цветков, 2022), в основном базируются на локальных исследованиях органического вещества на пробных площадках той или иной лесорастительной зоны. А. И. Уткин с соавторами (1994, 2001) провели литературный анализ (около 750 наименований) и создали базу данных продуктивности в лесах, в которой содержится информация о почти 1500 лесных экосистем бывшего СССР, других государств Северной Евразии и отчасти Северной Америки. Одно из первых исследований, объединившее разные данные о запасах органического углерода в почвах, и в частности в лесной подстилке, в виде математических моделей для разных природных зон России, опубликовано в работе (Щепашенко и др., 2013). Модель оценки углерода в лесной подстилке учитывает преобладающие древесные породы, типы наземных экосистем, минимальные и максимальные значения углерода в типах почв и поправочные коэффициенты, характеризующие состояние и нарушенность почв в разных регионах.

Исходные данные для данной модели:

1. Почвенная карта Российской Федерации (РФ) масштаба 1:2 500 000 (Фридланд, 1988), пояснительная записка (Шишов и др., 2001) и база типичных почвенных профилей к ней (<https://egrpr.esoil.ru/>), которая содержит описание почвенных характеристик (мощность горизонтов, содержание органического вещества, плотность) и диапазон их возможного варьирования для каждого типа почв.
2. База данных натуральных измерений содержания органического углерода в почвах России (Щепашенко и др., 2013; Stolbovoi, Mccallum, 2002).
3. Карта преобладающих типов растительности и землепользования с пространственным разрешением 1 км² (Schepaschenko et al., 2011).
4. Карты природных зон РФ и административная карта России (Stolbovoi, Mccallum, 2002).

В работе (Чернова и др., 2021) предложен комплексный подход к отдельному картографированию запасов органического углерода в относительно однородных группах почвенных горизонтов (минеральных и органогенных, включая подстилки, торфяные залежи, торфянистые горизонты полугидроморфных почв). Предложены алгоритмы расчёта, позволяющие использовать разномасштабные, пространственно- и атрибутивно-разреженные данные различной достоверности, взаимно дополняющие друг друга. Использованный подход позволил создать и совместить несколько карт различной точности: мелкомасштабных — на всю территорию страны и более детальных — для хорошо обеспеченных фактической информацией регионов.

Цель наших исследований — приблизить по детальности и пространственному разрешению карту почв масштаба 1:2 500 000 (Фридланд, 1988) на покрытых лесом территориях к спутниковым тематическим продуктам MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (230 м) и на её основе смоделировать запасы органического углерода в лесной подстилке, используя ранее разработанную модель (Щепашенко и др., 2013).

Исходные данные и методика их обработки

Предпосылкой для проведения исследований стало создание в рамках научно-исследовательских работ гранта Российского научного фонда (<https://rscf.ru/project/19-77-30015/>) тематических продуктов базовых характеристик лесов с пространственным разрешением 230 м, а именно карт основных типов наземных экосистем, преобладающих древесных пород, возраста, сомкнутости крон, полноты, запасов стволовой древесины древостоя и классов бонитета. Для улучшения разрешения и детальности карты типов лесных почв используются инструменты классификации с обучением Random Trees Classifier ArcMap 10 (<https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/train-random-trees-classifier.htm>). Для обучения классификатора применяется векторный слой почвенной карты масштаба

1:2 500 000 (Фридланд, 1988). В качестве независимых переменных или предикторов кроме базовых слоёв карт растительности используются вспомогательные геопространственные данные, характеризующие рельеф местности, а именно высота над уровнем моря, крутизна и ориентация склона (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>). Экспериментальные исследования по картографированию типов почв и определению запаса органического углерода лесной подстилки проводились на территории лесов Центрального федерального округа (ЦФО). Все продукты были пространственно согласованы между собой и подготовлены в соответствии с границами ЦФО.

Подготовка и классификация карты типов почв

Векторный слой почв ЦФО, использующийся в качестве исходных данных для обучения модели классификации, содержит 24 класса. Для снижения влияния смещения и неточности рисовки границ классов карты типов почв внутри каждого полигона от внешней его границы была построена буферная зона размером 500 м (значение подобрано экспериментально на основе визуального анализа карт почв, наземных экосистем и спутниковых изображений MODIS).

Настройка модели классификации типов почв проводилась отдельно для каждой древесной породы (ель, сосна, берёза, осина, дуб), произрастающей на территории ЦФО. На этапе обучения модели инструмент из эталонных пикселей классов почв и предикторов случайным образом формирует произвольные наборы отдельных деревьев решений. Для принятия окончательного решения каждому дереву присваиваются баллы, на основе которых выбирается решение с наиболее часто встречающимся результатом классификации. В процессе классификации определяется вклад каждого признака или предиктора в общий результат (рис. 1). Так, наиболее информативными признаками для всех древесных пород являются высота над уровнем моря, данные о запасах древостоя и сомкнутости крон. Для дуба мы наблюдаем вклад в классификацию таких признаков, как крутизна и ориентация склона, а также возраст древостоя. Для остальных пород эти показатели наименее информативны.

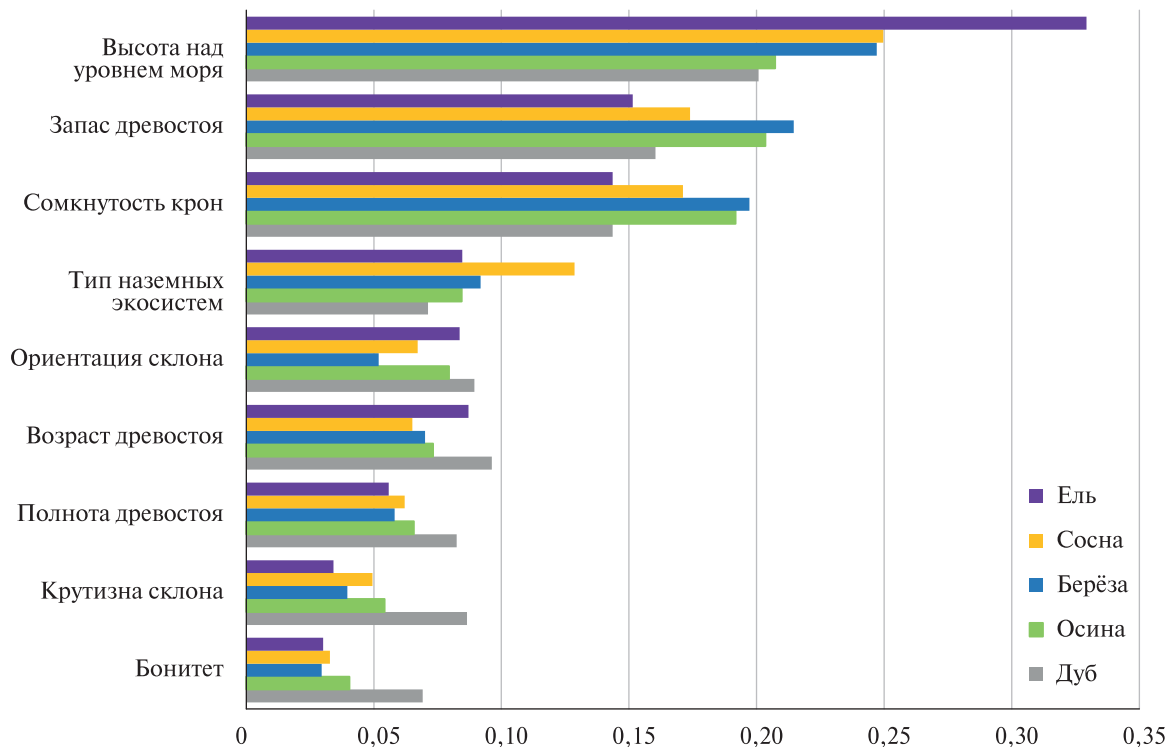


Рис. 1. Информативность признаков, использованных для классификации

Эксперименты с настройками модели классификации позволили определить оптимальную величину обучающей выборки. Для этого мы последовательно в несколько итераций, увеличивая размер эталонной выборки классов типов почв, оценивали точность классификации по следующим двум показателям: 1) кросс-валидация — параметр, оцениваемый в инструменте Random Trees Classifier ArcGIS 10, и 2) доля совпадений пикселей, отнесённых к разным классам типов почв в результате классификации, с исходной картой почв на основе анализа матрицы ошибок. В результате проведённого эксперимента было выявлено, что при увеличении размера эталонной выборки значение кросс-валидации снижалось с 0,69 (при объёме выборки в 1 тыс. пикселей) до 0,38 (100 тыс. пикселей). При этом доля совпадений классифицированных пикселей с исходной картой почв, наоборот, увеличивалась с 0,13 (при объёме выборки в 1 тыс. пикселей) до 0,40 (100 тыс. пикселей) по мере увеличения размера эталонной выборки. Однако когда количество эталонов достигло 100 тыс. пикселей, оба параметра перестали существенно меняться, т. е. дальнейшее увеличение выборки до 150 тыс. или 200 тыс. пикселей принципиально не повлияло на точность для обоих параметров, и поэтому наращивание эталонной выборки свыше 100 тыс. пикселей нами оценивалось как избыточное. Таким образом, статистический анализ результата показал, а визуальное исследование подтвердило, что пространственное распределение классифицированных пикселей к исходной карте ближе при использовании эталонной выборки в 100 тыс. пикселей (рис. 2).

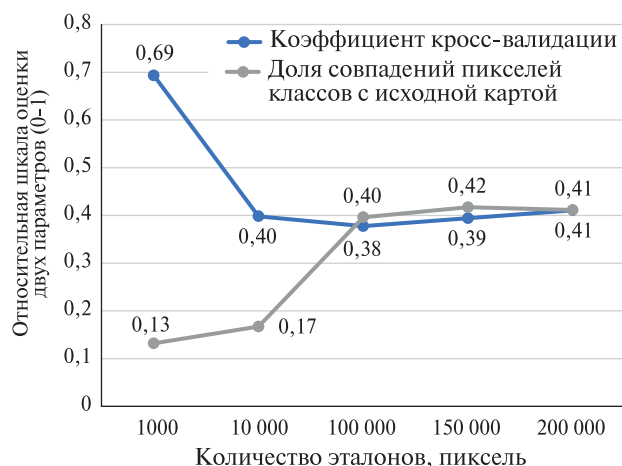


Рис. 2. Динамика значения кросс-валидации и количества пикселей классов почв для сосны

Увеличение показателя «количество деревьев» со стандартных 50 до 200 дало лишь небольшую прибавку оценки точности методом кросс-валидации (0,03), поэтому этот параметр мы оставили без изменений.

Итоговые параметры модели классификации Random Forest (случайный лес): количество деревьев — 50 и размер выборки — 100 тыс. эталонных пикселей (эталонов).

Среднее значение кросс-валидации по пяти древесным породам составило 0,53 (сосна — 0,377; ель — 0,645; дуб — 0,687; берёза — 0,379; осина — 0,556). Классификация классов типов почв проведена алгоритмом Random Forest (Breiman, 2021), разновидность которого запрограммирована в инструменте Random Trees Classifier ArcGIS 10.

Фрагмент исходной карты типов почв масштаба 1:2 500 000 для территории ЦФО и результат её классификации по спутниковым тематическим продуктам MODIS представлены на рис. 3 (см. с. 216). На детализированной карте отражены типы почв, расположенные в пределах покрытых лесом территорий.

Пространственное моделирование запаса углерода в лесной подстилке

Следующим шагом исследования стало использование скорректированной карты типов почв (см. рис. 3б) совместно с другими тематическими продуктами для пространственного моделирования запаса углерода в лесной подстилке.

Математическая модель (1) расчёта углерода в лесной подстилке для преобладающей древесной породы и типа наземных экосистем учитывает типы почвы, минимальные и максимальные значения углерода в них, поправочные коэффициенты, характеризующие состояние и нарушенность почв в разных регионах (Щепащенко и др., 2013):

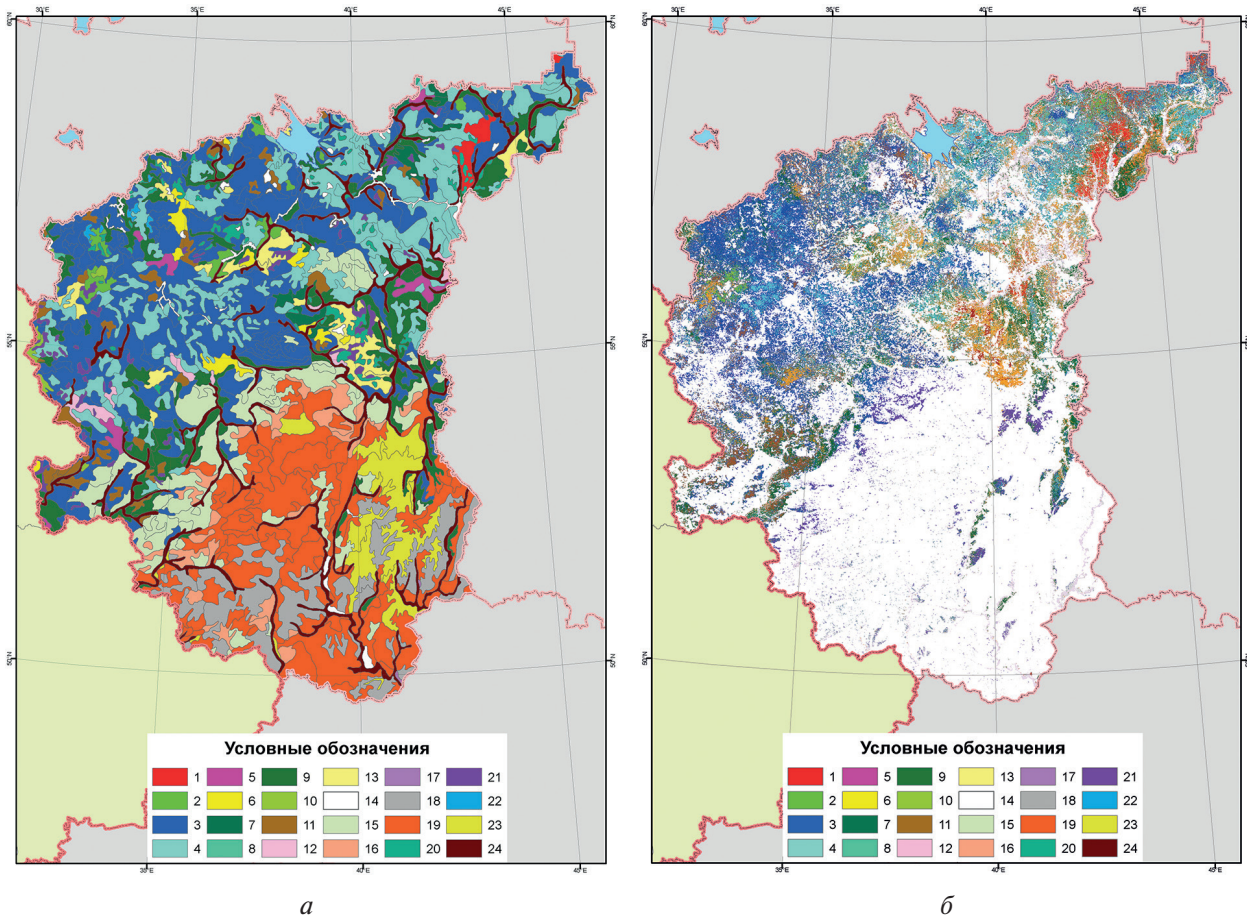


Рис. 3. Результат повышения детализации карты почв: *а* — почвенная карта ЦФО масштаба 1:2 500 000 (вектор); *б* — результат классификации почв по данным MODIS (растр) для лесов. Легенда с определением типов почв лесов ЦФО: 1 — подзолистые, преимущественно мелкоподзолистые; 2 — торфяно- и торфяно-подзолисто-глеевые; 3 — дерново-подзолистые, преимущественно мелко- и неглубокоподзолистые; 4 — дерново-подзолистые, преимущественно неглубокоподзолистые; 5 — дерново-подзолистые (без разделения); 6 — дерново-подзолистые со вторым осветлённым горизонтом; 7 — дерново-подзолистые глубокоголееватые и глееватые (в том числе поверхностно-глееватые), преимущественно глубокие; 8 — дерново-подзолистые остаточно-карбонатные; 9 — дерново-подзолистые иллювиально-железистые; 10 — дерново-галево-подзолистые и подзолисто-бурозёмные; 11 — дерново-подзолисто-глеевые; 12 — подзолы иллювиально-железистые (подзолы иллювиально-малогумусовые); 13 — подзолы глеевые торфянистые и торфяные, преимущественно иллювиально-гумусовые; 14 — дерново-глеевые и перегнойно-глеевые; 15 — серые лесные; 16 — тёмно-серые лесные; 17 — боровые пески; 18 — чернозёмы типичные; 19 — чернозёмы обыкновенные; 20 — торфяные болотные верховые; 21 — торфяные болотные низинные; 22 — торфянисто- и торфяно-глеевые болотные (глеезёмы торфянистые и торфяные болотные); 23 — луговые (без разделения); 24 — пойменные кислые

$$C = \left(C_{\min} + \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2} K_{reg} K_{sp} \right) K_{LU}, \quad (1)$$

где C — запас органического углерода в подстилке, $\text{кг}/\text{м}^2$; C_{\min} , C_{\max} — минимальное и максимальное содержание углерода в почвах, $\text{кг}/\text{м}^2$; K_{reg} — региональный поправочный коэффициент; K_{sp} — поправочный коэффициент, учитывающий влияние преобладающей породы; K_{LU} — поправочный коэффициент для различных типов землепользования и возможных нарушений (гарь, сенокос, пастбища, заброшенные сельскохозяйственные земли, залежи).

Исходные пространственные данные в математическую модель (1) расчёта углерода в лесной подстилке:

- 1) почвенная карта ЦФО с пространственным разрешением 230 м — результат классификации спутниковых продуктов (см. рис. 3б);
- 2) карта преобладающих древесных пород (Барталев и др., 2016);
- 3) карты природных зон РФ на основе классификации С. Ф. Курнаева (1973) и карта субъектов РФ.

Минимальное и максимальное содержание углерода в почвах получены из базы типичных почвенных профилей (Щепашенко и др., 2013; <https://egrpr.esoil.ru/>). Один и тот же тип почв территориально может быть представлен в нескольких природных зонах и регионах. Запасы подстилок на одном и том же типе почв могут различаться в разных зонах и регионах. Кроме того, на содержание углерода в почве оказывает влияние тип растительности и характер землепользования, а также возможные различные виды нарушения. Для учёта этих факторов в модели предложены соответствующие поправочные коэффициенты (Щепашенко и др., 2013).

Регионально-зональные коэффициенты вычислены по базе данных подстилок и представляют собой отношение среднего запаса подстилок в данном регионе к среднему по стране. Для каждой почвы был определён регион и зона, где она наиболее представлена. Почвы, выходящие за пределы своего типичного ареала, подвергались регионально-зональной корректировке. Например, если некоторая почва, являясь типичной для тундр европейской части страны с регионально-зональным коэффициентом 0,53, представлена также в европейской северной тайге (регионально-зональный коэффициент — 1,39), то содержание углерода в ней скорректировано следующим образом: $K_{reg} = 1,39/0,53 = 2,62$.

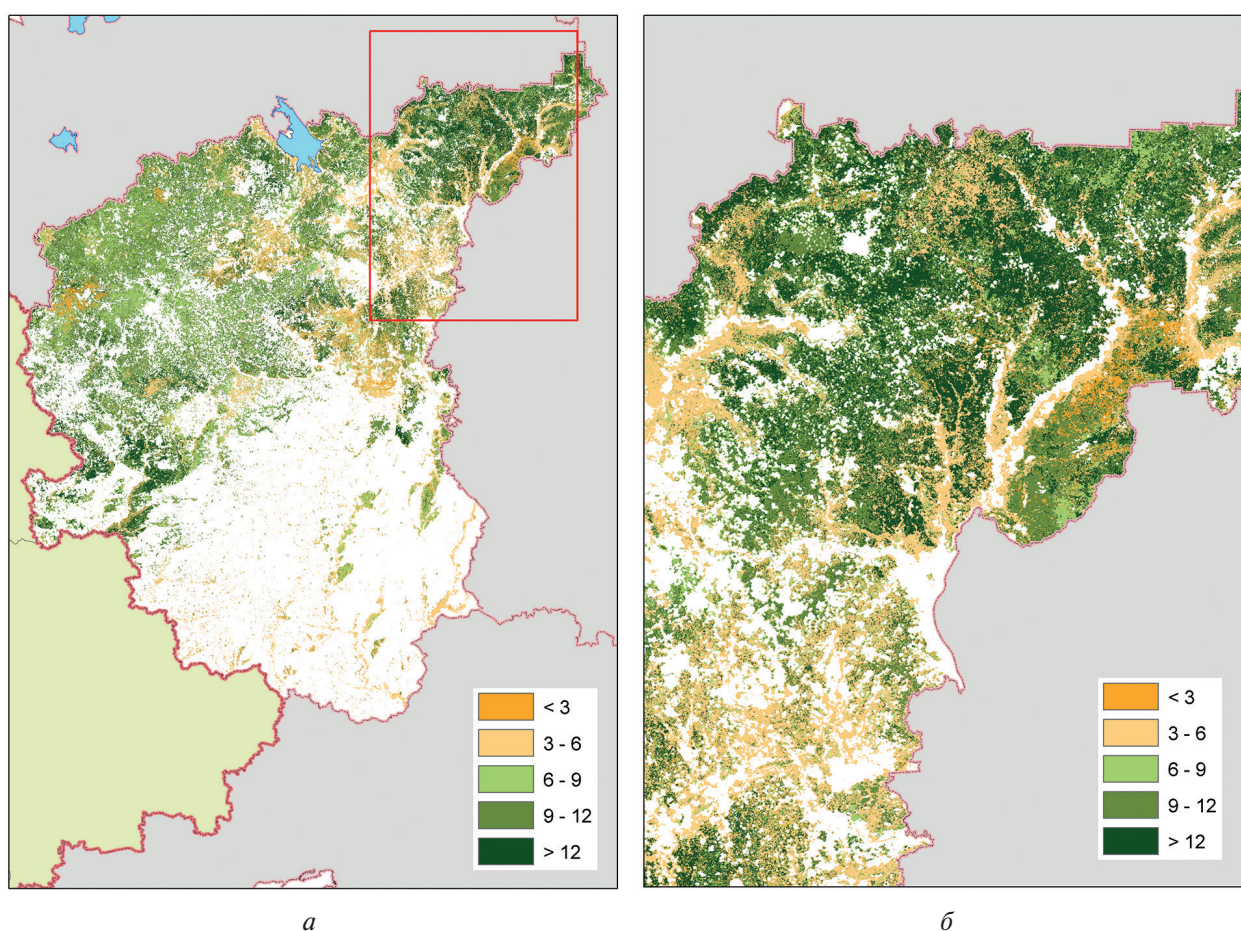


Рис. 4. Результат моделирования запасов углерода в лесной подстилке (Ст/га) (а); увеличенный фрагмент карты (б)

Результат моделирования запасов углерода в лесной подстилке (тС/га) на основе карты почв, приближенной по детальности к спутниковым продуктам MODIS (230 м), представлен на *рис. 4а* (см. с. 217), увеличенный фрагмент этой карты — на *рис. 4б*.

В результате применения описанной выше модели получен продукт на территорию Центрального федерального округа, пространственная детальность которого соответствует тематическим продуктам MODIS с характеристиками лесного покрова региона.

Результаты и обсуждение

Проведено сравнение карты запасов углерода в лесной подстилке с пространственным разрешением 1 км (*англ.* International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ)) и новой версии карты с разрешением 230 м (Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН)) в разрезе преобладающих древесных пород территории ЦФО (*таблица*).

Сравнение значений углерода в лесной подстилке в разрезе преобладающих древесных пород двух карт с пространственным разрешением 1 км (IIASA, МГУ) и 230 м (ЦЭПЛ РАН)

Порода	Карта с пространственным разрешением 1 км				Карта с пространственным разрешением 230 м			
	Мин.	Макс.	Среднее	Стандартное отклонение	Мин.	Макс.	Среднее	Стандартное отклонение
Сосна	1,0	31,0	10,2	5,0	1,6	21,0	7,2	3,2
Ель		30,0	11,9	5,4	2,1	22,6	8,8	4,0
Дуб		30,0	6,5	4,1	2,8	14,0	5,9	3,0
Берёза		31,0	11,6	4,5	1,9	26,2	10,4	5,6
Осина		31,0	11,1	4,2	1,7	17,7	7,0	1,8

В результате запасы углерода в лесной подстилке для сосны ЦФО варьируются в диапазоне от 1,6 до 21,0 тС/га (среднее значение $7,2 \pm 3,2$ тС/га); для ели — от 2,1 до 22,6 тС/га ($8,8 \pm 4,0$ тС/га); для дуба — от 2,8 до 14,0 тС/га ($5,9 \pm 3,0$ тС/га); для берёзы — от 1,9 до 26,2 тС/га ($10,4 \pm 5,6$ тС/га); для осины — от 1,7 до 17,7 тС/га ($7,0 \pm 1,8$ тС/га).

Содержание углерода в лесной подстилке в целом несколько ниже аналогичных показателей ранее полученной карты (Шепашенко и др., 2013): для сосны, берёзы и осины — диапазон от 1,0 до 31,0 тС/га (средние значения $10,2 \pm 5,0$; $11,6 \pm 4,5$; $11,1 \pm 4,2$ тС/га); для ели и дуба — от 1,0 до 30,0 тС/га ($11,9 \pm 5,4$; $6,5 \pm 4,1$ тС/га), но находятся в близких диапазонах.

Территория ЦФО расположена в зонах южной тайги, смешанных и широколиственных лесов, лесостепи. По оценкам О. В. Честных с соавторами (2007), в южной тайге европейской части России запасы углерода подстилок в сосняках варьируются от 11,8 до 23,3 тС/га, в ельниках — от 5,9 до 13,0 тС/га. В травных дубравах запас составляет 4,1 т/га, в березняках — 4,8 т/га. Приводятся следующие средние значения запасов лесной подстилки в насаждениях южной тайги и смешанно-широколиственных лесов европейского региона: сосна — 17,2 т/га; ель — 10,6 т/га; твердолиственные (дуб в том числе) — 5,4 т/га; берёза — 13,6 т/га; осина — 10,3 т/га. Эти данные также сопоставимы с полученными оценками запасов углерода в лесной подстилке на ЦФО.

Следует отметить, что на данный момент представленные метод и продукт по запасам углерода в лесной подстилке имеют ограничения в использовании для мониторинга эмиссии углерода, так как полученные результаты требуют дополнительной проверки. Дальнейшие работы будут направлены на оценку точности метода картографирования запасов углерода в лесной подстилке с помощью данных выборочных наземных измерений запасов углерода лесной подстилки на пробных площадях территории ЦФО и адаптацию метода к другим регионам РФ.

Заключение

С появлением новых спутниковых тематических продуктов MODIS с пространственным разрешением 230 м (карт основных типов наземных экосистем, преобладающих древесных пород, возраста, сомкнутости, полноты, запасов древостоя и классов бонитета) открылась возможность опробовать и применить метод классификации с обучением Random Forest для уточнения карты типов почв с целью улучшения пространственной детальности карты запасов углерода в лесной подстилке покрытых лесом территорий на примере Центрального федерального округа. Полученный продукт обладает более высокой пространственной вариацией и мозаикой классов типов почв по сравнению с исходной картой, что отразилось на результатах моделирования запаса углерода в лесной подстилке. В то же время предварительное сравнение с литературными данными о запасах углерода в лесной подстилке даёт возможность сделать предположение, что полученный продукт содержит распределение запасов, схожее с наземными исследованиями и данными отдельных авторов в зонах южной тайги, смешанных и широколиственных лесов и лесостепи европейской части России (Честных и др., 2007).

Дальнейшие работы будут направлены на более расширенную оценку точности карты запасов углерода с помощью данных выборочных наземных измерений характеристик запасов углерода лесной подстилки на пробных площадях исследуемой территории, а также адаптацию метода к другим регионам и лесорастительным зонам РФ.

Работа выполнена за счёт средств государственного задания по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (регистрационный номер научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ 124013000750-1).

Литература

1. *Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Луян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. *Ведрова Э. Ф., Мухортова Л. В., Иванов В. В., Кривобоков Л. В., Болонева М. В.* Восстановление запасов органического вещества после рубок в лесных экосистемах восточного Прибайкалья // Изв. Российской акад. наук. Сер. биологическая. 2010. № 1. С. 83–94.
3. *Волокитина А. В., Софронова Т. М.* Картографирование растительных горючих материалов // Сибирский лесной журн. 2014. № 6. С. 8–28.
4. *Грязькин А. В., Беляева Н. В., Кази И. А. и др.* Запасы углерода в сосняках и ельниках Ленинградской области // The Scientific Heritage. № 64. 2021. С. 3–5. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-64-2-3-6.
5. *Ершов Д. В., Соколова Е. Н.* Количественные оценки прямых пирогенных эмиссии углерода в лесах России по данным дистанционного мониторинга 2021 года // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 4. С. 68–85. DOI: 10.31509/2658-607x-202254-117.
6. *Иванова Г. А., Иванов В. А.* Оценка эмиссии углерода при пожарах разной интенсивности в сосняках Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. С. 63–67. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-2-63-67.
7. *Исаев А. С., Коровин Г. Н., Сухих В. И., Титов С. П., Уткин А. И., Голуб А. А., Замолодчиков Д. Г., Пряжников А. А.* Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. М.: Центр эколог. политики, 1995. 156 с.
8. *Каплина Н. Ф., Кулакова Н. Ю.* Фитомасса и запасы углерода и азота в контрастных по продуктивности нагорных дубравах южной лесостепи // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27. № 1(86). С. 35–42. DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10135.
9. *Курнаев С. Ф.* Лесорастительное районирование СССР. М.: Изд-во «Наука», 1973. 203 с. <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/kyrnaevles/text.pdf>.
10. *Матвеев А. М.* Запасы лесных горючих материалов и их географическая изменчивость в криолитозоне Средней Сибири // География и природ. ресурсы. 2006. № 4. С. 54–57.
11. *Матвеева Т. А., Цыкалов А. Г.* Роль рельефа в формировании запасов лесных горючих материалов // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. 27. № 3–4. С. 327–329.
12. *Телеснина В. М., Семенюк О. В., Богатырев Л. Г.* Свойства лесных подстилок во взаимосвязи с почвенным покровом в лесных экосистемах Подмосковья (на примере УОПЭЦ «Чашниково») // Вестн. Московского ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2017. № 4. С. 11–20.

13. Телеснина В. М., Семенюк О. В., Богатырев Л. Г. Подстилки и живой напочвенный покров биогеоценозов мелколиственных лесов Московской области // Почвоведение. 2023. № 7. С. 801–814. DOI: 10.31857/S0032180X2260158X.
14. Уткин А. И., Гульбе Я. И., Гульбе Т. А., Ермолова Л. С. Биологическая продуктивность лесных экосистем. Компьютерная база данных. М.: ИЛ РАН, ЦЭПЛ РАН, 1994.
15. Уткин А. И., Замолодчиков Д. Г., Честных О. В., Коровин Г. Н., Зукерт Н. В. Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.
16. Фридланд В. М. Почвенная карта РСФСР масштаба 1:2 500 000. М.: ГУГК, 1988.
17. Фуряев И. В., Цветков П. А. Формирование напочвенных горючих материалов в березняках разнотравных Верхне-Обского лесного массива // Международ. научно-исслед. журн. 2022. № 5(119). Ч. 2. С. 90–93. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.016>.
18. Чернова О. В., Голозубов О. М., Алябина И. О., Д. Г. Щепашенко. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286. DOI: 10.31857/S0032180X21030047.
19. Честных О. В., Лыжин В. А., Кошарова А. В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
20. Шишов Л. Л., Комов Н. В., Родин А. З., Фридланд В. М. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации. М.: Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева РАСХН, 2001. 400 с.
21. Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
22. Щепашенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Э. Ф. Ведрова. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132. DOI: 10.7868/S0032180X13020123.
23. Breiman L. Random forests // Machine Learning. 2001. V. 45. No. 1. P. 5–32.
24. Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A. et al. A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in-situ information // J. Land Use Science. 2011. No. 6(4). P. 245–259. DOI: 10.1080/1747423X.2010.511681.
25. Stolbovoi V., McCallum I. Land Resources of Russia. IIASA and RAS. Laxenburg, Austria, 2002. http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/index.htm.

Improving the method of mapping organic carbon in the forest litter in Central Federal District

D. V. Ershov, E. N. Sochilova, N. V. Koroleva, D. G. Schepaschenko

Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: Ershov@ifr.rssi.ru

The article presents a method for spatial modeling of carbon stock in the forest litter, improved in terms of mapping the main types of forest soils of the soil map of Russia on a scale of 1:2 500 000. The aim of the research is to bring the 1:2 500 000 scale soil map in forested areas closer in detail and spatial resolution to MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) satellite thematic products (230 m) and, based on it, simulate carbon stocks in the forest litter. The proposed method for estimating carbon stocks in the litter is intended to combine the previously developed model and more detailed information about soils and vegetation. The mathematical model for estimating carbon in the forest floor for the predominant tree species and the type of terrestrial ecosystems takes into account soil types, minimum and maximum carbon values in them, correction coefficients characterizing the state and disturbance of soils in different regions. The article describes the input data used in the estimation model, their preparation, and the classification of the soil map using the Random Forest method. The results of a preliminary comparison of estimates of carbon stocks in the forest litter obtained in this work with the literature data and with the previously obtained map are presented.

Keywords: forest litter, carbon stock, soil map, types of forest soils, MODIS, Random Forest, Central Federal District

Accepted: 03.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-212-222

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
2. Vedrova E. F., Mukhortova L. V., Ivanov V. V., Krivobokov L. V., Boloneva M. V., Post-logging organic matter recovery in forest ecosystems of eastern baikal region, *Biology Bull.*, 2010, No. 1, pp. 83–94, DOI: 10.1134/S1062359010010103.
3. Volokitina A. V., Sofronova T. M., Vegetation Fuel Mapping, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 6, pp. 8–28 (in Russian).
4. Gryazkin A. V., Belyaeva N. V., Kazi I. A. et al., Carbon reserves in pine and spruce forests Leningrad region, *The Scientific Heritage*, No. 64, 2021, pp. 3–5 (in Russian), DOI: 10.24412/9215-0365-2021-64-2-3-6.
5. Ershov D. V., Sochilova E. N., Quantitative estimates of direct pyrogenic carbon emissions in forest of Russia according to remote monitoring data 2021, *Voprosy lesnoi nauki*, 2022, Vol. 5, No. 4, pp. 68–85 (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607x-202254-117.
6. Ivanova G. A., Ivanov V. A., Estimating carbon emissions from fires of different intensity in the pine forests of Siberia, *Interesko Geo-Sibir'*, 2021, pp. 63–67 (in Russian), DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-2-63-67.
7. Isaev A. S., Korovin G. N., Sukhikh V. I., Titov S. P., Utkin A. I., Golub A. A., Zamolodchikov D. G., Pryazhnikov A. A., *Ekologicheskie problemy pogloshcheniya uglekislogo gaza posredstvom lesovosstanovleniya i lesorazvedeniya v Rossii* (Ecological Problems of Carbon Dioxide Absorption Due to Reforestation and Aforestation in Russia: An Analytical Review), Moscow: Tsentr ekologicheskoi politiki, 1995, 156 p. (in Russian).
8. Kaplina N. F., Kulakova N. Yu., Phytomass and carbon and nitrogen reserves in the upland oak forests of the southern forest steppe, *Aridnye ekosistemy*, 2021, Vol. 27, No. 1(86), pp. 35–42, DOI: 10.1134/S2079096121010091.
9. Kurnaev S. F., *Lesorastitel'noe raionirovaniye SSSR (Forest growth zoning of the USSR)*, Moscow: Izd. "Nauka", 1973, 203 p. (in Russian), <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/kyrnaevles/text.pdf>.
10. Matveev A. M., The reserves of combustible materials inside the forest and their geographical variability in the permafrost zone of Central Siberia, *Geografiya i prirodnye resursy*, 2006, No. 4, pp. 54–57 (in Russian).
11. Matveeva T. A., Tsykalov A. G., The role of relief in the formation of reserves of forest combustible materials, *Khvoynye boreal'noi zony*, 2010, Vol. 27, No. 3–4, pp. 327–329 (in Russian).
12. Telesnina V. M., Semenyuk O. V., Bogatyrev L. G., The features of litters in connection of ground layer in Moscow outside ("Chashnikovo" station), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 17: Pochvovedenie*, 2017, No. 4, pp. 11–20 (in Russian).
13. Telesnina V. M., Semenyuk O. V., Bogatyrev L. G., The litters and the living ground cover as informational characteristics of biogeocenoses for Moscow oblast small-leaved forests, *Pochvovedenie*, 2023, No. 7, pp. 801–814 (in Russian), DOI: 10.31857/S0032180X2260158X.
14. Utkin A. I., Gul'be YA. I., Gul'be T. A., Ermolova L. S., *Biologicheskaya produktivnost' lesnykh ekosistem. Komp'yuternaya baza dannykh* (Biological productivity of forest ecosystems. Computer database), Moscow: IL RAN, TSEHPL RAN, 1994 (in Russian).
15. Utkin A. I., Zamolodchikov D. G., Chestnykh O. V., Korovin G. N., Zukert N. V., Forests of Russia as a reservoir-storage of organic carbon in the biosphere, *Lesovedenie*, 2001, No. 5, pp. 8–23 (in Russian).
16. Fridland V. M., *Pochvennaya karta RSFSR masshtaba 1:2 500 000* (Soil map of the RSFSR scale 1:2 500 000), Moscow: GUGK, 1988 (in Russian).
17. Furyaev I. V., Tsvetkov P. A., Formation of surface fuels in birch forests of various grasses of Upper-Obisk Forest area, *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2022, No. 5(119), Pt. 2, pp. 90–93 (in Russian), <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.119.5.016>.
18. Chernova O. V., Golozubov O. M., Alyabina I. O., D. G. Schepaschenko, Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in Russian Federation, *Pochvovedenie*, 2021, No. 3, pp. 273–286 (in Russian), DOI: 10.31857/S0032180X21030047.
19. Chestnykh O. V., Lyzhin V. A., Koksharova A. V., The carbon reserves in litters of forests in Russia, *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 114–121 (in Russian).
20. Shishov L. L., Komov N. V., Rodin A. Z., Fridland V. M., *Pochvennyi pokrov i zemel'nye resursy Rossiiskoi Federatsii* (Soil cover and land resources of the Russian Federation), Moscow: Pochvennyi institut imeni V. V. Dokuchaeva RASKHN, 2001, 400 p. (in Russian).
21. Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I., Gerasimova M. I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p. (in Russian).
22. Schepaschenko D. G., Mukhortova L. V., Shvidenko A. Z. et al., The Pool of organic carbon in the soils of Russia, *Pochvovedenie*, 2013, No. 2, pp. 123–132 (in Russian), DOI: 10.7868/S0032180X13020123.
23. Breiman L., Random forests, *Machine Learning*, 2001, Vol. 45, No. 1, pp. 5–32.

24. Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A. et al., A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in-situ information, *J. Land Use Science*, 2011, No. 6(4), pp. 245–259, DOI: 10.1080/1747423X.2010.511681.
25. Stolbovoi V., McCallum I., *Land Resources of Russia*, IIASA and RAS, Laxenburg, Austria, 2002, http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/index.htm.