

Оценка связей между факторами почвообразования и запасами органического углерода в лесных почвах Карелии и Карельского перешейка по тематическим спутниковым продуктам

А. Н. Нарыкова, А. Д. Никитина, А. С. Плотникова,
М. А. Данилова, Н. Е. Шевченко

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Москва, 117799, Россия
E-mail: narykovaanna@yandex.ru*

Дана оценка связи содержания и запасов органического углерода почв, а также соотношения углерода к азоту (C:N) и факторов почвообразования, охарактеризованных через полученные по тематическим спутниковым продуктам пространственные переменные. Объект исследования — леса Карелии и Карельского перешейка. Отбор и химический анализ образцов выполнен в рамках работ по программе ICP Forests (*англ.* International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests). В качестве источников данных о климатических условиях, рельефе и растительности в статье рассматриваются следующие тематические геопространственные переменные: цифровая модель рельефа ArcticDEM, глобальная климатическая база данных WorldClim, спутниковые данные MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra Snow Cover Daily Global, атмосферный реанализ ERA5-Land (*англ.* European Reanalysis 5-го поколения), карта основных типов растительности Северо-Запада России и данные ICP Forests. Проведённый корреляционный анализ показал отклик свойств почв на среднегодовую температуру воздуха, осадки холодного периода года и среднегодовое количество осадков. Выявлена более значимая корреляция характеристик почв с высотой снежного покрова по данным атмосферного реанализа ERA5-Land, чем с заснеженностью территории по данным MODIS. Связь переменных рельефа со свойствами почв оказалась слабовыраженной, предположительно вследствие особенностей закладки сети натуральных измерений и небольших перепадов высот исследуемой территории. Существенные различия установлены между группами растительности для соотношения C:N в лесной подстилке как по данным карты растительности Северо-Запада России, так и по геоботаническим описаниям ICP Forests. Запасы углерода значимо различались между группами растительности ICP Forests только в минеральном слое. При сравнении лесов в автоморфных и полугидроморфных условиях значимых различий свойств почв не установлено. Многие результаты корреляционного анализа сопоставлены с результатами, полученными в аналогичных исследованиях в других природно-климатических условиях.

Ключевые слова: спутниковые данные, корреляционный анализ, коэффициент корреляции Спирмена, метод Краскела–Уоллиса, содержание и запасы почвенного органического углерода, соотношение C:N

Одобрена к печати: 15.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-196-211

Введение

На процессы поступления соединений углерода, их трансформации, накопления и выноса влияют следующие факторы почвообразования: климат, рельеф, почвообразующие породы, биота и антропогенная деятельность (Кузнецова, 2021; Кузнецова и др., 2020; Лукина и др., 2022; Wiesmeier et al., 2019). Воздействие климатических факторов на почвенный углерод проявляется на региональном уровне через поступление солнечной радиации и атмосферных осадков, которые обуславливают распространение лесов и их биологическую продуктивность. Рельеф влияет на перераспределение потоков вещества и энергии, а также на продуктивность биоценозов (Бахмет, 2018; Рыжова и др., 2022; Чернова и др., 2020). Почвообразующие породы, от которых зависит химический и гранулометрический состав почв, регулируют уровень накопления органического углерода в них: почвы, формирующи-

еся на богатых почвообразующих породах, содержащих больше тонких частиц, отличаются высоким уровнем аккумуляции углерода (Лукина и др., 2022). Основным источником органического углерода — растительный опад: с опадом растений органическое вещество попадает в почву, где под воздействием почвенной биоты проходят этапы его трансформации с последующим накоплением и выносом соединений углерода (Почвоведение..., 1988; Честных и др., 2007).

Современные методы цифрового почвенного картографирования основаны на использовании информации всех факторов почвообразования (McBratney et al., 2003). В работе Н. В. Гопп с соавторами (2023) представлен обзор литературных источников, посвящённых картографированию содержания и запасов почвенного органического углерода. Анализ показал, что наиболее используемыми геопространственными предикторами являются данные о рельефе, растительности и климате. На основе проведённого обзора в настоящем исследовании поставлена цель — выявить связи между часто используемыми геопространственными переменными, характеризующими факторы почвообразования, и характеристиками почв в лесах Карелии и Карельского перешейка.

Объекты и методы исследования

Район исследования

Исследования проводились на территории Республики Карелии и Карельского перешейка (КП) (Ленинградская обл.) (рис. 1). Рельеф Карелии неоднороден, основные черты определены поднятиями земной коры — Западно-Карельским, Восточно-Карельским и Северо-Карельским и зонами опускания — Центрально-Карельской и Южно-Карельской. На территории Карельского перешейка преобладают холмисто-грядовые формы с ориентацией на север и северо-запад. Район исследования относится к атлантико-арктической зоне умеренного пояса с преобладанием воздушных масс атлантического и арктического происхождения. Близость морей, интенсивная деятельность циклонов и количество поступающей солнечной радиации обуславливают прохладное и короткое лето, большое количество осадков и высокую относительную влажность в течение года. Почвенный покров Карелии образован макро- и мезосочетаниями почв, которые принадлежат к подзолисто-бурозёмному, болотно-подзолисто-бурозёмному и болотному типам. На территории КП преобладают подзолистые и дерново-подзолистые почвы (Аккумуляция..., 2018; Волков, 2008; Морозова, 2001; Назарова, 2014). Республика Карелия расположена в подзонах северной и средней тайги. Сосновые леса занимают 64 % лесопокрытой площади, еловые — 25 %, остальная часть приходится на берёзовые, осиновые леса и сероольшаники. Карельский перешеек расположен в подзоне средней тайги, где сосновые леса занимают около 50% лесопокрытой площади, еловые — 29 %, берёзовые — 16 % (Бахмет, 2018; Доронина, 2007; Змиртович, 2011).

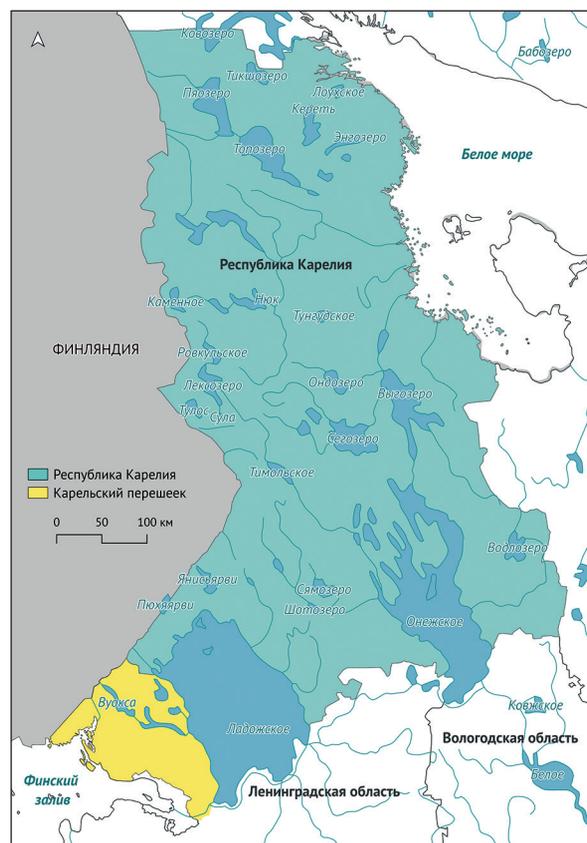


Рис. 1. Район исследования

Полевые данные

С 2007 по 2010 г. в лесах Карелии и Карельского перешейка были проведены исследования в рамках международной программы по оценке и мониторингу влияния загрязнения воздуха на леса ICP Forests (*англ.* International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests). В Карелии была заложена регулярная сеть из 100 пунктов постоянного наблюдения (ППН) с шагом 32×32 км, на территории КП — 16×16 км. Всего в настоящем анализе используются данные 138 ППН, включающие отбор почвенных образцов для лабораторного анализа, характеристику условий формирования почв, а также полный флористический список с учётом ярусной структуры растительности (Бахмет и др., 2011).

Пространственные переменные, характеризующие факторы почвообразования

На основе результатов литературного обзора (Гопп и др., 2023) для настоящего исследования был подготовлен ряд тематических геопространственных переменных, характеризующих рельеф, климат и растительность Республики Карелии и Карельского перешейка (*табл. 1*).

Таблица 1. Тематические геопространственные переменные для выполнения корреляционного анализа

Факторы	Переменные	Источник данных
Рельеф	Высота рельефа, м н. у. м.*	Цифровая модель рельефа ArcticDEM
	Уклон рельефа, град	
Климат	Среднегодовая температура, °С	Глобальная климатическая база данных WorldClim
	Среднегодовое количество осадков, мм	
	Осадки за летний период года, мм	
	Осадки за зимний период года, мм	
	Заснеженность территории, %	MODIS Terra Snow Cover Daily Global
	Высота снежного покрова, м	Атмосферный реанализ ERA5-Land
Растительность	Группы растительности	Карта основных типов растительности Северо-Запада России
		Геоботанические данные ICP Forests

* Над уровнем моря.

В качестве источника данных о рельефе используется высокодетальная цифровая модель рельефа (ЦМР) ArcticDEM, содержащая информацию о высотах рельефа всего Арктического региона (Porter et al., 2018). Модель создана на основе стереоскопических ЦМР, полученных по спутниковым изображениям сверхвысокого пространственного разрешения Maxar (30–50 см), включая данные WorldView-1, -2, -3 и GeoEye-1. Как известно, ArcticDEM не покрывает полностью территорию Северо-Запада России (Полякова и др., 2020). Ранее в работах заполнение «пробелов» ArcticDEM на территории Карелии и Карельского перешейка было выполнено с помощью ЦМР ETOPO (*англ.* Earth Topography) (Нарыкова, Плотникова, 2023). В рамках настоящего исследования были отобраны ППН ICP Forests, которые полностью покрыты данными ArcticDEM. Геопространственная переменная, характеризующая уклон местности, создана с помощью функции Slope библиотеки Terrain облачной платформы Google Earth Engine.

Источником данных климатических переменных среднегодовой температуры воздуха, среднегодового и сезонного количества осадков является глобальная климатическая база данных (БД) WorldClim с пространственным разрешением 1 км. Модель WorldClim созда-

на с помощью методов интерполяции архивных данных 1950–2000 гг. различного пространственного уровня, включая метеорологические наблюдения, информацию о высотах рельефа и спутниковые изображения (Hijmans et al., 2005). Дополнительными климатическими пространственными переменными становятся значения высоты снежного покрова, полученные на основе атмосферного реанализа ERA5-Land (англ. European Reanalysis 5-го поколения), и процент заснеженности территории MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra Snow Cover Daily Global (Hall et al., 2006).

Для определения взаимосвязи между характеристиками почв и растительностью была выбрана карта основных типов растительности Северо-Запада России, полученная в результате полуавтоматической классификации спутниковых данных (Сохранение..., 2011). Для проведения корреляционного анализа классы растительности были объединены в четыре группы: светлохвойные, темнохвойные, лиственные и смешанные. Вторым источником данных, характеризующих растительный покров, стали геоботанические описания ICP Forests. Определённые в полевых условиях типы леса представлены тремя группами: сосновые, берёзовые и еловые леса.

Оценка содержания, запасов почвенного органического углерода и соотношения C:N

Содержание (г/кг), запасы (кг/м²) почвенного органического углерода и соотношение углерода к азоту (C:N) были найдены пересчётом исходных данных ICP Forests по горизонтам для слоя 0–30 см и лесной подстилки. Запас органического углерода (ЗОУ) в лесной подстилке рассчитывался как произведение содержания органического углерода (СОУ) и запаса подстилки, а запас углерода в минеральных горизонтах — как произведение содержания органического углерода, плотности минерального горизонта и его мощности.

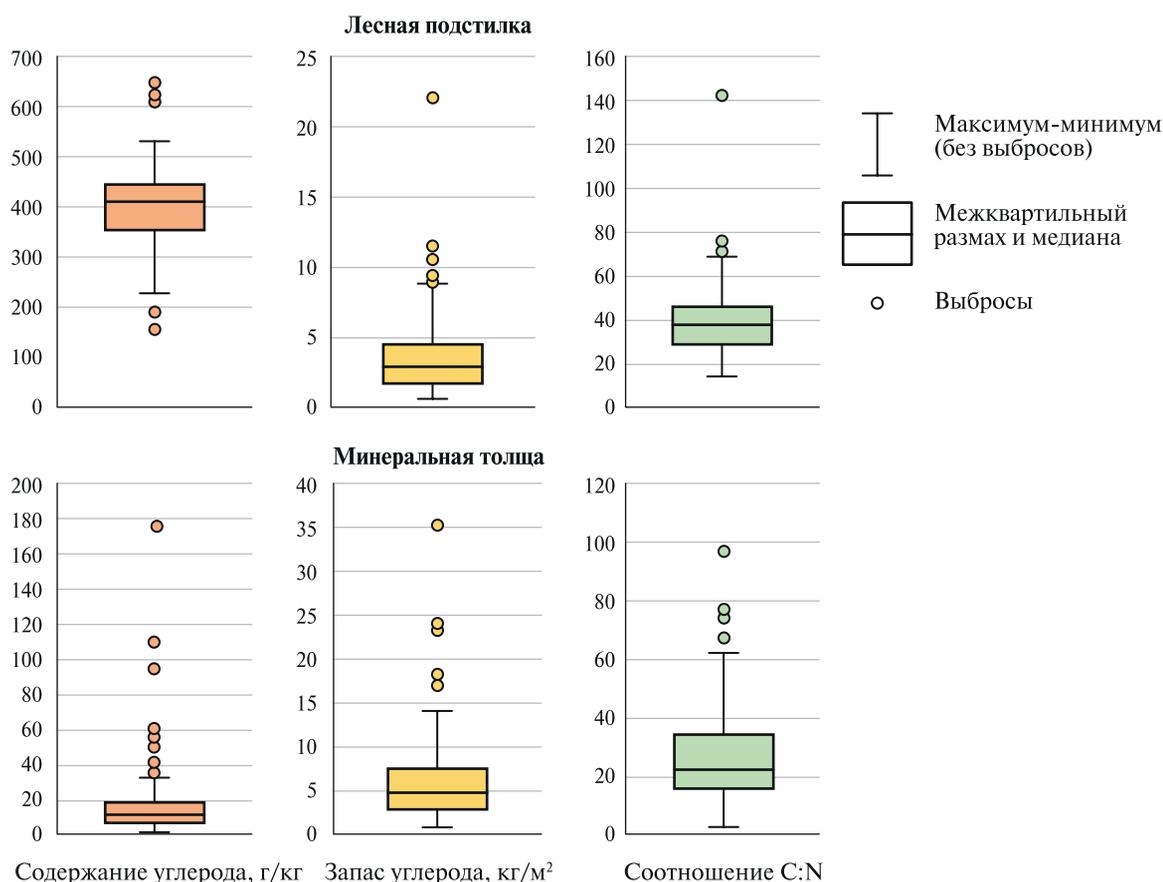


Рис. 2. Содержание и запас углерода, соотношение C:N в лесной подстилке и 0–30 см

Согласно работе (Чернова и др., 2021), запасы углерода в минеральных горизонтах до глубины 30 см изменяются от долей единицы до 15–18 кг/м²; запасы углерода в подстилках варьируют от 0 до 3,6 кг/м². В БД «Почвенные характеристики Северной Евразии» (Честных, Замолотчиков, 2018) для лесных экосистем приведены следующие значения запасов углерода: в минеральном слое 0–30 см — от 0,3 до 56 кг/м², в подстилках — от 0,01 до 34 кг/м². Авторы исследования (Щепашенко и др., 2013) приводят суммарные значения запасов углерода в лесной подстилке и метровом слое почвы: лесотундра, северная тайга — 5,22 кг/м²; средняя тайга — 2,78 кг/м²; южная тайга — 4,09 кг/м²; смешанные леса — 6,39 кг/м². Содержание углерода в минеральной толще почв было рассчитано как средневзвешенное значение с учётом мощности каждого почвенного горизонта. Соотношение C:N характеризует обогащённость гумуса азотом; чем уже это отношение, тем выше содержание азота в почве и скорость разложения органического вещества.

На рис. 2 (см. с. 199) представлены диаграммы размаха содержания и запасов почвенного органического углерода и соотношения C:N в лесной подстилке и минеральной толще. Содержание органического углерода в подстилке варьировалось от 225 до 531 г/кг с медианным значением 410 г/кг. Разброс значений запасов углерода подстилки охватывал диапазон от 0,6 до 8,7 кг/м² с медианным значением 2,9 кг/м². Соотношение C:N варьируется в пределах от 14 до 68,5 с медианным значением 37,5. Максимальное значение содержания углерода в минеральной толще достигает 32,6 г/кг, а минимальное близко к 1, медиана составляет 11,6 г/кг. В минеральной толще ЗОУ варьируется от 0,76 до 14 кг/м² с медианным значением 4,71 кг/м²; соотношение C:N варьируется больше, чем в лесной подстилке, — от 2,4 до 61,7; медиана — 21,9.

Оценка условий увлажнения

Степень и характер увлажнения почв — ведущий фактор, влияющий на их свойства, в том числе на содержание и запасы органического углерода в лесной подстилке и минеральной толще (Морозова, 2001; Рыжова и др., 2022; Синькевич и др., 2009). Основываясь на исследованиях Б. Б. Полюнова (1956), А. И. Перельмана (1975) определил, что все элементарные ландшафты сопряжены с миграционными потоками вещества, которые обусловлены рельефом. С использованием геоботанических описаний ICP Forests и на основе индикаторных свойств некоторых видов мхов были выделены группы увлажнения (автоморфные, полугидроморфные, гидроморфные) для исследуемых ППН. Для оценки типа условий местообитаний по увлажнению почвы была применена экологическая шкала Э. Ландольта (Landolt et al., 2010) по показателю увлажнения почвы F. Оценка геоботанических описаний рассчитывалась как средние из балльных оценок видов с учётом их обилия. Геоботанические описания со средневзвешенным баллом показателя F от 1 до 5 были отнесены к автоморфному типу увлажнения почв, от 5 до 6 — к полугидроморфному и выше 6 — к гидроморфному.

Статистический анализ

Тематические спутниковые продукты используются при изучении взаимосвязей факторов почвообразования и характеристик почв. Корреляционный анализ характеристик почв и тематических пространственных переменных является подготовительным этапом цифрового почвенного картографирования (Гаврилюк и др., 2021; Duarte et al., 2022; Gu et al., 2022; Hounkpatin et al., 2021; Zhang et al., 2022). К задачам корреляционного анализа относятся: предварительная оценка связи рассматриваемых свойств объектов и факторов, предположительно влияющих на их значения; сокращение количества объясняющих переменных для повышения устойчивости моделей; исключение влияния мультиколлинеарных факторов и дальнейшее обоснование факторов со значимой корреляцией. В исследованиях с большим набором данных часто используется коэффициент корреляции Пирсона (англ. K. Pearson) (Duarte et al., 2022 и др.), эффективный при нормальном распределении данных и отсутствии

выбросов. В других случаях предпочтительней использовать непараметрические коэффициенты корреляции, в частности коэффициент корреляции Спирмена (англ. С. Е. Spearman) (Strand et al., 2016). Результаты проведенного анализа могут быть использованы для определения мультиколлинеарности факторов и значимости их в дальнейшем моделировании рассматриваемых почвенных характеристик.

Для оценки связей характеристик рельефа, климата и растительности с СОУ, ЗОУ и соотношением C:N в работе использовался коэффициент корреляции Спирмена (Spearman, 1904). Для определения статистически значимых различий характеристик почв в зависимости от типов растительности применялся непараметрический метод множественного сравнения Краскела–Уоллиса (англ. Kruskal–Wallis) с последующим попарным сравнением (Kruskal, Wallis, 1952).

Результаты и обсуждение

В результате проведенного корреляционного анализа получены значимые коэффициенты корреляции между геопространственными переменными, характеризующими рельеф, климат и растительность, и почвенными характеристиками (табл. 2). Наименее значимая корреляция была установлена для СОУ как в лесной подстилке, где не было получено статистически значимых коэффициентов корреляции, так и в минеральной толще почв, где полученные коэффициенты указывали на слабую связь или её отсутствие.

Таблица 2. Результаты выявления взаимосвязи климата и рельефа с почвенными характеристиками с помощью вычисления коэффициента корреляции Спирмена

Переменные	Лесная подстилка			Минеральная толща		
	ЗОУ	СОУ	C:N	ЗОУ	СОУ	C:N
<i>Рельеф</i>						
Высота, м н. у. м.	0,23	−0,20	0,12	−0,18	−0,08	0,33
Уклон, град	−0,08	−0,13	−0,08	0,15	0,19	0,08
<i>Климат</i>						
Среднегодовая температура воздуха, °С	−0,39	−0,09	−0,34	0,35	0,2	−0,42
Среднегодовое количество осадков, мм	−0,34	−0,09	−0,36	0,39	0,26	−0,29
Осадки за летний период, мм	−0,33	−0,16	−0,26	0,26	0,24	0,03
Осадки за зимний период, мм	−0,36	−0,10	−0,39	0,39	0,25	−0,32
Заснеженность участка, %	0,26	0,02	0,26	−0,27	−0,11	0,33
Высота снежного покрова, м	0,36	0,03	0,3	−0,37	−0,25	0,38

Примечание: Оттенки ячеек красного цвета указывают на статистически значимую ($p < 0,05$) отрицательную связь, синего — на положительную связь. Белым цветом выделены статистически незначимые коэффициенты корреляции.

Наиболее тесная положительная связь выявлена между C:N и высотой над уровнем моря: чем больше высота рельефа, тем шире соотношение C:N в минеральной толще. Значимая положительная корреляция также выявлена между запасами углерода в лесной подстилке и высотой над уровнем моря: чем выше положение в рельефе, тем больше запасы углерода. В слое 0–30 см наблюдается обратная связь: с увеличением высоты рельефа уменьшаются запасы углерода. Статистически значимая связь характеристик почв с уклоном была установлена для СОУ в минеральной толще и ЗОУ в лесной подстилке.

Полученные коэффициенты корреляции сравнивались с результатами аналогичных зарубежных исследований (табл. 3). В рассмотренных работах максимальные значения коэффициентов корреляции были получены для описания связей запасов углерода и осадков на

территории Китая (Wang et al., 2021), а также запасов углерода и растительности в Австралии (Wang et al., 2018).

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа в аналогичных зарубежных работах

	МАТ	МАР	ELE	VEG	АОИ	Публикация
СОУ	0,05	-0,3	-0,25	-0,06	Доминиканская республика	(Duarte et al., 2022)
	0,37	0,17	0,17	-	Восточный Китай	(Gu et al., 2022)
	-0,24	0,23	-0,25	0,07	Китай	(Zhang et al., 2022)
ЗОУ	-0,33	0,1	0,29	0,53	Австралия	(Wang et al., 2018)
	-0,33	0,66	0,18	0,12	Китай (1980)	(Wang et al., 2021)
	-0,27	0,51	0,21	0,33	Китай (2010)	

Примечание: АОИ (англ. Area of Interest) — территория исследования; МАТ (англ. Mean annual air temperature) — среднегодовая температура воздуха, °С; МАР (англ. Mean Annual Precipitation) — среднегодовое количество осадков, мм; ELE (англ. Elevation) — высота рельефа, м н.у.м.; VEG — индекс NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) — нормализованный разностный вегетационный индекс)/спектральные каналы спутниковых данных. Прочерк в ячейке указывает, что корреляционный анализ не проводился. Оттенки ячеек красного цвета указывают на отрицательную связь, синего — на положительную связь.

Влияние рельефа на накопление и содержание углерода в лесных почвах проявляется через перераспределение потоков вещества и энергии, которые обуславливают формирование почв и растительности (Морозова, 2001). В нашем исследовании не обнаружено высоких значений коэффициентов корреляции между морфометрическими параметрами рельефа и характеристиками почв, что свидетельствует об отсутствии связей. Согласно литературным источникам, максимальные высоты рельефа Карелии и КП достигают 578 м, преобладают абсолютные отметки 100–300 м. В нашем исследовании высоты рельефа ППН в основном сконцентрированы в диапазоне 40–288 м н.у.м., распределение данных близко к бимодальному с двумя максимумами (рис. 3). Вероятно, заложенные ППН не отражают полное разнообразие высот рельефа исследуемой области.

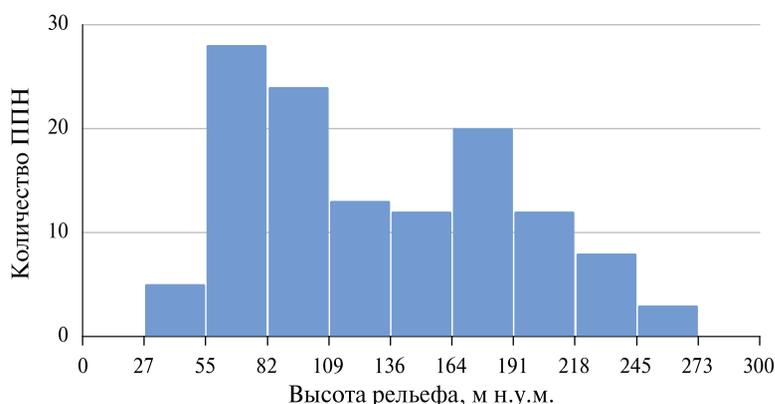


Рис. 3. Распределение высот рельефа ППН на основе ЦМР ArcticDEM

Анализ литературных источников показал, что высота рельефа становится определяющей для геопространственного моделирования содержания и запасов углерода (Гопп и др., 2023). В работе (Duarte et al., 2022) моделирование запасов углерода было проведено для всей территории Доминиканской республики, где значения высоты варьируют от 0 до 3087 м. Аналогичный диапазон высот встречается и в других исследованиях: в Южно-Африканской республике — от 0 до 3410 м (Venter et al., 2021); в Бразилии — от 0 до 3014 м (Gomes et al.,

2019); в провинции Альборз в Иране — от 1080 до 4101 м (Hateffard et al., 2019); в Восточном Китае — от 0 до 2800 м (Gu et al., 2022); на о. Хайнань — от 0 до 1840 м (Guo et al., 2015). Исходя из амплитуды высот проанализированных исследований, где высота рельефа была одним из определяющих предикторов, Карелия и КП не имеют сильных перепадов высот, с чем может быть связана слабая корреляция с характеристиками почв.

Автоморфные и полугидроморфные условия

При сравнении почвенных характеристик в автоморфных и полугидроморфных условиях статистически значимых различий не выявлено. Полученный результат можно объяснить недостаточной выборкой, поскольку ППН были заложены с определённым шагом регулярной сети без цели установления вариабельности характеристик почв лесных экосистем в зависимости от условий увлажнения (Бахмет и др., 2011). Изменение почвенных свойств по мере движения по склону от автоморфных к гидроморфным условиям на территории Карелии и других регионов неоднократно подтверждалось в литературных источниках (Бахмет, 2018; Морозова, 2001; Рыжова и др., 2022; Синькевич и др., 2009; Чернова и др., 2020; Шарый и др., 2018).

Климат играет важную роль в формировании гидротермического режима почв, так как обуславливает поступление солнечной радиации, которая является основным источником энергии для живых организмов, и атмосферных осадков, регулирующих увлажнение почв. В представленном исследовании характеристики почв имели наиболее тесную связь с климатическими переменными, а именно со среднегодовой температурой воздуха, количеством осадков в зимний период и среднегодовым количеством осадков.

Значимая корреляция исследованных характеристик почв со среднегодовой температурой воздуха установлена для лесной подстилки и минеральных горизонтов почв. Наиболее высокие коэффициенты корреляции получены для C:N в 0–30 см и ЗОУ в лесной подстилке, причём для подстилки связи отрицательные, а для слоя минеральной толщи — положительные.

Отрицательная корреляция между среднегодовой температурой воздуха и запасами углерода объясняется значительным накоплением лесной подстилки. В условиях холодного климата, высокой степени увлажнения и слабой аэрации скорость разложения растительного опада в хвойных лесах снижается, что способствует накоплению более мощной лесной подстилки и, следовательно, более высоким запасам органического углерода (Песьякова, Феклисов, 2017). В северотаёжных лесах беспозвоночные животные принимают слабое участие в переработке подстилки из-за их сравнительно бедного видового разнообразия. Таким образом, несмотря на небольшой приток органического вещества на севере, накапливается мощная подстилка по сравнению со средней тайгой, где более высокая степень разложения и минерализации (Биеньковски и др., 2003).

При более высокой среднегодовой температуре воздуха в средней тайге скорость разложения растительного опада более высокого качества с относительно высокой концентрацией азота, что, в свою очередь, приводит к снижению соотношения C:N в лесной подстилке. Аналогичная связь между C:N в подстилке и температурой воздуха была выявлена при моделировании C:N и СОУ на территории Швейцарии (Zhou et al., 2021). Более узкое соотношение C:N обнаружено на равнинных территориях страны, где среднегодовая температура воздуха выше, чем в высокогорных районах Альп.

В минеральной толще корреляция положительная: чем выше температура воздуха, тем больше ЗОУ и СОУ. Положительная корреляция характеристик почв как со среднегодовой температурой, так и осадками в слое 0–30 см уже была установлена в ранее опубликованных исследованиях (Callesen et al., 2003; Strand et al., 2016; Wiesmeier et al., 2019). Данная связь на региональном и глобальном уровне объясняется возрастанием продуктивности лесов, производством большего количества растительного опада и увеличением скорости процессов его разложения.

Как и с температурой, среднегодовое количество осадков демонстрирует отрицательную связь с характеристиками подстилки и положительную — с характеристиками минеральной толщи почв. Корреляция между среднегодовым количеством осадков и соотношением C:N в лесной подстилке, в которой более узкое соотношение C:N обнаруживается при более высоком количестве осадков, может быть объяснена тем, что при повышении количества осадков увеличивается скорость разложения растительного опада, что приводит к снижению C:N. Аналогичная отрицательная корреляция в лесной подстилке между среднегодовой температурой и осадками и C:N ранее была получена в работе И. Каллесена с соавторами (Callesen et al., 2007) для лесных почв Норвегии. Статистическая связь почвенных характеристик с количеством осадков зимнего периода показала более значимые отрицательные коэффициенты корреляции, но оставалась достоверной и для осадков летнего периода.

Снег — важный экологический фактор в лесных экосистемах, изменяющийся в широтном направлении на территории Карелии. Способствуя образованию мощного снежного покрова, растения нижних ярусов защищены от вымерзания и экстремально низкой температуры, а также сохраняется микробиологическая активность в течение всего года (Рожкова, 2020; Wipf et al., 2009). Помимо этого, снег выступает одним из факторов накопления лесной подстилки за счёт высокой мощности и продолжительности залегания снежного покрова, наряду с температурным режимом, со степенью и характером увлажнения (Морозова, 2001).

На основе атмосферного реанализа ERA5-Land более значимая связь характеристик почв установлена с высотой снежного покрова, чем с заснеженностью территории по данным MODIS. Переменные, характеризующие снежный покров, имеют одинаковые направления корреляции с почвенными характеристиками в лесной подстилке. Чем выше высота снежного покрова и существеннее заснеженность территории, тем больше значения ЗОУ и шире соотношение C:N. Это объясняется снижением скорости разложения растительного опада при повышении высоты снежного покрова и увеличении заснеженности территории, что приводит к расширению C:N в подстилке и накоплению её запасов и, следовательно, к более интенсивной аккумуляции углерода.

Отрицательная связь с ЗОУ, а также с СОУ наблюдается в минеральной толще: чем выше высота снежного покрова и больше заснеженность территории, тем меньше ЗОУ и СОУ. Установленная закономерность может указывать на более долгое разложение лесной подстилки при наличии мощного снежного покрова и, соответственно, медленное поступление органического вещества в минеральную толщу.

Растительность — главный поставщик органического вещества в почву. От состава растительности зависит количество и качество поступающего растительного опада, его трансформация и переход в почвенные пулы. Исследователи отмечают, что растительный покров относится к одним из сильных предикторов для моделирования запасов углерода при рассмотрении территории от арктических тундр до вечнозелёных экваториальных лесов (Кузнецова, 2021; Frank et al., 2012; Wiesmeier et al., 2019).

При множественном сравнении рассматриваемых характеристик почв в зависимости от групп растительности, выделенных на основании карты растительности Северо-Запада России, значимые отличия были выявлены только для C:N в лесной подстилке (табл. 4). Среди групп ICP Forests значимо различались соотношение C:N и ЗОУ в сосновых лесах. Группы берёзовых и еловых лесов значимо не отличаются друг от друга в обоих случаях.

В настоящем исследовании соотношение C:N в подстилке сосновых лесов значимо отличается от этого показателя в подстилке лиственных и темнохвойных лесов. В обоих случаях C:N в сосновых лесах выше, чем в других лесных формациях. Данная закономерность уже ранее упоминалась в других исследованиях и объяснялась тем, что широкое соотношение C:N в подстилке характерно для хвойных лесов из-за низкой скорости разложения подстилки и, следовательно, её накопления, а узкие значения этого показателя — для лиственных лесов из-за более высокой скорости разложения опада (Аккумуляция..., 2018; Гаврилюк и др., 2021).

Более широкое C:N в смешанных лесах по сравнению с темнохвойными и лиственными можно объяснить влиянием на почвенные характеристики ранее произраставших монодоминантных хвойных лесов. Лиственные леса Карелии и КП часто представлены берёзой и оси-

ной, которые в большинстве случаев доминируют на ранних стадиях естественных и антропогенно-обусловленных сукцессий. Во время проведения полевых исследований было указано, что лесная подстилка берёзового леса состоит из опада хвойных и лиственных пород (ППН 10381, 10383 и др.).

Таблица 4. Взаимосвязь растительности и характеристик почв посредством множественного сравнения Краскела – Уоллиса с последующим парным сравнением

Переменные	Лесная подстилка			Минеральная толща		
	ЗОУ	СОУ	C:N	ЗОУ	СОУ	C:N
Группы растительности: светлохвойные, темнохвойные, лиственные, смешанные (Сохранение..., 2011)	—	—	Значимо отличаются светлохвойные от лиственных и темнохвойных лесов, смешанные леса от лиственных и темнохвойных	—	—	—
Группы ICP Forests: сосновые, берёзовые, еловые	—	—	Значимо отличаются сосновые леса от других групп. Берёзовые и еловые леса значимо не отличаются друг от друга	Значимо отличаются сосновые леса. Берёзовые и еловые леса значимо не отличаются друг от друга	—	—

По результатам корреляционного анализа установлены значимые различия запасов органического углерода в слое 0–30 см в лесах, относящихся к разным формациям по данным ICP Forests. Как было отмечено выше, ЗОУ в минеральной толще почв сосновых лесов статистически отличаются от других формаций, а между берёзовыми и еловыми лесами отсутствуют значимые различия. Наибольшие запасы углерода в минеральной 30-сантиметровой толще обнаруживаются в берёзовых лесах, затем следуют еловые и сосновые. Полученное пространственное распределение ЗОУ можно объяснить как высоким видовым богатством подлеска и травяно-кустарничкового яруса вторичных берёзовых лесов, формирующихся на месте хвойных, которые были уничтожены рубками и огнём, так и высокой скоростью разложения опада в этих лесах и миграции органического вещества из подстилки в минеральную толщу. В подстилке еловых лесов скорость разложения также выше, чем в подстилке сосновых (Иванова и др., 2023), что объясняется более высоким качеством опада и, прежде всего, относительно узким соотношением C:N в опаде хвои ели. В исследованиях со схожими природно-климатическими условиями наблюдаются иные закономерности распределения запасов углерода по лесным формациям. Например, отмечается, что в лесах Норвегии не было выявлено значимых различий между ЗОУ в почвах сосновых и еловых лесов (Strand et al., 2016).

Заключение

Установлены статистически значимые связи между содержанием, запасом почвенного органического углерода, соотношением C:N и геопространственными переменными, характеризующими такие факторы почвообразования, как рельеф, климат, растительность. Наиболее значимые коэффициенты корреляции были получены между характеристиками почв и климатическими переменными — среднегодовой температурой воздуха, осадками в зимний период и среднегодовым количеством осадков. Высота снежного покрова, полученная на основе атмосферного реанализа ERA5-Land, показала более тесную корреляционную связь с характеристиками почв. Пространственные переменные, описывающие рельеф и растительность, продемонстрировали слабую связь с почвенными характеристиками, что может быть обусловлено спецификой организации регулярной сети ICP Forests, которая не отражает полное разнообразие высоты рельефа исследуемой территории, и недостаточной информативностью классификации типов растительности используемой тематической карты.

Различия в значениях почвенных характеристик в разных условиях увлажнения не были получены из-за малой вариабельности почвенных образцов по данным ICP Forests.

Авторы исследования выражают благодарность директору Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, члену-корреспонденту РАН Н. В. Лукиной за информативные консультации по лесному почвоведению, ценные комментарии и замечания по тексту статьи.

Работа выполнена в рамках молодёжной лаборатории Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН «Климаторегулирующие функции и биоразнообразие лесов» (регистрационный номер 122111500023-6).

Литература

1. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / под ред. Н. В. Лукиной. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2018. 232 с.
2. Бахмет О. Н. Запасы углерода в почвах сосновых и еловых лесов Карелии // Лесоведение. 2018. № 1. С. 48–55. DOI: 10.7868/S0024114818010047.
3. Бахмет О. Н., Федорец Н. Г., Крышень А. М. Исследования по международной программе ICP Forests в Карелии // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2011. № 2. С. 133–139.
4. Биеньковски П., Титлянова А. А., Шибарева С. В. Трансформационные процессы в подстилках бореальных лесов // Сибирский эколог. журн. 2003. № 6. С. 707–712.
5. Волков А. Д. Типы леса Карелии. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2008. 192 с.
6. Гаврилюк Е. А., Кузнецова А. И., Горнов А. В. Геопространственное моделирование содержания и запасов азота и углерода в лесной подстилке на основе разносезонных спутниковых изображений Sentinel-2 // Почвоведение. 2021. № 2. С. 168–182. DOI: 10.31857/S0032180X21020040.
7. Гонн Н. В., Мешалкина Ю. В., Нарыкова А. Н. и др. Картографирование содержания и запасов органического углерода почв на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6. № 1. Ст. 120. 59 с. DOI: 10.31509/2658-607x-202361-120.
8. Доронина А. Ю. Сосудистые растения Карельского перешейка (Ленинградская область). М.: Т-во науч. изданий КМК, 2007. 574 с.
9. Змиртович И. В. Средняя тайга Карельского перешейка: зональные, интразональные и экстразональные явления // Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2011. № 12. С. 54–76.
10. Иванова Е. А., Данилова М. А., Смирнов В. Э., Ершов В. В. Сравнительная оценка скорости разложения растительного опада в еловых и сосновых лесах на северном пределе распространения // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6. № 3. Ст. 132. DOI: 10.31509/2658-607x-202363-132.
11. Кузнецова А. И. Влияние растительности на запасы почвенного углерода в лесах (обзор) // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4. № 4. С. 41–95. DOI: 10.31509/2658-607x-2021-44-95.
12. Кузнецова А. И., Лукина Н. В., Горнов А. В. и др. Запасы углерода в песчаных почвах сосновых лесов на западе России // Почвоведение. 2020. № 8. С. 959–969. DOI: 10.31857/S0032180X20080109.
13. Лукина Н. В., Кузнецова А. И., Гераскина А. П. и др. Неучтенные факторы, определяющие запасы углерода в лесных почвах // Метеорология и гидрология. 2022. № 10. С. 92–110. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-92-110.
14. Морозова Р. М. Географические закономерности формирования почвенного покрова Карелии // Тр. Карельского науч. центра РАН. Биогеография Карелии. Сер. «Биология». 2001. № 2. С. 12–18.
15. Назарова Л. Е. Климат Республики Карелия (Россия): температура воздуха, изменчивость и изменения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. № 1. С. 746–749.
16. Нарыкова А. Н., Плотникова А. С. Анализ результатов моделирования запасов углерода лесной подстилки на территории Республики Карелия и Карельского перешейка // Регион. проблемы дистанцион. зондирования Земли: материалы 10-й Международ. науч. конф. Красноярск, 12–15 сент. 2023. Красноярск: СФУ, 2023. С. 115–119.
17. Перельман А. И. Геохимия ландшафта. М.: Высш. шк., 1975. 341 с.
18. Песьякова А. А., Феклистов П. А. Структура и запас лесной подстилки сосняков северной тайги // Вестн. Красноярского гос. аграрного ун-та. 2017. № 4. С. 182–186.
19. Полянов Б. Б. Геохимические ландшафты // Избран. тр. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 751 с.
20. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий

- России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 117–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.
21. Почвоведение / ред. В. А. Ковда, Б. Г. Розанов. М.: Высш. шк., 1988. 400 с.
 22. Рожкова А. Н. Роль снежного покрова в биохимическом цикле азота // Международ. научно-практич. конф. «Современ. тенденции в науч. обеспечении агропромышл. комплекса»: сб. ст. 2020. С. 58–61.
 23. Рыжова И. М., Подвезенная М. А., Кириллова Н. П. Вариабельность запасов углерода в автоморфных и полугидроморфных почвах лесных экосистем европейской территории России: сравнительный статистический анализ // Вестн. Московского ун-та. Сер. 17: Почвоведение. 2022. № 2. С. 20–27.
 24. Синькевич С. М., Бахмет О. Н., Иванчиков А. А. Роль почв в региональном балансе углерода в сосновых лесах Карелии // Почвоведение. 2009. № 3. С. 290–300.
 25. Сохранение ценных природных территорий Северо-Запада России. Анализ репрезентативности сети ООПТ Архангельской, Вологодской, Ленинградской и Мурманской областей, Республики Карелии, Санкт-Петербурга / под ред. Кобякова К. Н. СПб., 2011. 506 с.
 26. Чернова О. В., Рыжова И. М., Подвезенная М. А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350. DOI: 10.31857/S0032180X20030028.
 27. 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. DOI: 10.31857/S0032180X21030047.
 28. Честных О. В., Замолодчиков Д. Г. Почвенные характеристики Северной Евразии. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2018621164. Рег. 02.08.2018.
 29. Честных О. В., Лыжин В. А., Кокиарова А. В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
 30. Шарый П. А., Шарая Л. С., Пастухов А. В., Каверин Д. А. Пространственное распределение органического углерода в почвах Восточно-Европейской тундры и лесотундры в зависимости от климата и рельефа // Изв. Российской акад. наук. Сер. Геогр. 2018. № 6. С. 39–48. DOI: 10.1134/S2587556618060146.
 31. Щепашенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132. DOI: 10.7868/S0032180X13020123.
 32. Callesen I., Liski J., Raulund-Rasmussen K. et al. Soil carbon stores in Nordic well-drained forest soils — relationships with climate and texture class // Global Change Biology. 2003. V. 9. Iss. 3. P. 358–370. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00587.x.
 33. Duarte E., Zagal E., Barrera J. et al. Digital mapping of soil organic carbon stocks in the forest lands of Dominican Republic // European J. Remote Sensing. 2022. V. 55. No. 1. P. 213–231. DOI: 10.1080/22797254.2022.2045226.
 34. Frank D. A., Pontes A. W., McFarlane K. J. Controls on soil organic carbon stocks and turnover among North American ecosystems // Ecosystems. 2012. V. 15. Iss. 4. P. 604–615. DOI: 10.1007/s10021-012-9534-2.
 35. Gomes L., Faria R., de Souza E. et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil // Geoderma. 2019. V. 340. P. 337–350. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.01.007.
 36. Gu J., Bol R., Sun Y., Zhang H. Soil carbon quantity and form are controlled predominantly by mean annual temperature along 4000 km North-South transect of Eastern China // Catena. 2022. V. 217. Iss. 1–2. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106498.
 37. Guo P.-T., Li M.-F., Luo W., Tang Q.-F., Liu Z.-W., Lin Z.-M. Digital mapping of soil organic matter for rubber plantation at regional scale: An application of random forest plus residuals kriging approach // Geoderma. 2015. V. 237–238. P. 49–59. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.08.009.
 38. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500 m / NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. 2006. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod10.php>.
 39. Hateffard F., Dolati P., Heidari A., Zolfaghari A. Assessing the performance of decision tree and neural network models in mapping soil properties // J. Mountain Science. 2019. V. 16. Iss. 8. P. 1833–1847. DOI: 10.1007/s11629-019-5409-8.
 40. Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L. et al. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas // Intern. J. Climatology. 2005. V. 25. P. 1965–1978. DOI: 10.1002/joc.1276.
 41. Hounkpatin K., Stendahl J., Lundblad M., Karlton E. Predicting the spatial distribution of soil organic carbon stock in Swedish forests using a group of covariates and site-specific data // Soil. 2021. V. 7. Iss. 2. P. 377–398. DOI: 10.5194/soil-7-377-2021.
 42. Kruskal W. H., Wallis W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis // J. American Statistical Association. 1952. V. 47. No. 260. P. 583–621.
 43. Landolt E., Baumler B., Erhardt A. et al. Flora indicativa — Okologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen. 2010. 378 p. DOI: 10.2307/27896667.

44. *McBratney A. B., Santos M. M., Minasny B.* On digital soil mapping // *Geoderma*. 2003. V. 117. Iss. 1–2. P. 3–52. DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
45. *Porter C., Morin P., Howat I. et al.* ArcticDEM, Version 3. Harvard Dataverse. 2018. V. 1. DOI: 10.7910/DVN/OHHUKH.
46. *Spearman C.* The proof and measurement of association between two things // *American J. Psychology*. 1904. V. 15. Iss. 1. P. 72–101. DOI: 10.2307/1412159.
47. *Strand L. T., Callesen I., Dalsgaard L., Wit H. A.* Carbon and nitrogen stocks in Norwegian forest soils — The importance of soil formation, climate, and vegetation type for organic matter accumulation // *Canadian J. Forest Research*. 2016. V. 46. P. 1–15. DOI: 10.1139/cjfr-2015-0467.
48. *Venter Z., Hawkins H., Cramer M., Mills A.* Mapping soil organic carbon stocks and trends with satellite-driven high resolution maps over South Africa // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 771. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145384.
49. *Wang B., Waters C., Orgill S. et al.* High resolution mapping of soil organic carbon stocks using remote sensing variables in the semi-arid rangelands of eastern Australia // *Science of The Total Environment*. 2018. V. 630. P. 367–378. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.204.
50. *Wang S., Xu L., Zhuang Q., He N.* Investigating the spatio-temporal variability of soil organic carbon stocks in different ecosystems of China // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 758. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143644.
51. *Wiesmeier M., Urbanski L., Hobbey E. et al.* Soil organic carbon storage as a key function of soils — A review of drivers and indicators at various scales // *Geoderma*. 2019. V. 333. P. 149–162. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.026.
52. *Wipf S., Stoeckli V., Bebi P.* Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing // *Climatic Change*. 2009. V. 94. P. 105–121. DOI: 10.1007/s10584-009-9546-x.
53. *Zhang Z., Zhang H., Xu E.* Enhancing the digital mapping accuracy of farmland soil organic carbon in arid areas using agricultural land use history // *J. Cleaner Production*. 2022. V. 334. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130232.
54. *Zhou T., Geng Y., Ji C. et al.* Prediction of soil organic carbon and the C:N ratio on a national scale using machine learning and satellite data: A comparison between Sentinel-2, Sentinel-3 and Landsat-8 images // *Science of The Total Environment*. 2021. V. 755. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142661.

Relationships between soil-forming factors and organic carbon stocks in forest soils of Karelia and the Karelian Isthmus using thematic satellite products

**A. N. Narykova, A. D. Nikitina, A. S. Plotnikova,
M. A. Danilova, N. E. Shevchenko**

*Center of Forest Ecology and Productivity Problems RAS, Moscow 117799, Russia
E-mail: narykovaanna@yandex.ru*

This study examines relationships between soil-forming factors and soil organic carbon content, carbon stocks, carbon to nitrogen ratio (C:N) in the forests of Karelia and the Karelian Isthmus. Sample selection and chemical analysis of soils are conducted as part of the field-based program ICP Forest (International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests). Factors are represented as spatial variables obtained from thematic satellite products. Spatial variables are derived from the following geospatial data sources: digital elevation model ArcticDEM, global climate database WorldClim, satellite data MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra Snow Cover Daily Global, atmospheric reanalysis ERA5-Land (the fifth generation of European Reanalysis), vegetation map of Northwestern Russia, and geobotanical field-work data from the ICP Forests dataset. The most significant correlations between soil characteristics and soil forming factors occur with the following climate variables: annual mean temperature, precipitation of the coldest quarter, and annual precipitation. A stronger correlation occurs between soil characteristics and snow depth from the atmospheric reanalysis ERA5-Land than with MODIS snow cover data. The relationship between topography variables and soil characteristics is non-significant,

presumably due to the sampling design and the minor elevation variations in the research area. The results indicate significant differences between vegetation variables and the C:N ratio in the forest floor. Carbon stocks vary considerably among the different vegetation types of ICP Forests data in the soil layer. Comparisons of autapomorphous and semihydromorphous forest soils do not reveal any differences in soil characteristics. The correlation analysis results are compared with findings from similar studies performed in other climatic conditions.

Keywords: satellite data, correlation analysis, Spearman's correlation coefficient, Kruskal-Wallis method, soil organic carbon content and carbon stocks, C:N ratio

Accepted: 15.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-196-211

References

1. *Akkumulyatsiya ugleroda v lesnykh pochvakh i suksessionnyi status lesov* (Carbon accumulation in forest soils and the successive status of forests), N. V. Lukina (ed.), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2018, 232 p. (in Russian).
2. Bakhmet O. N., Carbon deposits in soils of pine and spruce forests of Karelia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 7, pp. 697–703, DOI: 10.1134/S199542551807003X.
3. Bakhmet O. N., Fedorets N. G., Kryshen' A. M., Investigations within the international program ICP Forests in Karelia, *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra*, 2011, No. 2, pp. 133–139 (in Russian).
4. Bienkovski P., Titlyanova A. A., Shibareva C. V., Transformation processes in the litter of boreal forests, *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2003, No. 6, pp. 707–712 (in Russian).
5. Volkov A. D., *Tipy lesa Karelii* (Forest types of Karelia), Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS, 2008, 192 p. (in Russian).
6. Gavril'yuk E. A., Kuznetsova A. I., Gornov A. V., Geospatial modeling of nitrogen and carbon content and stock in the forest litter horizons based on Sentinel-2 multi-seasonal satellite imagery, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 2, pp. 176–188, DOI: 10.1134/S1064229321020046.
7. Gopp N. V., Meshalkina Yu. V., Narykova A. N. et al., Mapping of soil organic carbon content and stock at the regional and local levels: the analysis of modern methodological approaches, *Forest Science Issues*, 2023, Vol. 6, No. 1, Article 120, 59 p. (in Russian), DOI 10.31509/2658-607x-202361-120.
8. Doronina A. Yu., *Sosudistye rasteniya Karel'skogo peresheika (Leningradskaya oblast')* (Vascular plants of Karelian Isthmus (Leningrad region)), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2007, 574 p. (in Russian).
9. Zmirtovich I. V., Middle taiga of the Karelian Isthmus: zonal, intrazonal and extrazonal phenomena, *Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya*, 2011, No. 12, pp. 54–76 (in Russian).
10. Ivanova E. A., Danilova M. A., Smirnov V. E., Ershov V. V., Comparative assessment of the rate of decomposition of plant litter in spruce and pine forests at the northern limit of distribution, *Forest Science Issues*, 2023, Vol. 6, No. 3, Article 132, (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607x-202363-132.
11. Kuznetsova A. I., Influence of vegetation on soil carbon stocks in forests (review), *Forest Science Issues*, 2021, Vol. 4, No. 4, pp. 41–54 (in Russian), DOI: 10.31509/2658-607x-2021-44-95.
12. Kuznetsova A. I., Lukina N. V., Gornov A. V. et al., Carbon stock in sandy soils of pine forests in the west of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 8, pp. 1056–1065, DOI: 10.1134/S1064229320080104.
13. Lukina N. V., Kuznetsova A. I., Geras'kina A. P. et al., Unaccounted factors determining carbon stocks in forest soils, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2022, No. 10, pp. 92–110 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-92-110.
14. Morozova R. M., Geographic patterns of soil cover formation in Karelia, *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Biogeografiya Karelii. Ser. Biologiya*, 2012, No. 2, pp. 12–18 (in Russian).
15. Nazarova L. E., Climate of the Republic of Karelia (Russia): air temperature, variability and changes, *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2014, Vol. 10, No. 1, pp. 746–749 (in Russian).
16. Narykova A. N., Plotnikova A. S., The geospatial modeling results of carbon stocks in the forest litter of the Republic of Karelia and the Karelian Isthmus, *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: materialy 10-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Regional problems of remote sensing of the Earth: Proc. 10th Intern. Scientific Conf.), Krasnoyarsk: SFU, 2023, pp. 115–119 (in Russian).
17. Perelman A. I., *Geokhimiya landshafta* (Landscape geochemistry), Moscow, 1975, 341 p. (in Russian).
18. Pesyakova A. A., Feklistov P. A., The structure and stock of forest litter in pine forests of the northern taiga, *Vestnik KrasGAU*, 2017, No. 4, pp. 182–186 (in Russian).
19. Polynov B. B., *Geokhimicheskie landshafty* (Geochemical landscapes), Moscow: Izd. AN SSSR, 1956, 751 p. (in Russian).

20. Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B., Analysis of the applicability of the ASTER GDEM v2 and ArcticDEM digital elevation models in research on Russia's Arctic territories, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 117–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127.
21. *Pochvovedenie* (Soil science), V.A. Kovda, B.G. Rozanov (eds.), Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 400 p. (in Russian).
22. Rozhkova A. N., The role of snow cover in the biochemical nitrogen cycle, *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Sovremennye tendentsii v nauchnom obespechenii agropromyshlennogo kompleksa"* (Proc. Intern. Scientific and Practical Conf. "Modern trends in scientific support of the agro-industrial complex"), 2020, pp. 58–61 (in Russian).
23. Ryzhova I. M., Podvezennaya M. A., Kirillova N. P., A comparative statistical analysis of the variability of carbon stock in automorphous and semihydromorphous soils of forest ecosystems in European Russia, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 2022, No. 2, pp. 20–27 (in Russian).
24. Sin'kevich S. M., Bakhmet O. N., Ivanchikov A. A., The role of soils in the regional carbon balance in the pine forests of Karelia, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 3, pp. 267–276, DOI: 10.1134/S106422930903003X.
25. *Sokhranenie tsennykh prirodnikh territorii Severo-Zapada Rossii. Analiz reprezentativnosti seti OOPT Arkhangel'skoi, Vologodskoi, Leningradskoi i Murmanskoi oblastei, Respubliki Karelii, Sankt-Peterburga* (Mapping of High Conservation Value Areas in Northwestern Russia: Gap-Analysis of the Protected Areas Network in the Murmansk, Leningrad, Arkhangelsk, Vologda, and Karelia regions, and the city of Saint Petersburg), K. N. Kobyakova (ed.), Saint Petersburg, 2011, 506 p. (in Russian).
26. Chernova O. V., Ryzhova I. M., Podvezennaya M. A., Assessment of Organic Carbon Pools in Forest Soils on a Regional Scale, *Pochvovedenie*, 2020, No. 3, pp. 340–350 (in Russian), DOI: 10.31857/S0032180X20030028.
27. Chernova O. V., Golozubo O. M., Alyabina I. O., Shepashchenko D. G., Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in Russian Federation, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 3, pp. 325–336, DOI: 10.1134/S1064229321030042.
28. Chestnykh O. V., Zamolodchikov D. G., *Pochvennye kharakteristiki Severnoi Evrazii* (Soil characteristics of Northern Eurasia), Certificate of state registration of data base No. 2018621164 (RU), Reg. 17.05.2018 (in Russian).
29. 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).
30. Shary P. A., Sharaya L. S., Pastukhov A. V., Kaverin D. A., Spatial distribution of organic carbon in soils of Eastern European tundra and forest-tundra depending on climate and topography, *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*, 2018, No. 5, pp. 39–48 (in Russian), DOI: 10.1134/S2587556618060146.
31. Schepaschenko D. G., Shvidenko A. Z., Mukhortova L. V., Vedrova E. F., The pool of organic carbon in the soils of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 2, pp. 107–116, DOI: 10.1134/S1064229313020129.
32. Callesen I., Liski J., Raulund-Rasmussen K. et al., Soil carbon stores in Nordic well-drained forest soils — relationships with climate and texture class, *Global Change Biology*, 2003, Vol. 9, Issue 3, pp. 358–370, DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00587.x.
33. Duarte E., Zagal E., Barrera J. et al., Digital mapping of soil organic carbon stocks in the forest lands of Dominican Republic, *European J. Remote Sensing*, 2022, Vol. 55, No. 1, pp. 213–231, DOI: 10.1080/22797254.2022.2045226.
34. Frank D. A., Pontes A. W., McFarlane K. J., Controls on soil organic carbon stocks and turnover among North American ecosystems, *Ecosystems*, 2012, Vol. 15, Issue 4, pp. 604–615, DOI: 10.1007/s10021-012-9534-2.
35. Gomes L., Faria R., de Souza E. et al., Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil, *Geoderma*, 2019, Vol. 340, pp. 337–350, DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.01.007.
36. Gu J., Bol R., Sun Y., Zhang H., Soil carbon quantity and form are controlled predominantly by mean annual temperature along 4000 km North-South transect of Eastern China, *Catena*, 2022, Vol. 217, Issue 1–2, DOI: 10.1016/j.catena.2022.106498.
37. Guo P.-T., Li M.-F., Luo W., Tang Q.-F., Liu Z.-W., Lin Z.-M., Digital mapping of soil organic matter for rubber plantation at regional scale: An application of random forest plus residuals kriging approach, *Geoderma*, 2015, Vol. 237–238, pp. 49–59, DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.08.009.
38. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V., *MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500 m*, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2006, https://nsidc.org/data/modis/data_summaries.
39. Hateffard F., Dolati P., Heidari A., Zolfaghari A., Assessing the performance of decision tree and neural network models in mapping soil properties, *J. Mountain Science*, 2019, Vol. 16, Issue 8, pp. 1833–1847, DOI: 10.1007/s11629-019-5409-8.
40. Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L. et al., Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas, *Intern. J. Climatology*, 2005, Vol. 25, pp. 1965–1978, DOI: 10.1002/joc.1276.

41. Hounkpatin K., Stendahl J., Lundblad M., Karlton E., Predicting the spatial distribution of soil organic carbon stock in Swedish forests using a group of covariates and site-specific data, *Soil*, 2021, Vol. 7, Issue 2, pp. 377–398, DOI: 10.5194/soil-7-377-2021.
42. Kruskal W. H., Wallis W. A., Use of ranks in one-criterion variance analysis, *J. American Statistical Association*, 1952, Vol. 47, No. 260, pp. 583–621.
43. Landolt E., Baumler B., Erhardt A. et al., *Flora indicativa — Ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen*, 2010, 378 p., DOI: 10.2307/27896667.
44. McBratney A. B., Santos M. L., Minasny B., On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, Vol. 117, Issues 1–2, pp. 3–52, DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
45. Porter C., Morin P., Howat I. et al., ArcticDEM, Version 3, *Harvard Dataverse*, 2018, Vol. 1, DOI: 10.7910/DVN/OHHUKH.
46. Spearman C., The proof and measurement of association between two things, *American J. Psychology*, 1904, Vol. 15, Issue 1, pp. 72–101, DOI: 10.2307/1412159.
47. Strand L. T., Callesen I., Dalsgaard L., Wit H. A., Carbon and nitrogen stocks in Norwegian forest soils — The importance of soil formation, climate, and vegetation type for organic matter accumulation, *Canadian J. Forest Research*, 2016, Vol. 46, pp. 1–15, DOI: 10.1139/cjfr-2015-0467.
48. Venter Z., Hawkins H., Cramer M., Mills A., Mapping soil organic carbon stocks and trends with satellite-driven high resolution maps over South Africa, *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 771, pp. 1–14, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145384.
49. Wang B., Waters C., Orgill S. et al., High resolution mapping of soil organic carbon stocks using remote sensing variables in the semi-arid rangelands of eastern Australia, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 630, pp. 367–378, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.204.
50. Wang S., Xu L., Zhuang Q., He N., Investigating the spatio-temporal variability of soil organic carbon stocks in different ecosystems of China, *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 758, pp. 1–10, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143644.
51. Wiesmeier M., Urbanski L., Hobbey E. et al., Soil organic carbon storage as a key function of soils — A review of drivers and indicators at various scales, *Geoderma*, 2019, Vol. 333, pp. 149–162, DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.026.
52. Wipf S., Stoeckli V., Bebi P., Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing, *Climatic Change*, 2009, Vol. 94, pp. 105–121, DOI: 10.1007/s10584-009-9546-x.
53. Zhang Z., Zhang H., Xu E., Enhancing the digital mapping accuracy of farmland soil organic carbon in arid areas using agricultural land use history, *J. Cleaner Production*, 2022, Vol. 334, pp. 1–11, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130232.
54. Zhou T., Geng Y., Ji C. et al., Prediction of soil organic carbon and the C:N ratio on a national scale using machine learning and satellite data: A comparison between Sentinel-2, Sentinel-3 and Landsat-8 images, *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 755, pp. 1–16, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.14266.