

DOI 10.31509/2658-607x-202361-120
УДК 631.4

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ И ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ПОЧВ НА РЕГИОНАЛЬНОМ И ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЯХ: АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

© 2023 г.

**Н. В. Гопп¹, Ю. Л. Мешалкина², А. Н. Нарыкова³,
А. С. Плотникова³, О. В. Чернова⁴**

¹ *Институт почвоведения и агрохимии СО РАН
Россия, 630099, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 8/2*

² *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр.12*

³ *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14*

⁴ *Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН
Россия, 119071, Москва, Ленинский просп., 33*

E-mail: gopp@issa-siberia.ru

Поступила в редакцию 04.02.2023

После рецензирования: 18.03.2023

Принята к печати: 20.03.2023

В настоящей работе приводится обзор отечественных и зарубежных литературных источников, посвященных картографированию содержания и запасов почвенного органического углерода (ПОУ) на региональном и локальном уровнях. Анализ работ показал, что картографическая оценка содержания и запасов ПОУ в почвах основана на различных подходах, выбор которых зависит от размера территории (континентальный, национальный, региональный, локальный уровни), наличия картографической основы (карты типов почв, ландшафтов, растительных формаций, данные дистанционного зондирования Земли и др.) и данных лабораторно-полевых обследований. Картографирование в основном осуществляется с использованием следующих подходов: (1) на основе имеющихся тематических карт; (2) цифровое почвенное картографирование. В обзоре также приведен набор пространственных данных, характеризующих факторы почвообразования согласно модели SCORPAN, активно используемой в цифровом почвенном картографировании. Пространственные данные о рельефе были одними из наиболее часто используемых предикторов, за которыми следовали переменные, характеризующие растительность и климат. Добавление в модели пространственных данных о классификационных единицах почв значительно повышало точность картографирования. Авторы работ отмечали, что переменные климата оказывают существенное влияние на пространственное варьирование содержания и запасов ПОУ на региональном уровне, в то время как на локальном уровне влияние климатических переменных было менее значимым. Анализ исследований показал, что наиболее часто в цифровом картографировании изучаемых свойств почв используются методы машинного обучения, среди которых метод случайного леса (Random Forest) чаще показывал лучшие результаты. Практически во всех исследованиях проводилась кросс-валидация

построенных карт, проверка точности картографирования с использованием внешней независимой выборки проводилась в редких случаях, хотя эта важнейшая составляющая цифровой почвенной картографии. Наиболее часто для моделирования содержания и запасов ПОУ использовалось программное обеспечение R, для подготовки предикторов чаще использовались SAGA GIS, QGIS, ArcGIS и облачная платформа Google Earth Engine (GEE).

Ключевые слова: цифровое почвенное картографирование, почвенные предикторы, машинное обучение, случайный лес, регрессионный кривинг, метод опорных векторов, кросс-валидация, бутстреп, градиентный бустинг, мониторинг

Важная роль в углеродном обмене между наземными экосистемами и атмосферой принадлежит почвам, так как они являются одновременно источником выбросов и поглотителями парниковых газов, которые оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на изменение климата Земли (Руководящие принципы МГЭИК, 2006). Для моделей земной системы (ESMs — Earth System Models) представление о глобальном распределении существующих запасов углерода в почве является необходимым условием для прогнозирования обратных связей углерода и климата (Todd-Brown et al., 2013). Уточнение запасов органического углерода почв имеет важное значение для разработки стратегий устойчивого развития регионов и прогноза влияния климатических изменений на баланс углерода (Чернова и др., 2021).

Наземные экосистемы Земли характеризуются большим разнообразием и разным набором компонентов, поэтому в них по-разному протекают процессы депонирования и эмиссии углерода. Учет и отображение содержания и запасов почвенного органического углерода (ПОУ) в картографическом виде является необходимым

для построения прогнозов и мониторинга. В настоящее время составление карт осуществляется с использованием геоинформационных систем, в которых реализованы современные методы обработки пространственно распределенной информации, позволяющие совместно анализировать различные виды наземной, лабораторно-полевой и дистанционной информации о компонентах экосистем. Помимо настольных ГИС, в последнее время активно развивается веб-направление в цифровом почвенном картографировании (ЦПК), например, в работах широко используется облачная платформа компании Google — Google Earth Engine (Google Earth Engine..., 2017), позволяющая использовать вычислительные мощности серверов Google для геопространственного анализа большого числа данных: космические снимки, карты земного покрова, топографические и социально-экономические данные, различные параметры окружающей среды и т. д. (Gorelick et al., 2017). Также на платформу можно загружать и анализировать собственные данные. Главные ее преимущества — это открытость и возможность использовать вычислительные мощности бесплатно. Другим примером может слу-

жить веб-сервис SoLIM (The SoLIM Project..., 2004), где можно проводить картографирование, используя методы ГИС, нечеткой логики и экспертные знания. В работе исследователей (Jiang et al., 2016) представлен веб-сервис «CyberSoLIM», на котором можно обрабатывать не только большие объемы пространственно распределенных данных, но и обмениваться моделями и алгоритмами.

Современные методические подходы по картографированию содержания и запасов почвенного углерода можно разделить на две группы: (1) на основе имеющихся тематических карт — присвоение «эталонных», среднеарифметических или полученных в результате моделирования значений содержания и запасов ПОУ определенным картографическим единицам (почвенным, ландшафтным, климатическим и т. д.); (2) на основе цифровых пространственно распределенных данных — совместная обработка данных лабораторно-полевых обследований и пространственных предикторов с использованием методов машинного обучения, геостатистики и гибридных подходов. Второй подход в литературе более известен как ЦПК. Рассмотрим более подробно вышеперечисленные подходы.

ПОДХОД I — КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ИМЕЮЩИХСЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ КАРТ

Картографирование на основе имеющихся тематических карт — традицион-

ный подход, который используется при отсутствии или недостаточном количестве пространственных данных почвенных обследований. Картографирование выполняется на основе существующей базовой карты известного масштаба; обычно используют карты почв, ландшафтов, биомов и других целостных природных образований, но в зависимости от цели исследования возможно использование и карт типов землепользования. Дополнительная информация: природная (тип растительности, рельеф, генезис и/или состав почвообразующих пород...), хозяйственная (тип и/или структура землепользования, структура севооборотов, тип мелиорации...), историческая (возраст растительной ассоциации, возраст/стадия залежной сукцессии, ретроспективные данные об истории землепользования) в векторной или растровой форме с помощью ГИС-технологий может быть совмещена с исходной картой, позволяя повысить ее разрешение и точность. В результате собирается база данных о средних или типичных значениях содержания или запасов ПОУ, характерных для определенного типа, подтипа или иной почвенной классификационной единицы (или других целостных природных либо природно-хозяйственных образований). Средние или типичные значения могут быть получены также в результате использования локальных моделей при их наличии. Эти значения присваиваются соответствующей пространственной единице картогра-

фирования. По возможности оценивают изменчивость показателей, отражающих природное разнообразие почв в пределах картографической единицы, или неопределенность предсказания.

В данном подходе большую роль играет экспертное оценивание (Soil organic carbon..., 2018). При большем количестве данных точечных почвенных обследований с известными пространственными координатами, которые формируют обучающую выборку, возможно совмещение традиционных подходов с методами цифрового картографирования (Hugelius et al., 2014; Пастухов и др., 2016). Картографи-

рование с использованием этого подхода включает два этапа (рис. 1).

Ниже приведено описание основных этапов картографирования содержания и запасов ПОУ на основе различных тематических карт:

1. Подготовка данных и предикторов включает их разделение на относительно однородные по структуре органического вещества группы. Принципы разделения на группы определяются целью исследования, масштабом рассмотрения, а также характеристиками и объемом имеющейся в распоряжении информации, например: по типу растительности (лесные,

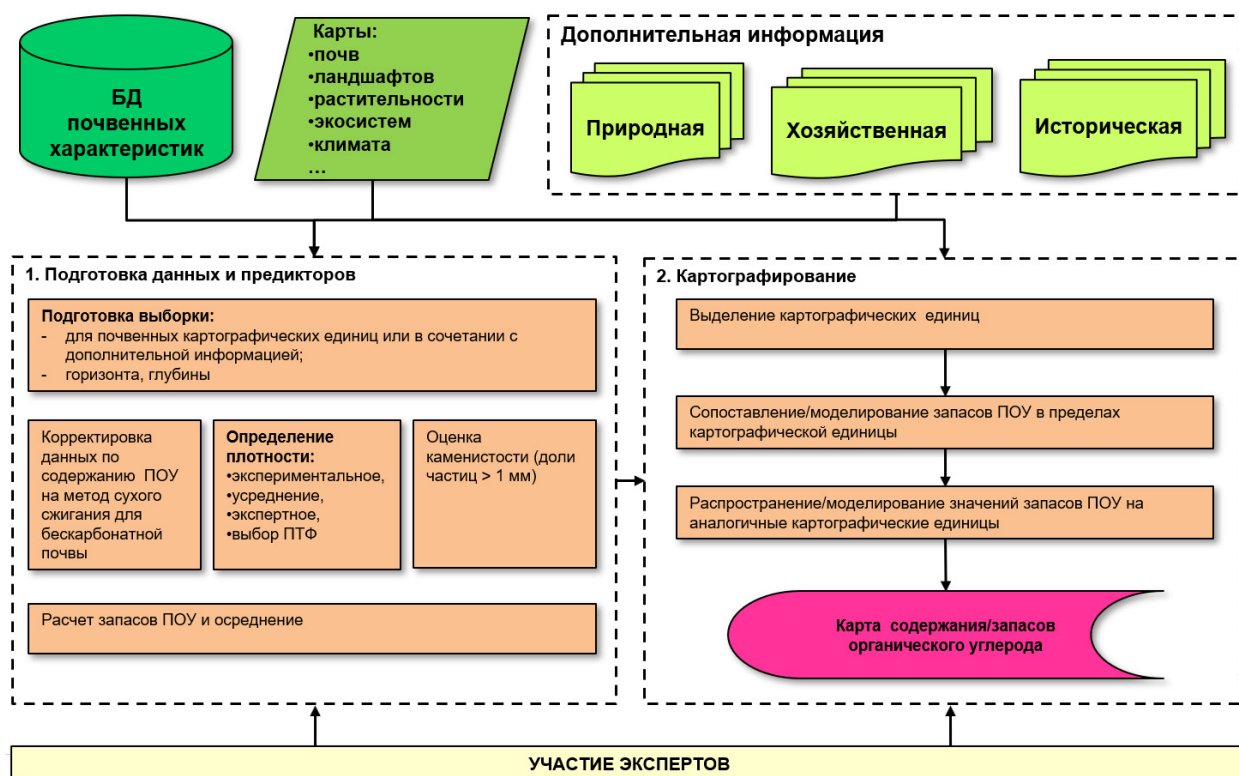


Рисунок 1. Блок-схема картографирования на основе имеющихся тематических карт

степные, болотные и др.); по типу землепользования (сельскохозяйственные, селитебные, лесные и др.); структуре сельскохозяйственных угодий (пашня, залежь, сенокосы и пастбища, мелиорированные земли и др.) и т. д. Производится оценка полноты имеющейся фактической информации по точечным объектам, возможности ее обобщения для характеристики классификационных и картографических почвенных выделов. Затем выбирается алгоритм пересчета значений по горизонтам/слоям из почвенных разрезов на фиксированные целевые глубины и проводится «гармонизация» данных. Если для каких-то глубин нет данных, они дополняются средними показателями для контура или аналогичного объекта, либо экспертными значениями.

При определении содержания органического углерода в образцах почв в настоящее время используются метод «сухого сжигания», основанный на высокотемпературном каталитическом окислении органического вещества и прямом учете образовавшегося диоксида углерода и обеспечивающий максимальное окисление органического вещества, и метод «мокрого сжигания», основанный на окислении органического вещества хромовой кислотой. Химические методы не приводят к полному окислению углерода органических соединений, поэтому для корректировки полученных результатов используют пересчетные коэффициенты. В мировой практике широко используется метод Уолкли

и Блэка (Walkley, Black, 1934), для которого принято использовать поправочный коэффициент 1.32 (Soil organic carbon..., 2018). В отечественной практике значительно шире используется метод Тюрина в различных модификациях. Для пересчета полученных этим методом показателей Б. М. Когутом и А. С. Фридом предложен усредненный корректировочный коэффициент ($K = 1.28$) (1993). Последние исследования показали, что более применим коэффициент 1.15 (ФАО, 2021; Шамрикова и др., 2022; Shamrikova et al., 2022).

При использовании метода высокотемпературного сжигания для карбонатных почв содержание органического углерода определяется как разница между содержанием общего углерода и углерода неорганических соединений.

Содержание ПОУ в почвах часто пересчитывают на содержание гумуса с использованием коэффициента 1.724. Коэффициент был предложен еще в 19 в. на основании данных о содержании в гуминовой кислоте 58% углерода и является общепринятым для неорганических горизонтов почв. Из-за разнообразия органо-генных горизонтов содержание углерода в них заметно варьирует. Кроме того, количество результатов прямых определений углерода методом сухого сжигания ограничено, в большинстве случаев в литературе в качестве характеристики обогатенности горизонта органическим веществом приводятся сведения о потере при прокаливании. Для органических горизонтов

коэффициенты пересчета могут колебаться от 1.9 до 2.5 (Soil organic carbon..., 2018). Для расчета содержания углерода в лесных подстилках в отечественных работах использованы различные пересчетные коэффициенты: от 2.0 (Алексеев, Бердси, 1994) до 2.6 (Щепашенко и др., 2013).

Важным расчетным параметром для оценки запасов углерода в почвах является плотность почвы в естественном сложении или объемная масса (d_v). При недостатке прямых определений плотности почвы используют средние значения или медианы, полученные по имеющимся экспериментальным данным. Также широко используются педотрансферные функции (ПТФ), позволяющие вычислить значение плотности по другим доступным почвенным характеристикам. ПТФ являются эмпирическими, имеют ограниченную область применения, поэтому их следует с осторожностью использовать в условиях, отличных от тех, для которых они были получены. Огромное разнообразие природно-географических условий России делает выбор ПТФ, позволяющей с минимальной ошибкой определять плотность сложения почв конкретного региона, важным этапом работы. Специально проведенный сравнительный анализ пяти наиболее пригодных для почв России методов оценки плотности почв показал, что для минеральных горизонтов лесных почв Европейской России лучшие результаты демонстрирует ПТФ, предложенная О. В. Честных и Д. Г. Замолотчиковым (2004) (Чернова

и др., 2020). Применимость этой функции с различными параметрами уравнения для групп генетически сходных почв показана и в других работах (Пастухов и др., 2016; Чернова и др., 2021). Плотность сложения органогенных горизонтов редко определяют экспериментально, кроме того, этот показатель характеризуется высокой изменчивостью как пространственной, так и определяющей спецификой горизонтов. При вычислении запасов углерода в лесных подстилках возможно использование экспертных значений с учетом типа и возраста растительных ассоциаций (Soil organic carbon..., 2018). Для оценки запасов органического углерода в торфяных почвах различных регионов могут быть использованы обобщенные данные о плотности сложения торфа в зависимости от его зрелости, степени разложения и зольности, например, торфяных почв тропиков (Agus et al., 2011) или Западной Сибири (Инишева и др., 2012).

Для минеральных почв, особенно горных областей и сформированных на слабыветрелых отложениях, важно оценить содержание камней и гравия, т. е. частиц, размер которых превышает 1 мм. Исследователи редко располагают достаточным количеством прямых определений каменности различных почв и почвенных горизонтов для расчета средних показателей. В большинстве случаев используют поправочные коэффициенты для групп сходных почв, полученные экспертным путем на основании обобщения результа-

тов исследований, типичных для соответствующей группы профилей (Soil organic carbon..., 2018).

Этап подготовки данных завершается вычислением запасов органического углерода в почвенных горизонтах, слоях или для целевых глубин с последующим расчетом средних арифметических значений для каждой пространственной единицы картографирования.

2. Картографирование. Собственно картографическая работа заключается в подготовке набора предикторов, определяемого целью исследования и набора имеющейся информации, посредством пространственной идентификации в ГИС. Далее определяются свойства предикторов для каждого точечного наблюдения и формируется перечень пространственных единиц картографирования, характеризующихся сходными параметрами (тип/подтип/класс почвы, растительности, ландшафта, землепользования и т. п.), извлекается ковариационная информация для контуров, обеспеченных достаточным количеством данных точечных обследований, и усредняются значения содержания/запасов углерода внутри этих контуров. При сложном почвенном покрове территории при усреднении могут быть введены весовые коэффициенты, учитывающие состав почвенного покрова в соответствии с пропорциями площадей доминирующих, сопутствующих и ассоциированных почв. Полученные усредненные значения при-

писываются всем аналогичным по характеристикам пространственным единицам картографирования независимо от местоположения профилей.

Точная оценка пространственной неопределенности построенных таким образом карт затруднена. Погрешности картографического отображения в них могут быть вызваны: неточностями в отображении границ полигонов или ошибками в определении средних показателей для единиц картографирования из-за недостаточности, субъективности, нерепрезентативности выборки, высокого природного варьирования показателей в условиях сложного почвенного покрова, а также ошибками лабораторных и полевых изменений. Однако в литературе имеются примеры количественной оценки отдельных аспектов неопределенности при достаточном объеме аналитической информации, например, возможно использование статистики каппа (Rossiter, 2001) для оценки согласованности между данными полевых обследований и полученной картой (Пастухов и др., 2016) или для сопоставления двух почвенных карт детального масштаба, построенных двумя независимыми группами исследователей (Самсонова, Мешалкина, 2011).

Завершающим этапом работы является оценка и, при необходимости, коррекция полученных результатов группой экспертов-почвоведов региона исследования. Примеры регионального картографирования запасов органического углерода в со-

ответствии с описанным подходом приведены в Приложении А.

Рассмотрим подробнее один из примеров реализации первого подхода. Группой исследователей предложен метод получения ориентировочных региональных оценок запасов органического углерода в почвах при недостаточном количестве точечных данных обследований (Чернова и др., 2016). В расчеты максимально вовлекаются доступные разноплановые источники информации: картографические материалы, базы данных, данные государственной и ведомственной статистической отчетности, опубликованные результаты локальных исследований и результаты моделирования круговорота углерода. Применимость метода опробована на примере территорий двух административных областей Европейской России: Костромской и Курской.

Картографическая основа для площадных расчетов получена путем пересечения слоев векторных карт: скорректированной цифровой версии почвенной карты РСФСР (2007), Карты растительности СССР (1990) на уровне типов доминирующей растительности и схемы административного деления Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. При расчетах учитывали классификационную принадлежность и гранулометрический состав почв, структуру земельных угодий, типозростную структуру лесных насаждений

и данные о месторождениях торфа в регионах. Запасы углерода в автономных естественных почвах рассчитывали на основе нелинейной модели круговорота углерода NAMSOM (Nonlinear Analytical Model of Soil Organic Matter) (Рыжова, Подвезенная, 2003) для каждого типа/подтипа почв с учетом их гранулометрического состава. Чтобы восполнить недостаток данных экспериментальных исследований почв и растительных ассоциаций, характеризующих рассматриваемую территорию, были использованы показатели из доступных баз данных, усредненные в границах почвенных провинций Карты почвенно-экологического районирования масштаба 1 : 15 000 000 (2011). Для актуализации оценок полученные усредненные показатели скорректированы с учетом типа землепользования и категории земель (пашни; сенокосы и пастбища; молодые залежи (до 20–25 лет); разновозрастные леса и нелесная древесная растительность; земли под вырубками, гарями, погибшими насаждениями; болота; дороги; земли застройки; нарушенные; прочие).

На основе предложенного единого подхода рассчитаны актуальные запасы органического углерода в почвах Костромской (южная тайга) и Курской (лесостепь) областей и ориентировочно оценено снижение этих запасов за исторический период в различных природно-географических и хозяйственных условиях регионов.

ПОДХОД II — ЦИФРОВОЕ ПОЧВЕННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

Современные методы картографирования почвенных свойств основаны на модели SCORPAN, активно используемой в последнее время в цифровом почвенном картографировании. Модель SCORPAN предложена для эмпирического количественного описания взаимосвязей между почвой и пространственно распределенными предикторами. Формулы моделей SCORPAN выглядят следующим образом (McBratney et al., 2003; Флоринский, 2012):

$$S_c = f(s, c, o, r, p, a, n) \\ \text{и } S_a = f(s, c, o, r, p, a, n), \quad (1),$$

где S_c — почвенные таксономические единицы; S_a — количественная характеристика почвы; s — почва (другие характеристики почвы); c — климат (климатические характеристики); o — организмы, растительность, фауна, человек; r — рельеф (ЦМР и морфометрические величины); p — материнская порода, литология; a — возраст, время, повторность при мониторинге; n — пространственное положение.

Формула 1 является результатом трудов многих поколений ученых-почвоведов (например, С. А. Захарова (1927), С. Ф. Шоу (Shaw, 1930), Х. Дженни (Jenny, 1941), которые развивали основной закон почвоведения, сформулированный В. В. Докучаевым (Флоринский, 2012). Она также объединяет генетические и так называемые «формальные» подходы в почвоведении.

Цифровое картографирование требует большого числа точечных наблюдений, для которых известны географические координаты. При увеличении количества предикторов и их сочетаний необходимое число наблюдений возрастает. Для разработки оптимальной схемы опробования для целей ЦПК предложен специальный метод — «латинский гиперкуб», названный по аналогии с латинским квадратом. Метод основан на выборе местоположений точек пробоотбора в зависимости от вероятности совместного появления индикаторных переменных (Minasny, McBratney, 2006).

ЦПК включает в себя интеллектуальный анализ данных, геостатистику, гибридные подходы и подразумевает выполнение трех последовательных этапов (рис. 2).

Ниже приведено описание основных этапов цифрового почвенного картографирования содержания и запасов ПОУ:

1. Подготовка обучающей выборки и предикторов.

Обучающий и валидационный наборы данных должны содержать следующую информацию: идентификационный номер образца, географические координаты, название почвы, название и буквенное обозначение почвенных горизонтов, диапазон глубин, данные о плотности сложения горизонтов, содержании и запасах ПОУ, доле крупнозема (камни и гравий). При отсутствии данных о плотности почв проводят моделирование с использованием педотрансферных функций, результаты

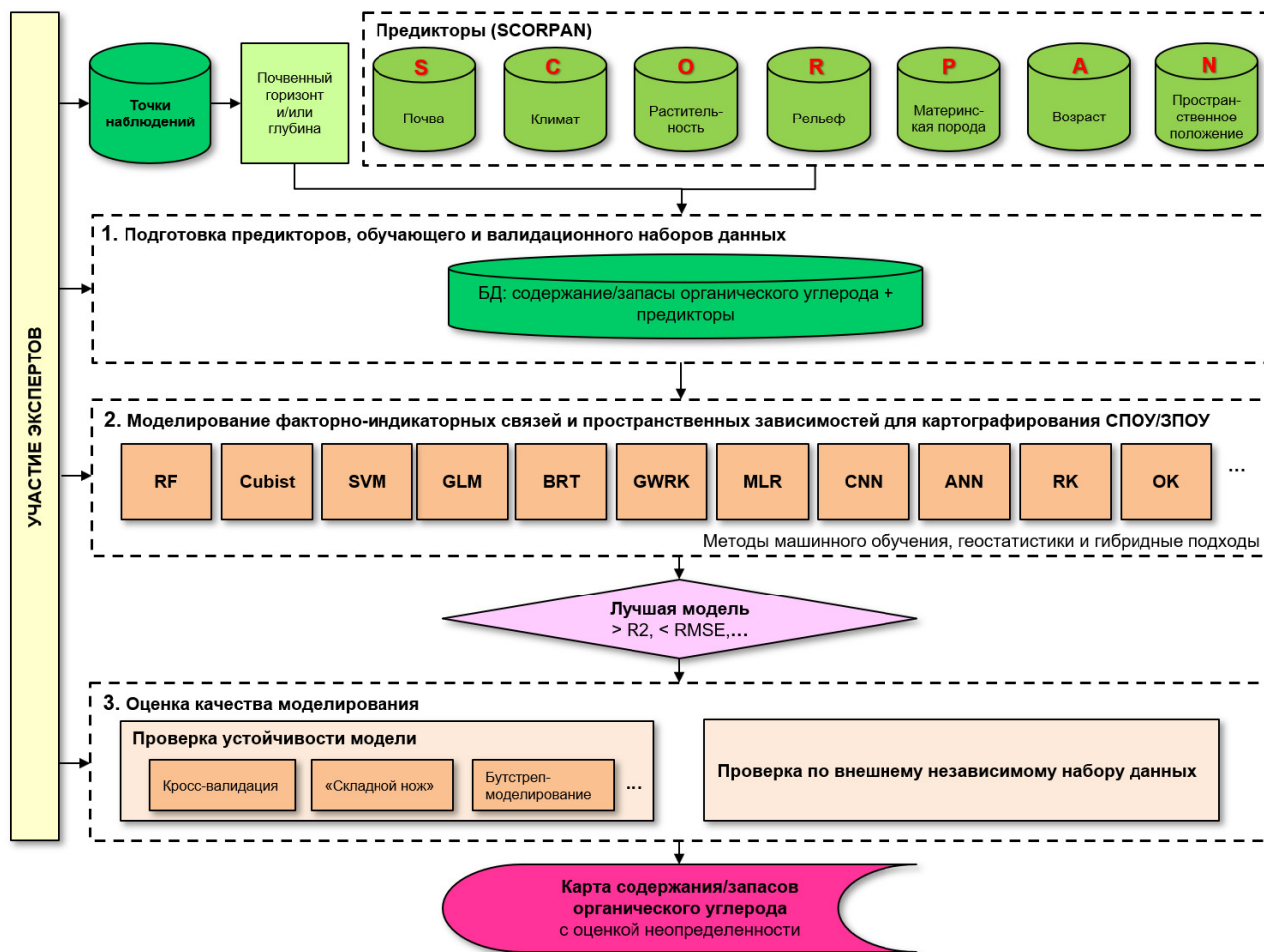


Рисунок 2. Блок-схема цифрового почвенного картографирования содержания и запасов органического углерода (СПОУ и ЗПОУ, соответственно)

которого вносят в обучающий и валидационный наборы данных.

Пространственные предикторы, используемые для моделирования содержания и запасов ПОУ, характеризуют факторы почвообразования и индикаторные переменные. Подготовка предикторов, характеризующих рельеф местности, заключается в использовании цифровой модели рельефа (ЦМР) при создании карт морфо-

метрических величин. Под морфометрической величиной понимается числовая характеристика рельефа, определенная в каждой точке карты, такая как высота, крутизна, ориентация склона и другие (Шарый, 2006). Обозначенные морфометрические величины наряду с расчлененностью местности, геометрическими формами и терморезимом склонов являются одними из основных аспектов действия

рельефа на функционирование экосистемы. В работах (Шарый, 2006; Флоринский, 2016) систематизированы основные аспекты действия рельефа: поверхностный сток, расчлененность (изрезанность) местности, геометрические формы, терморегим склонов, высотная поясность. Так, согласно системе базовых морфометрических величин, поверхностный сток описывают: ориентация и крутизна склонов; горизонтальная, вертикальная, разностная и полная аккумуляционная кривизна; площадь водосбора и дисперсивная площадь. Морфометрические величины, определяющие расчлененность рельефа: горизонтальная и вертикальная избыточная кривизна; полная кольцевая кривизна; ротор. Морфометрические величины, описывающие геометрические формы рельефа: несферичность; минимальная, максимальная и средняя кривизна; полная гауссова кривизна. Терморегим склонов определяет их освещенность, высотную зональность — высота земной поверхности.

Подготовка предикторов, характеризующих растительность, заключается в использовании мультиспектральных снимков, на основе которых рассчитывают различные показатели, например вегетационные индексы, отражение в синем/красном/зеленом/ближнем ИК диапазоне и т. д. Также в качестве предикторов при картографировании содержания и запасов ПОУ используются показатели, характеризующие климат и почвообразующие породы (Приложение Б). Наиболее часто

при подготовке предикторов используется программное обеспечение SAGA GIS, QGIS, ArcGIS, и облачная платформа Google Earth Engine (GEE). Моделирование содержания и запасов ПОУ чаще всего проводится в программном обеспечении R, QGIS, ArcGIS, SAGA GIS и другие.

2. Моделирование факторно-индикаторных связей и пространственных зависимостей выполняется посредством методов машинного обучения — деревьев решений (DT, RF, BaRT, BRT, CART), кригинга (OK, RK, GWRK), нейронных сетей (ANN, CNN), линейных регрессий (GLM, MLR) и других. Выполненный обзор исследований показал, что в настоящее время наиболее часто применяются следующие методы: случайный лес (RF, 24% от включенных в обзор исследований), регрессионный кригинг (RK, 11%) и опорные вектора (SVM, 7%) (Приложение А).

В ряде исследований для моделирования запасов ПОУ авторы используют несколько методов машинного обучения — GWRK и RK (Kumar et al., 2012); BART, RF, XGBoost (Чинилин, Савин, 2018); RF, Cubist, RK (Kaya et al., 2022). Исследователи обращают внимание на недостаточность использования только одного метода моделирования и целесообразность проверки различных моделей для конкретной территории картографирования. В Приложении А столбец «Используемые методы» содержит перечисление всех примененных в исследовании методов. Жирным шрифтом выделены методы, показавшие

наилучшие результаты моделирования содержания или запасов ПОУ. В этих методах по обучающей выборке, где в конкретных точках известно содержание/запас углерода и значения предикторов, моделируются факторно-индикаторные связи. Далее смоделированные связи используются для «распознавания» остальной территории картографирования, в которой известны предикторы, но неизвестно содержание и/или запас углерода. Методы машинного обучения могут быть дополнены исследованием пространственных зависимостей и интерполяцией остатков методом простого кригинга. Полученная таким образом карта должна быть проверена. Во многих работах используется проверка устойчивости модели с помощью метода «складного ножа», кросс-валидации или бутстрепа. Наиболее предпочтительным подходом для проверки является дополнительная (внешняя) вероятностная выборка.

Случайный лес — алгоритм машинного обучения, заключающийся в использовании ансамбля решающих деревьев (Breiman, 2001). Алгоритм создания дерева решений или рекурсивного разбиения предполагает выбор переменной и точки разделения, которая приведет к лучшим результатам классификации. Далее для каждой из результирующих ветвей проверяется соблюдение критериев остановки. Как правило, критерием остановки является определенная глубина роста дерева либо минимальное количество наблю-

дений, для которых листовой узел далее классифицировать не может. Согласно алгоритму, из основной выборки формируются подвыборки с заменой (бутстрепа). По каждой подвыборке строится своя модель дерева решений. Так как таких моделей много (обычно около 200), то метод и получил свое название «случайного леса», поскольку обобщает множество деревьев, полученных по случайным выборкам. Конечная модель представляет собой взвешенное среднее из всех построенных деревьев решений.

К преимуществам использования метода относятся: высокая производительность прогнозирования; отсутствие переобучения; низкая корреляция отдельных деревьев между собой, поскольку разнообразие лесов увеличивается за счет использования ограниченного числа переменных-предсказателей; небольшие смещение и дисперсия из-за усреднения по большому количеству деревьев. Также в этом методе предикторы могут быть как качественными, так и количественными, и для количественных показателей отсутствует требование нормальности распределения, так как метод относится к непараметрическим. Одним из основных недостатков метода является внутренняя сложность получаемого леса моделей, которая затрудняет интерпретацию взаимозависимостей между зависимыми переменными и переменными-предсказателями, поскольку невозможно исследовать строение всех деревьев в лесу.

Регрессионный кригинг — это гибридный метод, сочетающий простую или множественную линейную регрессию с кригингом остатков прогнозирования. Суть метода состоит в нахождении связи между предикторами с одной стороны и содержанием/запасом углерода с другой, используя методы регрессии или машинного обучения, тогда термин «регрессионный кригинг» используется в более широком смысле. После этого остатки проверяют на наличие пространственных зависимостей. Ограничениями применения метода являются: размер обучающей выборки не менее 100–150 точек; выполнение условия стационарности для остатков — транзитивности вариограммы; нормальное распределение остатков.

Метод опорных векторов также относится к непараметрическим методам машинного обучения. Суть метода заключается в переводе исходных векторов в пространство более высокой размерности и поиск в нем разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором (Vapnik, 1998). Две параллельных гиперплоскости строятся по обеим сторонам разделяющей классы гиперплоскости. Алгоритм работает в предположении, что чем больше разница или расстояние между параллельными гиперплоскостями, тем меньше средняя ошибка классификатора.

Преимущества метода опорных векторов является эффективность в пространствах большой размерности, а также в случаях, когда количество призна-

ков больше, чем количество наблюдений (Pedregosa et al., 2011). Используется подмножество обучающих точек в функции принятия решения, поэтому метод эффективен с точки зрения использования памяти компьютера. Метод характеризуется универсальностью — для функции принятия решения могут быть заданы различные функции ядра, в том числе пользователь может задать свои опорные вектора.

3. Оценка качества моделирования выполняется с использованием независимого валидационного набора данных, либо устойчивость модели можно проверить с привлечением методов: «складного ножа», кросс-валидации и бутстреп-моделирования. Для оценки точности карт используются различные показатели, например корень из среднеквадратической ошибки или средняя абсолютная ошибка в процентах.

Использование независимого набора данных для проверки модели. Для проверки картографической модели рекомендуется использовать специально отобранную дополнительную (внешнюю) вероятностную выборку. В идеальном случае эта выборка создается отдельно в результате независимых полевых исследований изучаемой территории. Она называется «вероятностной» в том смысле, что является репрезентативной для территории исследования, т. е. вероятность попадания объектов (точек) в выборку равна вероятности того, как они представлены на территории в зависимости от степени ее неоднородности.

Например, если территория включает разные типы и подтипы почв, то в выборке они должны быть представлены с той же вероятностью, что и на территории.

В случае отсутствия независимого полевого исследования рабочая выборка делится на два набора: обучающий и валидационный. Обучающий набор данных используется для построения моделей. Валидационный набор данных обычно составляет от 10 до 30% (в среднем 20%) от общего объема данных в зависимости от числа точек. Он должен быть проверен на репрезентативность относительно общего набора данных. Важно, что независимая или валидационная выборка создается один раз и используется для проверки модели после завершения моделирования.

Проверка устойчивости модели. Методы «складного ножа», кросс-валидации и бутстреп-моделирования относятся к методам формирования достаточно большого числа подвыборок на основе единственной рабочей выборки. Подвыборки могут быть использованы в различных целях как в процессе моделирования, так и для проверки модели. В любом случае подвыборки являются зависимыми по отношению к рабочей выборке. Если исходная рабочая выборка будет содержать искажения репрезентативности, то порождаемые перечисленными методами подвыборки будут иметь аналогичные искажения. При использовании перечисленных методов проверяется только устойчивость модели без проверки ее адекватности исследуемой территории.

Метод «складного ножа» (JACKKNIFE, джекнайф, поэлементная кросс-валидация) подразумевает систематический перерасчет нужной статистики (среднего, медианы, коэффициента корреляции или регрессии и других), удаляя из выборки случайным образом по одному наблюдению. Можно «выбросить» какую-то часть наблюдений, но обычно процедура продолжается до тех пор, пока не охватит все точки наблюдения. Таким образом, может быть получена несмещенная оценка статистики и ее ошибка.

Процедура джекнайф носит менее общий характер по сравнению с бутстреп-моделированием. Однако джекнайф проще применять для сложных схем проб-отбора, таких, например, как многоступенчатый отбор с различными весами. Джекнайф и бутстреп-моделирование часто приводят к одинаковым результатам. В то же время бутстреп-моделирование может давать немного разные результаты для повторностей на одних и тех же данных, тогда как джекнайф дает одинаковый результат каждый раз (при условии, что подмножества выбираются из одной и той же выборки). Джекнайф часто используется ввиду простоты процедуры и возможности наглядного представления результатов в виде графика наблюдаемых и предсказанных значений.

Метод кросс-валидации (перекрестная проверка, метод скользящего контроля, метод наибольшей беспристрастности) подразумевает деление случайным образом подмножества наблюдений на

обучающую и проверяющую выборку. По обучающей выборке происходит процесс настройки модели, по второй выборке производится ее проверка. Этот процесс повторяется многократно — от 10 до 100 или 1000 раз. Мерой точности прогноза считают среднюю оценку, полученную по результатам оценки каждого значения проверяющей выборки.

Бутстреп-моделирование — это статистический метод оценки распределения случайной величины, когда из исходной выборки отбираются достаточное число раз подвыборки с заменой (то есть подвыборки каждый раз возвращаются в исход-

ную выборку). Чаще всего формируются подвыборки, составляющие 99%, 95% или 90% от исходной выборки (Мешалкина и др., 2010). В результате такой процедуры получают ошибку или доверительный интервал для параметров генеральной совокупности — среднего, медианы, коэффициента корреляции или регрессии. Бутстреп-моделирование используется для построения и проверки гипотез в случае небольшой исходной выборки.

Показатели, используемые для проверки точности карт количественных почвенных свойств. Все показатели оценки точности цифровых карт (табл. 1)

Таблица 1. Основные показатели, используемые для оценки точности карт количественных почвенных свойств

Средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, <i>MAE</i>)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e(s_i)$
Средняя квадратичная ошибка (англ. Mean Squared Error, <i>MSE</i>)	$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^2(s_i)$
Корень из средней квадратичной ошибки (англ. Root Mean Squared Error, <i>RMSE</i>)	$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^2(s_i)}$
Средняя абсолютная ошибка в процентах (англ. Mean Absolute Percentage Error, <i>MAPE</i>)	$MAPE = 100 \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ Z(s_i) - \hat{Z}(s_i) }{ Z(s_i) }$
Коэффициент детерминации (англ. Amount of Variance Explained, <i>AVE</i>)	$AVE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))^2}{\sum_{i=1}^N (Z(s_i) - \bar{Z})^2}$
Коэффициент среднеквадратичного отклонения (англ. Mean Squared Deviation Ratio, <i>MSDR</i>)	$MSDR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))^2}{\sigma^2(s_i)}$

Условные обозначения: $e(s_i)$ — разность между предсказанными и наблюдаемыми значениями; $\hat{Z}(s_i)$ — предсказанное значение; $Z(s_i)$ — наблюдаемое значение; N — количество точек пробоотбора в анализируемом/валидационном наборе данных; σ — дисперсия; \bar{Z} — среднее значение свойства почвы в анализируемом наборе данных

количественных почвенных свойств, в том числе запасов и/или содержания углерода, основаны на анализе «остатков» или «невязок», получаемых как разности $e(s_j)$ предсказанных картографической моделью $\check{Z}(s_j)$ и наблюдаемых $Z(s_j)$ значений в точках (s_j) , используемых для проверки:

$$e(s_j) = \check{Z}(s_j) - Z(s_j) \quad (2).$$

Средняя абсолютная ошибка (MAE) и средняя квадратичная ошибка (MSE) показывают точность картографирования и отображают средний разброс невязок. Они применяются в ситуациях, когда необходимо выявить большие ошибки и выбрать модель, которая дает меньше больших ошибок прогноза. При использовании любой из этих оценок может быть полезно проанализировать, какие объекты вносят наибольший вклад в общую ошибку — не исключено, что на этих объектах была допущена ошибка при вычислении предикторов или содержания/запасов ПОУ. Корень из средней квадратичной ошибки (RMSE) используется чаще, так как имеет одинаковую размерность с исходными данными. Этот показатель очень зависит от наличия больших значений невязок, поэтому часто используют не среднее, а рассчитывают медианное значение MSE и извлекают из него корень. Среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE) можно измерять в долях или процентах.

Например, MAPE = 6% означает, что ошибка составила 6% от фактических значений. Основная проблема данной ошибки — нестабильность.

Коэффициент детерминации (R^2), или «эффективность модели», показывает процент объясненной моделью дисперсии от общей дисперсии предсказываемой переменной. Фактически данная мера качества — это нормированная среднеквадратичная ошибка. Если она близка к единице, то модель хорошо объясняет данные, если близка к нулю — прогнозы сопоставимы по качеству с предсказанием только по среднему значению. Коэффициент среднеквадратичного отклонения (MSDR) показывает, насколько модель хорошо предсказывает неопределенность моделирования. В случае, если к остаткам применялся кригинг, то неопределенность предсказания будет соответствовать ошибке кригинга.

Анализ используемых предикторов. Анализ работ показал, что пространственные данные о рельефе были одними из наиболее часто используемых предикторов, за которыми следовали переменные, представляющие растительность и климат (рис. 3, Приложение А). Добавление в модели пространственных данных о классификационных единицах почв значительно повышало точность картографирования, однако эти данные использовались в 5.6% исследовательских работ.

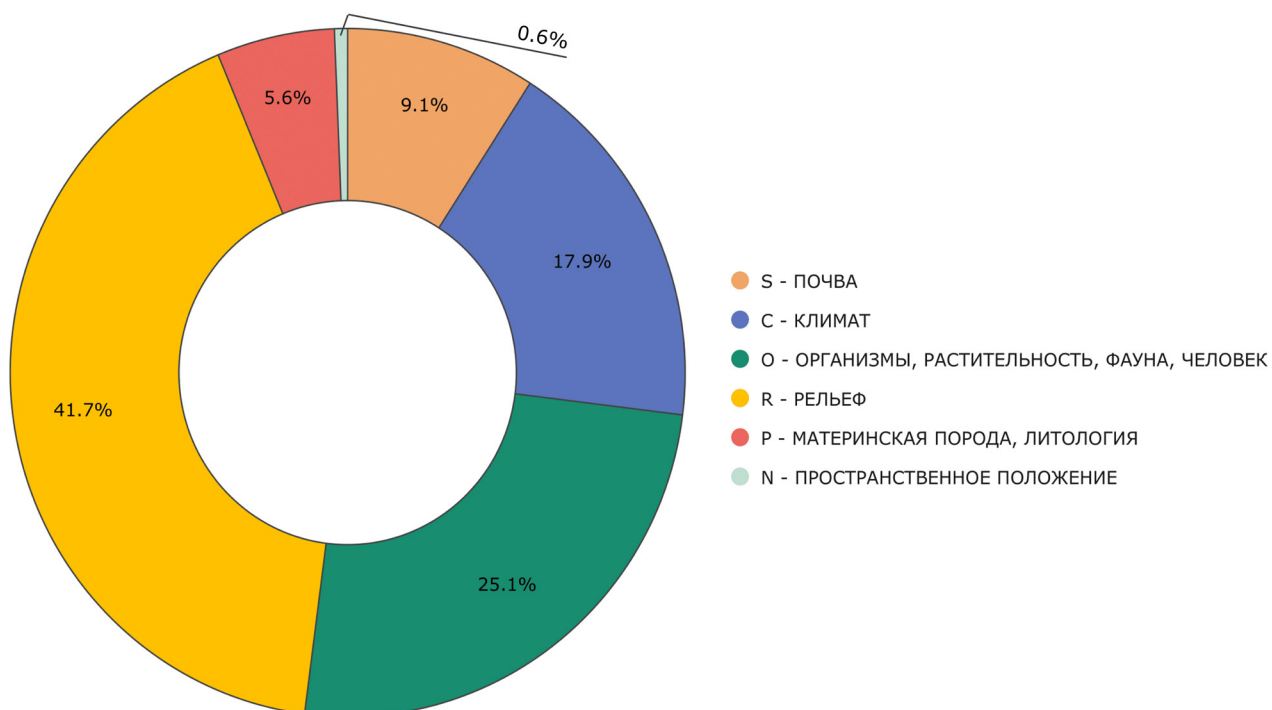


Рисунок 3. Процентное соотношение предикторов, рассмотренных в литературном обзоре, в рамках модели SCORPAN (Приложение Б)

Наиболее информативными в цифровом картографировании содержания и запасов ПОУ являлись следующие предикторы: классификационные единицы почв, среднегодовое количество осадков, NDVI, высота над уровнем моря, уклон, топографический индекс влажности (Приложение Б, рис. 4, 5).

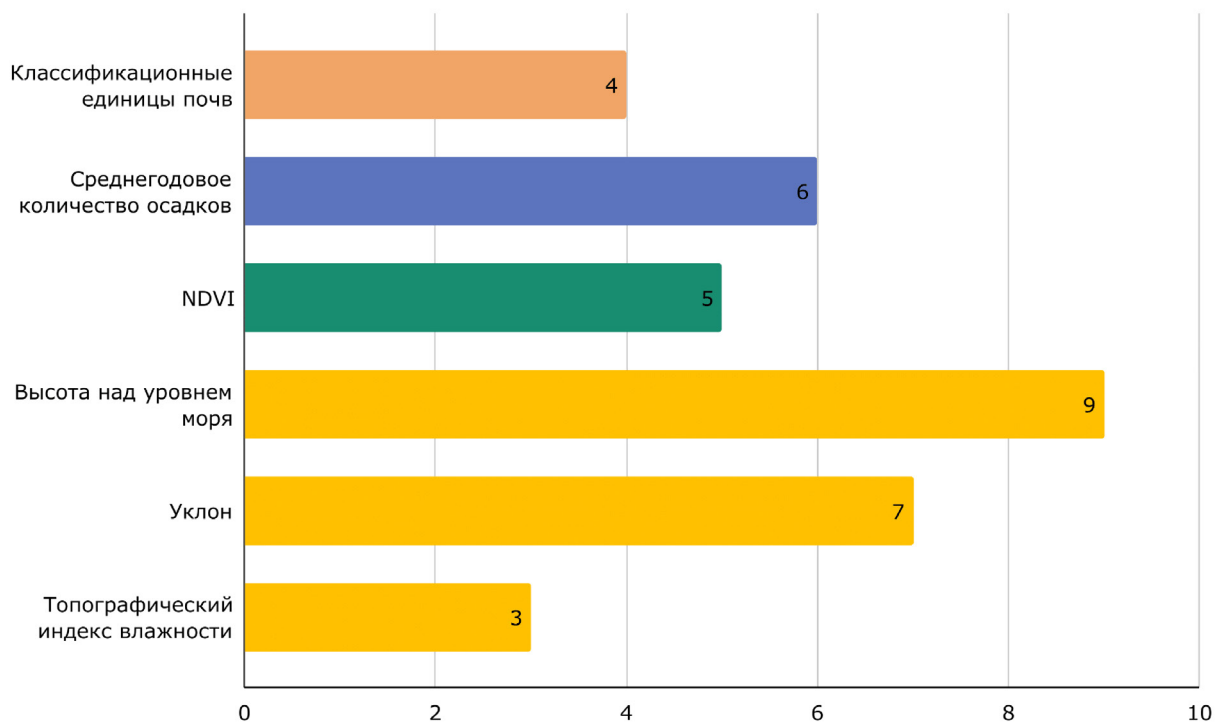


Рисунок 4. Наиболее информативные предикторы (Приложение Б)

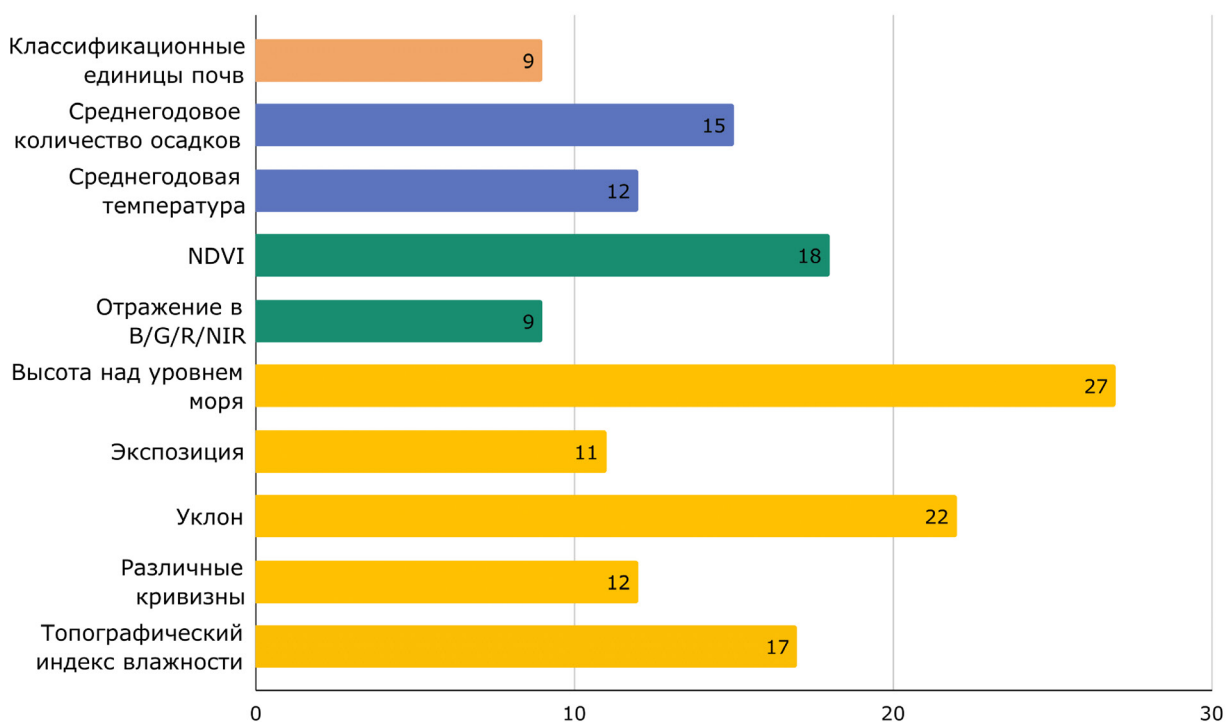


Рисунок 5. Десять наиболее часто используемых предикторов для картографирования содержания и запасов ПОУ в почвах на основе рассмотренных работ (Приложение Б)

В настоящей работе были изучены опубликованные исследования в зависимости от природной зоны, основываясь на карте природных зон Д. Олсона и соавторов (Olson et al., 2001) (рис. 6). Для исследований, охватывающих несколько природных зон одновременно, были учтены все природные зоны, находящиеся в границах исследуемой территории. В зоне широколиственных и смешанных (хвойно-широколиственных) лесов умеренного пояса

было проведено наибольшее количество исследований, далее в порядке убывания следовали зоны: жестколистных лесов и кустарников средиземноморского типа; пустынь, полупустынь и засушливых кустарников; степей и лесостепей, саванн и кустарниковых экосистем умеренного пояса (рис. 6). Данное исследование не является исчерпывающим и представленное распределение на графике может измениться по мере добавления новых работ.

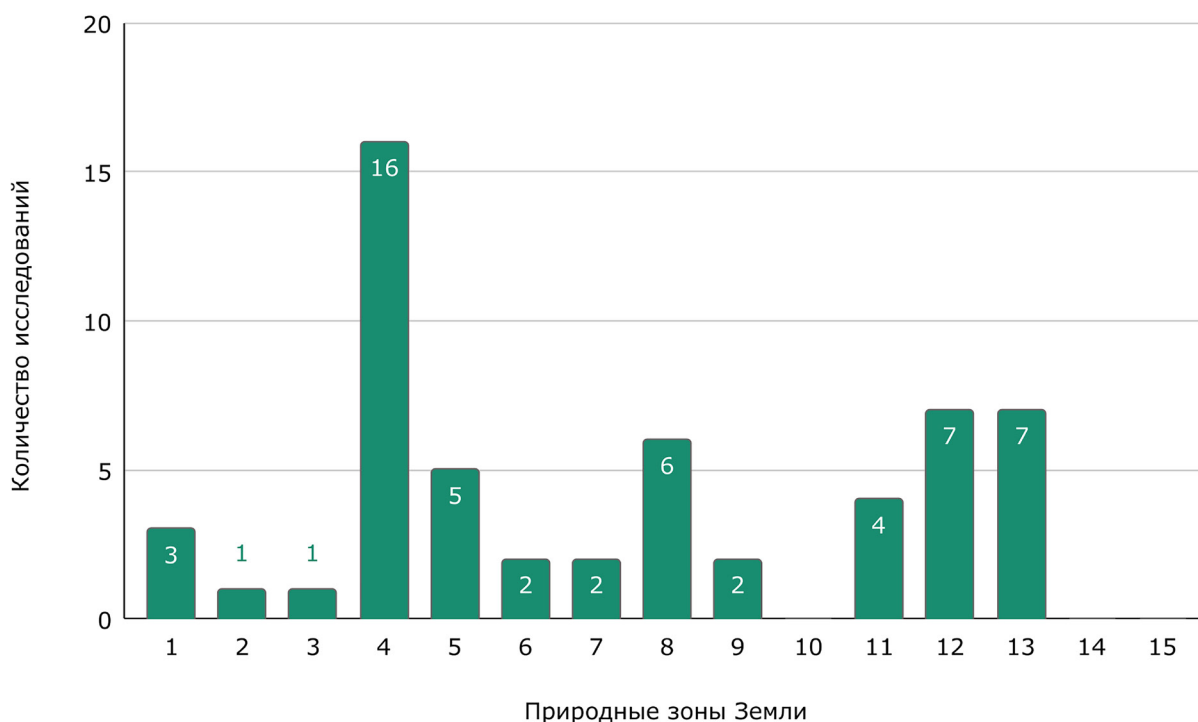


Рисунок 6. Распределение исследований по картографированию содержания/запасов органического почвенного углерода по природным зонам (Olson et al., 2001) на региональном и локальном уровнях. Природные зоны Земли (Olson et al., 2001): 1 — влажные широколиственные леса тропического и субтропического поясов; 2 — переменные влажные широколиственные леса тропического и субтропического поясов; 3 — хвойные леса тропического и субтропического поясов; 4 — широколиственные и смешанные (хвойно-широколиственные) леса умеренного пояса; 5 — хвойные леса умеренного пояса (преимущественно в горных экосистемах); 6 — бореальные леса/тайга; 7 — степь и лесостепь, саванны, кустарниковые экосистемы тропических и субтропических поясов; 8 — степь и лесостепь, саванны и кустарниковые экосистемы умеренного пояса; 9 — заливные луга и саванны; 10 — горные луга и кустарниковые экосистемы; 11 — тундры; 12 — жестколистные леса и кустарники средиземноморского типа; 13 — пустыни, полупустыни и засушливые кустарники; 14 — мангровые леса; 15 — ледяные полярные пустыни

Анализ географии исследований. Выполненный обзор современных публикаций показал, что цифровое почвенное картографирование на региональном и локальном уровнях является наиболее популярным подходом для картографирования содержания и запасов ПОУ. Примеры подобных исследований можно найти на всех

континентах, за исключением Антарктиды (рис. 7). На территории России выделим региональные и локальные исследования в Воронежской (Чинилин, Савин, 2018), Брянской (Гаврилюк и др., 2021) и Новосибирской (Гопп, 2022) областях, Красноярском крае (Шарый и др., 2018), в Республике Башкортостан (Suleymanov et al., 2021)

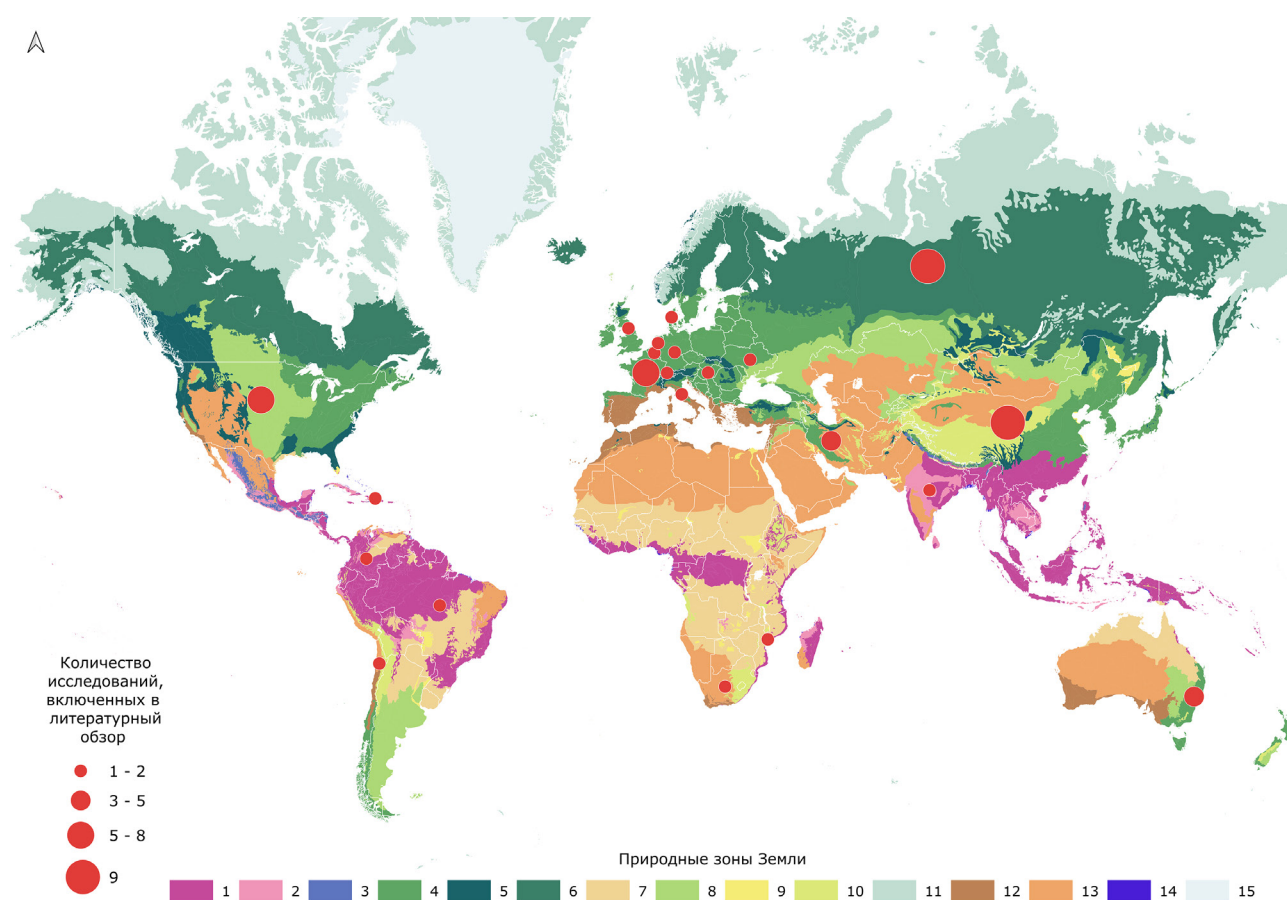


Рисунок 7. География включенных в обзор исследований по картографированию содержания/запасов почвенного органического углерода на региональном и локальном уровне. Природные зоны Земли (Olson et al., 2001): 1 — влажные широколиственные леса тропического и субтропического поясов; 2 — переменные влажные широколиственные леса тропического и субтропического поясов; 3 — хвойные леса тропического и субтропического поясов; 4 — широколиственные и смешанные (хвойно-широколиственные) леса умеренного пояса; 5 — хвойные леса умеренного пояса (преимущественно в горных экосистемах); 6 — бореальные леса/тайга; 7 — степь и лесостепь, саванны, кустарниковые экосистемы тропических и субтропических поясов; 8 — степь и лесостепь, саванны и кустарниковые экосистемы умеренного пояса; 9 — заливные луга и саванны; 10 — горные луга и кустарниковые экосистемы; 11 — тундры; 12 — жестколистные леса и кустарники средиземноморского типа; 13 — пустыни, полупустыни и засушливые кустарники; 14 — мангровые леса; 15 — ледяные полярные пустыни

и в Республике Карелия (Нарыкова, Плотникова, 2022). Следует отметить, что точная количественная оценка, например, запасов ПОУ в почве является проблематичной главным образом из-за разреженности точек наблюдения, особенно на больших глубинах, что приводит к большой неопределенности и расхождению результатов у разных авторов в 2-3 раза (Piao et al., 2009; Шарый и др., 2018).

Публикации первых работ по направлению ЦПК относятся к 1980-м гг. В 2003 г. вышла статья Алекса МакБратни с соавторами «О цифровой почвенной картографии», в которой были сформулированы основные положения подхода (McBratney et al., 2003). Основными центрами развития этого направления стали Австралия, Голландия, США и Франция (Lagacherie et al., 2007; Hartemink et al., 2008).

В ноябре 2008 г. стартовал глобальный проект GlobalSoilMap.net (GlobalSoilMap.net..., 2008) с целью создания цифровой почвенной карты мира, основанной на картограммах отдельных почвенных свойств. Методическое обоснование проекта было опубликовано в журнале Science (Sanchez et al., 2009). Картографируемыми свойствами почв были заявлены: содержание углерода и гравия, гранулометрический состав, плотность почвы, запас доступной влаги. Данные свойства должны были оцениваться по шести глубинам (в см): 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100, 100–200 с указанием средних значений и доверительных интервалов. Планировалось вы-

полнить картографирование 80% мировой поверхности суши с разрешением 90 м. К настоящему времени проект реализован только для стран Африки.

На глобальном уровне также отметим проект SoilGrids (SoilGrids — global gridded soil information) — систему цифрового картографирования почв, использующую современные методы машинного обучения для отображения пространственного распределения свойств почв (содержания органического углерода, общего азота, фракций гранулометрического состава (песка, глины, крупнозема), pH водной вытяжки, катионообменной способности и плотности) по всему земному шару. Картографические модели SoilGrids 2.0 построены на основе более чем 240 000 наблюдений, полученных из Всемирной службы почвенной информации ISRIC (база данных WoSIS), и глобальных экологических ковариат (более 400), описывающих растительность, рельеф, климат, геологию и гидрологию (Poggio et al., 2021). В этой системе глобальные карты свойств почвы с пространственным разрешением 250 м представлены в соответствии со спецификациями рабочей группы GlobalSoilMap IUSS для шести стандартных интервалов глубины (0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 и 100–200 см). Карта запасов ПОУ представлена для почвенного слоя с интервалом глубины 0–30 см.

Также стоит упомянуть о платформе GLOSIS (Global Soil Information System), которая объединяет информацию о почвах,

собранные национальными учреждениями (URL: <https://goo.su/V3Jw>). В частности, на этой платформе размещена глобальная карта запасов ПОУ в слое 0–30 см под названием GSOСmap v.1.5.0 (FAO and ITP ..., 2018). Растровая карта GSOСmap имеет пространственное разрешение 30 угловых секунд (приблизительно 1 × 1 км). Часть карты, относящаяся к территории России, была построена на основе скорректированной цифровой версии Почвенной карты РСФСР масштаба 1 : 2 500 000 и информационной системы «Почвенно-географическая база данных Российской Федерации», в которой по большей части содержатся результаты исследований почвенных разрезов, относящихся к 1960–1980-м гг. (Чернова и др., 2021).

Многочисленны исследования по картографированию содержания и запасов ПОУ на территории Европы — континентальная часть (CEF Telecom project, 2018); Нидерланды (Wadouх et al., 2022); Дания (Adhikari et al., 2014); Шотландия, Великобритания (Poggio, Gimona, 2014); Бавария, Германия (Wiesmeier et al., 2014); Бельгия (Meersmans et al., 2008); Франция (Arrouays et al., 2001; Chen et al., 2018; Martin et al., 2011; Meersmans et al., 2012; Mulder et al., 2016); Швейцария (Nussbaum et al., 2014; Zhou et al., 2021); Венгрия (Szatmari et al., 2021); Италия (Fantappie et al., 2011; Francaviglia et al., 2014); Украина (Вяткин и др., 2018). Среди стран Азии картографирование запасов почвенного ОУ наиболее развито в Китае (Wiesmeier et al.,

2011; Zhou et al., 2019; Wang et al., 2021; Gu et al., 2022; Zhu et al., 2022; Guo et al., 2015) и Иране (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Hateffard et al., 2019; Fathizad et al., 2022; Kaya et al., 2022). Также выделим работы на территории Индии (Lo Seen et al., 2010) и Тибета (Yang et al., 2008).

Примерами исследований на региональном уровне является картографирование запасов ПОУ в разных регионах мира, в частности в отдельных штатах США: Пенсильвания (Kumar et al., 2012), Висконсин (Adhikari et al., 2019), Флорида (Kim, Grunwald, 2016; Keskin et al., 2019), Индиана (Mishra et al., 2009); в Южной Америке: Чили (Rojas et al., 2018; Padarian et al., 2017), Бразилии (Bonfatti et al., 2016; Gomes et al., 2019) и Колумбии (Rainford et al., 2021); на африканском континенте: ЮАР (Venter et al., 2021) и Мозамбик (Cambule et al., 2014); в Австралии (Gray, Bishop, 2016; Padarian et al., 2019; Somarathna et al., 2016; Wang et al., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполненного анализа современных методических подходов к картографированию содержания и запасов почвенного органического углерода на различных пространственных уровнях были изучены два подхода: (1) на основе существующих тематических карт и архивных данных, а также (2) цифровое почвенное картографирование, сочетающее

интеллектуальный и пространственный анализ данных. При картографировании содержания и запасов органического углерода в почвах на территории России целесообразно применение обоих подходов. По каждому подходу сформулированы условия применения и необходимые этапы. Так, картографирование на основе тематических карт и архивных данных состоит из двух этапов: подготовка данных и предикторов посредством ГИС; картографирование содержания и запасов ПОУ с учетом типа землепользования и классификационной принадлежности почвы. Проверка результата носит экспертный характер и производится специалистами, знающими картографируемую территорию.

Цифровое картографирование выполняется в три этапа: подготовка двух независимых наборов данных (обучающего и валидационного), а также предикторов; моделирование факторно-индикаторных связей и пространственных зависимостей с последующей оценкой качества предсказания. Моделирование факторно-индикаторных связей выполняется посредством методов машинного обучения, геостатистики и гибридных подходов (RF, BRT, SVM, GLM, MLR, CART, ANN, CNN, RK, ОК и другие). При выявлении пространственных зависимостей остатков используют разные виды кригинга. Оценка качества моделирования, то есть насколько картографическая модель соответствует фактическим данным, выполняется с использованием независимого валидационного набора данных,

обозначаемого в цифровой картографии термином «внешняя вероятностная выборка». При использовании кригинга качество моделирования может быть оценено через карту ошибок интерполяции. Устойчивость модели проверяется методами «складного ножа», кросс-валидации и бутстреп-моделирования и отражает, насколько модель хорошо описывает обучающую выборку. Для оценки точности карт количественных признаков используются различные критерии: средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя квадратичная ошибка (MSE), корень из средней квадратичной ошибки (RMSE), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) и другие.

Для проведения картографирования содержания и запасов ПОУ на локальном и региональном уровнях необходимы обучающая выборка и набор пространственных предикторов, характеризующих факторы почвообразования объекта исследования согласно модели SCORPAN. Такими предикторами являются данные о: растительности — тип растительного покрова, преобладающая порода, категория землепользования; климате — температура воздуха и почвы, количество осадков; рельефе — морфометрические параметры; почвообразующей породе и почве — генетические типы почвообразующих пород, классификационные единицы почв, химические и физические свойства почв, распространение вечной мерзлоты; антропогенном влиянии — категория землепользования, вырубки, гари. Кроме дан-

ных, получаемых из архивных источников, в цифровом картографировании используются данные дистанционного зондирования Земли, на основе которых получают различные показатели. Например, для такого фактора почвообразования, как растительность, на основе ДДЗ можно рассчитать не менее 200 показателей, для рельефа — 40, для климата — 20, для почвообразующей породы — 10.

Таким образом, проведенный обзор литературных источников позволил выявить особенности основных методических подходов, применяемых для картографирования содержания и запасов органического углерода в почвах практически на всех континентах Земли и разных природных зон. Достигнутый прогресс в области ЦПК остается недостаточным для России в целом, так как число работ по этой теме незначительно и недостаточно освещена в литературе сравнительная оценка результатов картографирования неоднородности почвенных свойств на основе мульти- и гиперспектральных снимков, а так-

же цифровых моделей высот и радарных снимков в разных природных зонах. Поэтому необходимо продолжать исследования в этом направлении и разрабатывать современные методы, которые позволяют в автоматизированном режиме обрабатывать данные дистанционного зондирования Земли, идентифицировать и оценивать разнообразие почв и почвенных свойств.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В. А., Бердси Р. А. Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: ВЦ СО РАН, 1994. 226 с.
- Вяткин К. В., Залавский Ю. В., Бигун О. Н., Лебедь В. В., Шерстюк А. И., Плиско И. В., Накисько С. Г. Создание национальной карты запасов органического углерода в почвах Украины с использованием цифровых методов почвенного картографирования // Почвоведение и агрохимия. 2018. № 2. С. 5–17.
- Гаврилюк Е. А., Кузнецова А. И., Горнов А. В. Геопространственное моделирование содержания и запасов азота и углерода в лесной подстилке на основе разно-

- сезонных спутниковых изображений Sentinel // Почвоведение. 2021. Т. 54. № 2. С. 168–182.
- Гонн Н. В.* Углерод в почвах Кузнецко-Салаирской геоморфологической провинции: база данных, цифровое картографирование, геопространственный анализ // Сборник научных трудов Международной научной конференции «Эволюция почв и развитие научных представлений в почвоведении», посвященной 90-летию со дня рождения Л. М. Бурлаковой. г. Барнаул, 16–21 августа 2022 г. Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2022. С. 55–58.
- Захаров С. А.* Курс почвоведения. М.-Л.: Госиздат, 1927. 440 с.
- Инишева Л. И., Сергеева М. А., Смирнова О. Н.* Депонирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // Научный диалог. Естествознание и экология. 2012. № 7. С. 61–74.
- Карта почвенно-географического районирования. М: 1:15 000 000 // Национальный атлас почв Российской Федерации. Под ред. Г. В. Добровольского, И. С. Урусевской, И. О. Алябиной. М.: Астрель: АСТ, 2011. С. 196–201.
- Карта растительности СССР. Масштаб 1 : 4 000 000. М.: ГУГК, 1990.
- Козут Б. М., Фрид А. С.* Сравнительная оценка методов определения содержания гумуса в почвах // Почвоведение. 1993. № 9. С. 119–123.
- Мешалкина Ю. Л., Васенев И. И., Кузякова И. Ф., Романенков В. А.* Геоинформационные системы в почвоведении и экологии. Интерактивный курс. М.: РГАУ-МСХА, 2010. 95 с.
- Нарыкова А. Н., Плотникова А. С.* Подготовка предикторов для моделирования климаторегулирующих экосистемных услуг лесов на региональном уровне с помощью Google Earth Engine // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН «Научные основы устойчивого управления лесами». Москва, 25–29 апреля 2022 г. С. 182–184.
- Пастухов А. В., Каверин Д. А.* Запасы почвенного углерода в тундровых и таежных экосистемах Северо-Восточной Европы // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1084–1094.
- Пастухов А. В., Каверин Д. А., Щанов В. М.* Построение региональных цифровых тематических карт (на примере карты запасов углерода в почвах бассейна р. Уса) // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1042–1051.
- Почвенная карта РСФСР. Масштаб 1 : 2 500 000 / Под ред. В. М. Фридриха. М.: ГУГУК, 1988 (Скорректированная цифровая версия, 2007).
- Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК / Под ред. Х. С. Игглестон,

- Л. Буэндиа, К. Мива, Т. Нгара, К. Танабе. Т. 4. Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования. Япония, ИГЕС, 2006. URL: <https://goo.su/bZ5Vk5q> (дата обращения 15.02.2023).
- Рыжова И. М., Подвезенная М. А.* Запасы гумуса в автономных почвах природных экосистем Восточно-Европейской равнины и их чувствительность к изменениям параметров круговорота углерода // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1043–1049.
- Самсонова В. П., Мешалкина Ю. Л.* Количественный метод сравнения почвенных карт и картограмм // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2011. № 3. С. 3–5.
- ФАО. Стандартная рабочая методика для органического углерода почвы. Спектрофотометрический метод Тюрина. 2021. 26 с. URL: <https://goo.su/cvVhzWh> (дата обращения 15.02.2023).
- Флоринский И. В.* Гипотеза Докучаева как основа цифрового прогнозного почвенного картографирования (к 125-летию публикации) // Почвоведение. 2012. № 4. С. 500–506.
- Флоринский И. В.* Иллюстрированное введение в геоморфометрию // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2016. Т. 11. № 1. С. 1–20.
- 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.
- Чернова О. В., Рыжова И. М., Подвезенная М. А.* Опыт региональной оценки изменений запасов углерода в почвах южной тайги и лесостепи за исторический период // Почвоведение. 2016. № 8. С. 1013–1028.
- Чернова О. В., Рыжова И. М., Подвезенная М. А.* Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350.
- Честных О. В., Замолотчиков Д. Г.* Зависимость плотности почвенных горизонтов от глубины их залегания и содержания гумуса // Почвоведение. 2004. № 8. С. 937–944.
- Чинилин А. В., Савин И. Ю.* Крупномасштабное цифровое картографирование содержания органического углерода почв с помощью методов машинного обучения // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2018. Вып. 91. С. 46–62.
- Шамрикова Е. В., Ванчикова Е. В., Кондратёнок Б. М., Лаптева Е. М., Кострова С. Н.* Проблемы и ограничения дихроматометрического метода измерения содержания почвенного органического вещества (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 787–794.
- Шарый П. А.* Геоморфометрия в науках о Земле и экологии, обзор методов и приложений // Известия Самарско-

- го научного центра РАН. 2006. Т. 8. № 2. С. 458–473.
- 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 // Известия РАН. Серия географическая. 2018. № 6. С. 39–48.
- Шепелев А. Г.* Геоинформационное картографирование почвенного углерода на примере Центральной Якутии // Вестник науки и образования. 2022. № 9. С. 38–44.
- Щепашенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.
- Adhikari K., Hartemink A. E., Minasny B., Kheir R. B., Greve M. B., Greve M. H.* Digital mapping of soil organic carbon contents and stocks in Denmark // PLoS ONE. 2014. Vol. 9. No 8. Article: e105519.
- Adhikari K., Owens P., Libohova Z., Miller D., Wills S., Nemecek J.* Assessing soil organic carbon stock of Wisconsin, USA and its fate under future land use and climate change // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 667. P. 833–845.
- Agus F., Hairiah K., Mulyani A.* Measuring carbon stock in peat soils: practical guidelines. Bogor, Indonesia: World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia Regional Program, Indonesian Centre for Agricultural Land Resources Research and Development, 2011. 60 p.
- Arrouays D., Deslais W., Badeau V.* The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France // Soil Use and Management. 2001. Vol. 17. Issue 1. P. 7–11.
- Bonfatti B. R., Hartemink A. E., Giasson E., Tornquist C. G., Adhikari K.* Digital mapping of soil carbon in a viticultural region of Southern Brazil // Geoderma. 2016. Vol. 261. P. 204–221.
- Breiman L.* Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. No 1. P. 5–32.
- Cambule A. H., Rossiter D. G., Stoorvogel J. J., Smaling E. M. A.* Soil organic carbon stocks in the Limpopo National Park, Mozambique: amount, spatial distribution and uncertainty // Geoderma. 2014. Vol. 213. P. 46–56.
- CEF Telecom project 2018-EU-IA-0095: “Geo-harmonizer: EU-wide automated mapping system for harmonization of Open Data based on FOSS4G and Machine”. URL: <https://ecodatacube.eu/> (дата обращения 25.02.2023).
- Chen S., Martin M. P., Saby N. P. A., Walter C., Angers D. A., Arrouays D.* Fine resolution map of top- and subsoil carbon sequestration potential in France // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 630. P. 389–400.
- Duarte E., Zagal E., Barrera J., Dube F., Casco F., Hernandez A.* Digital mapping of soil organic carbon stocks in the forest lands of Dominican Republic // European journal of remote sensing. 2022. Vol. 55. No 1. P. 213–231.

- Ellili Y., Walter Ch., Michot D., Pichelin P., Lemerrier B.* Mapping soil organic carbon stock change by soil monitoring and digital soil mapping at the landscape scale // *Geoderma*. 2019. Vol. 351. P. 1–8.
- Fantappie M., L'Abate G., Costantini E.* The influence of climate change on the soil organic carbon content in Italy from 1961 to 2008 // *Geomorphology*. 2011. Vol. 135. Issues 3–4. P. 343–352.
- FAO and ITPS. Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report, 2018. Rome. 162 pp.
- Fathizad H., Taghizadeh-Mehrjardi R., Hakimzadeh Ardakani M. A., Zeraatpisheh M. Heung B., Scholten T.* Spatiotemporal Assessment of Soil Organic Carbon Change Using Machine-Learning in Arid Regions // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. Issue 3. Article: 628.
- Franca Viglia R., Renzi G., Riviaccio R., Marchetti A., Piccini C.* Spatial analysis and prediction of soil organic carbon in Friuli Venezia Giulia region (Northern Italy) // *Geoinformatic and Geostatistic: An Overview*. 2014. Vol. 2. Issue 3. P. 1–8.
- GlobalSoilMap.net, 2008, URL: <https://www.isric.org/projects/globalsoilmapnet> (дата обращения 03.02.2023).
- Gomes L., Faria R., de Souza E., Veloso G., Schaefer C., Fernandes Filho E.* Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil // *Geoderma*. 2019. Vol. 340. P. 337–350.
- Google Earth Engine. 2017. URL: <https://earthengine.google.com/> (дата обращения 03.02.2023).
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27.
- Gray J. M., Bishop T. F. A.* Change in soil organic carbon stocks under 12 climate change projections over New South Wales, Australia // *Soil Science Society of America Journal*. 2016. Vol. 80. P. 1296–1307.
- 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. Article: 106498.
- 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. P. 49–59.
- Hartemink A., McBratney A. B., Mendonca L.* Digital soil mapping with limited data. Montpellier: Springer-Verlag, 2008. P. 3–181.
- Hateffard F., Dolati P., Heidari A., Zolfaghari A.* Assessing the performance of decision tree and neural network models in mapping soil properties // *Journal of Mountain Science*. 2019. Vol. 16. Issue. 8. P. 1833–1847.
- Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E. A. G., Ping C.-L., Schirrmeyer L., Grosse G., Michaelson G. J., Koven C. D., O'Donnell J. A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu Z., Palmtag J., Kuhry P.* Esti-

- mated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // *Biogeoscience*. 2014. Vol. 11. P. 6573–6593.
- Jenny H.* Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology. New York: McGraw Hill, 1941. 281 p.
- Jiang J., Zhu A. X., Qin C. Z., Zhu T., Liu J., Du F., Liu J., Zhang Y.* An CyberSoLIM: A cyber platform for digital soil mapping // *Geoderma*. 2016. Vol. 263. P. 234–243.
- Kaya F., Keshavarzi A., Francaviglia R., Kaplan G., Basayigit L., Dedeoglu M.* Assessing Machine Learning-Based Prediction under Different Agricultural Practices for Digital Mapping of Soil Organic Carbon and Available Phosphorus // *Agriculture*. 2022. Vol. 12. Issue 7. Article: 1062.
- Keskin H., Grunwald S., Harris W.* Digital mapping of soil carbon fractions with machine learning // *Geoderma*. 2019. Vol. 339. P. 40–58.
- Kim J., Grunwald S.* Assessment of carbon stocks in the topsoil using Random Forest and remote sensing images // *Journal of Environmental Quality*. 2016. Vol. 45. P. 1910–1918.
- Kumar S., Lal R., Liu D.* A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock // *Geoderma*. 2012. Vol. 189. P. 627–634.
- Lagacherie P., McBratney A. B., Voltz M.* Digital Soil Mapping. An Introductory Perspective // *Developments in Soil Science*. 2007. Vol. 31. P. 3–22.
- Lo Seen D., Ramesh B. R., Nair K. M., Martin M., Arrouays D., Bourgeon G.* Soil carbon stocks, deforestation and landcover changes in the Western Ghats biodiversity hotspot (India) // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16. Issue 6. P. 1777–1792.
- Martin M., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C., Boulonne L., Arrouays D.* Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France // *Biogeosciences*. 2011. Vol. 8. Issue 5. P. 1053–1065.
- McBratney A. B., Mendoca Santos M. L., Minasny B.* On digital soil mapping // *Geoderma*. 2003. Vol. 117. Issues 1–2. P. 3–52.
- Meersmans J., De Ridder F., Canters F., De Baets S., Van Molle M.* A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium) // *Geoderma*. 2008. Vol. 143. P. 1–13.
- Meersmans J., Martin M., Lacarce E., De Baets S., Jolivet C., Boulonne L., Lehmann S., Saby N., Bispo A., Arrouays D.* A high resolution map of French soil organic carbon // *Agronomy for Sustainable Development*. 2012. Vol. 32. No. 4. P. 841–851.
- Minasny B., Mcbratney A.* Chapter 12 Latin Hypercube Sampling as a Tool for Digital Soil Mapping. // *Developments in Soil Science*. 2006. Vol. 31. P. 153–165.
- Mishra U., Lal R., Liu D., Van Meirvenne M.* Predicting the spatial variation of the soil organic carbon pool at a regional scale. // *Soil Science Society of America Journal*. 2010. Vol. 74. P. 906–914.

- Mishra U., Lal R., Slater B., Calhoun F., Liu D. S., Van Meirvenne M. Predicting Soil Organic Carbon Stock Using Profile Depth Distribution Functions and Ordinary Kriging // Soil Science Society of America Journal. 2009. Vol. 73. Issue 2. P. 614–621.
- Mulder V. L., Lacoste M., Richer-de-Forges A. C., Martin M. P., Arrouays D. National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France // Geoderma. 2016. Vol. 263. P.16–34.
- Nussbaum M., Papritz A., Baltensweiler A., Walthert L. Estimating soil organic carbon stocks of Swiss forest soils by robust external-drift kriging // Geoscientific Model Development Discussions. 2014. Vol. 7. P. 1197–1210.
- Olson D. M., Dinerstein E., Wikramanayake E. D., Burgess N. D., Powell G. V. N., Underwood E. C., D'Amico J. A., Itoua I., Strand H. E., Morrison J. C., Loucks C. J., Allnutt T. F., Ricketts T. H., Kura Y., Lamoreux J. F., Wettengel W. W., Hedao P., Kassem K. R. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth // Bioscience. 2001. Vol. 51. Issue 11. P. 933–938.
- Padarian J., Minasny B., McBratney A. Using deep learning to predict soil properties from regional spectral data // Geoderma Regional. 2019. Vol. 16. Article: e00198.
- Padarian J., Minasny B., McBratney A. B. Chile and the Chilean soil grid: a contribution to GlobalSoilMap // Geoderma Regional. 2017. Vol. 9. P. 17–28.
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay E. Scikitlearn: Machine learning in Python // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.
- Piao S. L., Fang J., Ciais P., Peylin P., Huang Y., Sitch S., Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China // Nature. 2009. Vol. 458. P. 1009–1013.
- Poggio L., de Sousa L., Batjes N., Heuvelink G., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty // Soil. 2021. Vol. 7. Issue 1. P. 217–240.
- Poggio L., Gimona A. National scale 3D modelling of soil organic carbon stocks with uncertainty propagation — An example from Scotland // Geoderma. 2014. Vol. 232–234. Issue 1. P. 284–299.
- Rainford S., Martin-Lopez J. M., Da Silva M. Approximating Soil Organic Carbon Stock in the Eastern Plains of Colombia // Frontiers in Environmental Science. 2021. Vol. 9. Article: 685819.
- Rojas R., Adhikari K., Ventura S. J. Projecting soil organic carbon distribution in Central Chile under future climate scenarios // Journal of Environmental Quality. 2018. Vol. 47. P. 735–745.
- Rossiter D. G. Assessing the thematic accuracy of area-class soil maps. Enschede, Holland: Soil Science Division, 2001. 46 p.
- Sanchez P. A., Ahamed S., Carré F., Hartemink A. E., Hempel J., Huising J., Lagacherie P., McBratney A. B., McKenzie N. J.,

- Mendonça-Santos M. L., Minasny B., Montanarella L., Okoth P., Palm C. A., Sachs J. D., Shepher K. D., Vagen T.-G., Vanlauwe B., Walsh M. G., Winowiecki L. A., Zhang G.-L.* Digital Soil Map of the World // Science. 2009. Vol. 325. No 5941. P. 680–681.
- Shamrikova E. V., Kondratenok B. M., Tumanova E. A., Vanchikova E. V., Lapteva E. M., Zonova T. V., Lu-Lyan-Min E. I., Davydova A. P., Libohova Z., Suvannang N.* Transferability between soil organic matter measurement methods for database harmonization // Geoderma. 2022. Vol. 412. Article: 115547.
- Shaw C. F.* Potent factors in soil formation // Ecology. 1930. Vol. 11. № 2. P. 239–245.
- Soil organic carbon mapping cookbook. Rome: FAO, 2018. 205 с.
- SoilGrids — global gridded soil information. URL: <https://goo.su/W7IJFT> (дата обращения 15.02.2023).
- Somarathna P. D. S. N., Malone B. P., Minasny B.* Mapping soil organic carbon content over New South Wales, Australia using local regression kriging // Geoderma Regional. 2016. Vol. 7. Issue 1. P. 38–48.
- Suleymanov A., Abakumov E., Suleymanov R., Gabbasova I., Komissarov M.* The Soil Nutrient Digital Mapping for Precision Agriculture Cases in the Trans-Ural Steppe Zone of Russia Using Topographic Attributes // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. Vol. 10. Issue 4. Article: 243.
- Szatmari G., Pasztor L., Heuvelink G. B. M.* Estimating soil organic carbon stock change at multiple scales using machine learning and multivariate geostatistics // Geoderma. 2021. Vol. 403. Article: 115356.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Nabiollahi K., Kerry R.* Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran // Geoderma. 2016. Vol. 266. P. 98–110.
- The SoLIM Project. 2004. URL: <https://goo.su/Bblpp> (дата обращения 03.02.2023).
- Todd-Brown K. E. O., Randerson J. T., Post W. M., Hoffman F. M., Tarnocai C., Schuur E. A. G., Allison S. D.* Causes of variation in soil carbon simulations from CMIP5 Earth system models and comparison with observations // Biogeosciences. 2013. Vol. 10. Issue 3. P. 1717–1736.
- Vapnik V. N.* Statistical learning theory. New York: John Wiley and Sons, 1998. 768 p.
- 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, Article: 145384.
- Wadoux A. M. J. C., Walvoort D. J. J., Brus D. J.* An integrated approach for the evaluation of quantitative soil maps through Taylor and solar diagrams // Geoderma. 2022. Vol. 405. Article: 115332.
- Walkley A., Black I. A.* An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method // Soil science. 1934. Vol. 37. Issue 1. P. 29–38.

- Wang B., Waters C., Orgill S., Gray J., Cowie A., Clark A., Liu D. 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. P. 367–378.
- 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. Article: 143644.
- Wang S., Zhuang Q., Yang Z., Yu N., Jin X. Temporal and spatial changes of soil organic carbon stocks in the forest area of north-eastern China // *Forests*. 2019. Vol. 10. Issue 11. Article: 1023.
- Wiesmeier M., Barthold F., Blank B., Kögel-Knabner I. Digital mapping of soil organic matter stocks using Random Forest modeling in a semi-arid steppe ecosystem // *Plant Soil*. 2011. Vol. 340. P. 7–24.
- Wiesmeier M., Barthold F., Sporlein P., Geuß U., Hangen E., Reischl A., Schilling B., Angst G., von Lutzow M., Kogel-Knabner I. Estimation of total organic carbon storage and its driving factors in soils of Bavaria (southeast Germany) // *Geoderma Regional*. 2014. Vol. 1. P. 67–78.
- Yang Y. H., Fang J. Y., Tang Y. H., Ji C. J., Zheng C. Y., He J. S., Zhu B. A. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands // *Global Change Biology*. 2008. Vol. 14. P. 1592–1599.
- Zhang Z., Zhang H., Xu E. Enhancing the digital mapping accuracy of farmland soil organic carbon in arid areas using agricultural land use history // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 334. Article: 130232.
- Zhou T., Geng Y., Ji Ch., Xuc X., Wang H., Pan J., Bumberger J., Haase D., Lausch A. 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. Article: 142661.
- Zhou Y., Hartemink A. E., Shi Z., Liang Z., Lu Y. Land use and climate change effects on soil organic carbon in North and Northeast China // *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 647. P. 1230–1238.
- Zhu X., Junxiu Li, Cheng H., Zheng L., Huang W., Yan Y., Liu H., Yang X. Assessing the impacts of ecological governance on carbon storage in an urban coal mining subsidence area // *Ecological Informatics*. 2022. Vol. 72. Article: 101901.

REFERENCES

- Adhikari K., Hartemink A. E., Minasny B., Kheir R. B., Greve M. B., Greve M. H., Digital mapping of soil organic carbon contents and stocks in Denmark, *PLoS ONE*, 2014, Vol. 9, No 8, Article: e105519.
- Adhikari K., Owens P., Libohova Z., Miller D., Wills S., Nemecek J., Assessing soil organic carbon stock of Wisconsin, USA and its fate under future land use and climate change, *Science of The Total Environment*, 2019, Vol. 667, pp. 833–845.

- Agus F., Hairiah K., Mulyani A., *Measuring carbon stock in peat soils: practical guidelines*. Bogor, Indonesia: World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia Regional Program, Indonesian Centre for Agricultural Land Resources Research and Development, 2011, 60 p.
- Alekseev V. A., Berdsi R. A., *Uglerod v ekosistemah lesov i bolot Rossii* (Carbon storage in forests and peatlands of Russia), Krasnoyarsk: VC SO RAN, 1994, 226 p.
- Arrouays D., Deslais W., Badeau V., The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France, *Soil Use and Management*, 2001, Vol. 17, Issue 1, pp. 7–11.
- Bonfatti B. R., Hartemink A. E., Giasson E., Tornquist C. G., Adhikari K., Digital mapping of soil carbon in a viticultural region of Southern Brazil, *Geoderma*, 2016, Vol. 261, pp. 204–221.
- Breiman L. Random Forests, *Machine Learning*, 2001, Vol. 45, No 1, pp. 5–32.
- Cambule A. H., Rossiter D. G., Stoorvogel J. J., Smaling E. M. A., Soil organic carbon stocks in the Limpopo National Park, Mozambique: amount, spatial distribution and uncertainty, *Geoderma*, 2014, Vol. 213, pp. 46–56.
- CEF Telecom project 2018-EU-IA-0095: “Geoharmonizer: EU-wide automated mapping system for harmonization of Open Data based on FOSS4G and Machine”, available at: URL: <https://ecodatacube.eu/> (February 25, 2023).
- Chen S., Martin M. P., Saby N. P. A., Walter C., Angers D. A., Arrouays D., Fine resolution map of top- and subsoil carbon sequestration potential in France, *Science of The Total Environment*, 2018, Vol. 630, pp. 389–400.
- Chernova O. V., Golozubov O. M., Aljabina I. O., Schepaschenko D. G., Kompleksnyj podhod k kartograficheskoj ocenke zapasov organicheskogo ugleroda v pochvah Rossii (Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in Russian Federation), *Eurasian Soil Science*, 2021, No 3, pp. 273–286.
- Chernova O. V., Ryzhova I. M., Podvezennaja M. A., Ocenka zapasov organicheskogo ugleroda lesnyh pochv v regional’nom masshtabe (Assessment of organic carbon stocks in forest soils on a regional scale), *Eurasian Soil Science*, 2020, No 3, pp. 340–350.
- Chernova O. V., Ryzhova I. M., Podvezennaja M. A., Opyt regional’noj ocenki izmenenij zapasov ugleroda v pochvah juzhnoj tajgi i lesostepi za istoricheskij period (An experience in regional estimates of changes in soil carbon pools of the southern taiga and forest-steppe during the historical period), *Eurasian Soil Science*, 2016, No 8, pp. 1013–1028.
- Chestnyh O. V., Zamolodchikov D. G., Zavisimost’ plotnosti pochvennyh gorizontov ot glubiny ih zaleganija i sodержanija gumusa (Bulk density of soil horizons as dependent on their humus content), *Eurasian Soil Science*, 2004, No 8, pp. 937–944.
- Chinilin A. V., Savin I. Ju., Krupnomasshtabnoe cifrovoe kartografirovanie soder-

- zhanija organicheskogo ugleroda pochv s pomoshh'ju metodov mashinnogo obuchenija (The large scale digital mapping of soil organic carbon using machine learning algorithms), *Bjulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva*, 2018, Vol. 91, pp. 46–62.
- Dobrovol'skij G. V., Urusevskaya I. S., Alyabina I. O., Karta pochvenno-geograficheskogo rajonirovaniya (Map of soil-geographical zoning), In: *Nacional'nyj atlas pochv Rossijskoj Federacii* (National Soil Atlas of Russia), Moscow, 2011, pp. 196–201.
- Duarte E., Zagal E., Barrera J., Dube F., Casco F., Hernandez A., Digital mapping of soil organic carbon stocks in the forest lands of Dominican Republic, *European journal of remote sensing*, 2022, Vol. 55, No 1, pp. 213–231.
- Ellili Y., Walter Ch., Michot D., Pichelin P., Lemercier B., Mapping soil organic carbon stock change by soil monitoring and digital soil mapping at the landscape scale, *Geoderma*, 2019, Vol. 351, pp. 1–8.
- Fantappie M., L'Abate G., Costantini E., The influence of climate change on the soil organic carbon content in Italy from 1961 to 2008, *Geomorphology*, 2011, Vol. 135, Issues 3–4, pp. 343–352.
- FAO and ITPS, Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report, 2018. Rome. 162 p.
- FAO, Standartnaja rabochaja metodika dlja organicheskogo ugleroda pochvy. Spektrofotometricheskii metod Tjurina (Standard operating procedure for soil organic carbon. The Tyurin spectrophotometric method), 2021, 26 p., available at: URL: <https://goo.su/cvVhzWh> (February 15, 2023).
- Fathizad H., Taghizadeh-Mehrjardi R., Hakimzadeh Ardakani M. A., Zeraatpisheh M. Heung B., Scholten T., Spatiotemporal Assessment of Soil Organic Carbon Change Using Machine-Learning in Arid Regions, *Agronomy*, 2022, Vol. 12, Issue 3, No 628.
- Florinskij I. V., Gipoteza Dokuchaeva kak osnova cifrovogo prognoznogo pochvennogo kartografirovaniya (k 125-letiju publikacii) (The Dokuchaev hypothesis as a basis for predictive digital soil mapping (on the 125th anniversary of its publication)), *Eurasian Soil Science*, 2012, No 4, pp. 500–506.
- Florinskij I. V., Illjustrirovannoe vvedenie v geomorfometriju (An illustrated introduction to geomorphometry), *Jelektronnoe nauchnoe izdanie Al'manah Prostranstvo i Vremja*, 2016, Vol. 11, No 1, pp. 1–20.
- Francaviglia R., Renzi G., Riviaccio R., Marchetti A., Piccini C., Spatial analysis and prediction of soil organic carbon in Friuli Venezia Giulia region (Northern Italy), *Geoinformatic and Geostatistic: An Overview*, 2014, Vol. 2, Issue 3, pp. 1–8.
- Gavrilyuk E. A., Kuznecova A. I., Gornov A. V., Geoprostranstvennoe modelirovanie sodержaniya i zapasov azota i ugleroda v lesnoj podstilke na osnove raznosezonnyh sputnikovyh izobrazhenij Sentinel (Geospatial Modeling of Nitrogen and Carbon Content and Stock in the Forest Soil Or-

- ganic Horizon Based on Sentinel-2 Multi-Seasonal Satellite Imagery), *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No 2, pp. 168–182.
- GlobalSoilMap.net, 2008, available at: URL: <https://www.isric.org/projects/globalsoilmapnet> (February 03, 2023).
- Gomes L., Faria R., de Souza E., Veloso G., Schaefer C., Fernandes Filho E., Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil, *Geoderma*, 2019, Vol. 340, pp. 337–350.
- Google Earth Engine, 2017, available at: URL: <https://earthengine.google.com/> (February 03, 2023).
- Gopp N. V., Uglerod v pochvah Kuznecko-Salairskoj geomorfologicheskoy provincii: baza dannyh, cifrovoe kartografirovanie, geoprostranstvennyj analiz (Carbon in the soils of the Kuznetsk-Salair geomorphological province: database, digital mapping, geospatial analysis), *Sbornik nauchnyh trudov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Evolyuciya pochv i razvitiye nauchnyh predstavlenij v pochvovedenii", posvyashchennoj 90-letiyu so dnya rozhdeniya L. M. Burlakovoj* (Sourcebook of the International scientific conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of L. M. Burlakova), Barnaul, 2022, pp. 55–58.
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 202, pp. 18–27.
- Gray J. M., Bishop T. F. A., Change in soil organic carbon stocks under 12 climate change projections over New South Wales, Australia, *Soil Science Society of America Journal*, 2016, Vol. 80, pp. 1296–1307.
- 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. Article: 106498.
- 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.
- Hartemink A., McBratney A. B., Mendonca L., *Digital soil mapping with limited data*. Montpellier: Springer-Verlag, 2008, pp. 3–181.
- Hateffard F., Dolati P., Heidari A., Zolfaghari A., Assessing the performance of decision tree and neural network models in mapping soil properties, *Journal of Mountain Science*, 2019, Vol. 16, Issue 8, pp. 1833–1847.
- Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E. A. G., Ping C.-L., Schirrmeyer L., Grosse G., Michaelson G. J., Koven C. D., O'Donnell J. A., Elberling B., Mishra U., Camill P., Yu Z., Palmtag J., Kuhry P., Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps, *Biogeoscience*, 2014, Vol. 11, pp. 6573–6593.
- Inisheva L. I., Sergeeva M. A., Smirnova O. N., Deponirovanie i emissiya ugleroda bolotami Zapadnoj Sibiri (Deposition and emission

- of carbon by Western Siberian Mires), *Nauchnyj dialog*, 2012, No 7, pp. 61–74.
- Jenny H., Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology, New York: McGraw Hill, 1941, 281 p.
- Jiang J., Zhu A.X., Qin C.Z., Zhu T., Liu J., Du F., Liu J., Zhang Y., An CyberSoLIM: A cyber platform for digital soil mapping, *Geoderma*, 2016, Vol. 263, pp. 234–243.
- Karta rastitel'nosti SSSR, Masshtab 1:4 000 000* (Vegetation map of the USSR, Scale 1:4 000 000), Moscow: GUGK, 1990.
- Kaya F., Keshavarzi A., Francaviglia R., Kaplan G., Basayigit L., Dedeoglu M., Assessing Machine Learning-Based Prediction under Different Agricultural Practices for Digital Mapping of Soil Organic Carbon and Available Phosphorus, *Agriculture*, 2022, Vol. 12, Issue 7, Article: 1062.
- Keskin H., Grunwald S., Harris W., Digital mapping of soil carbon fractions with machine learning, *Geoderma*, 2019, Vol. 339, pp. 40–58.
- Kim J., Grunwald S., Assessment of carbon stocks in the topsoil using Random Forest and remote sensing images, *Journal of Environmental Quality*, 2016, Vol. 45, pp. 1910–1918.
- Kogut B. M., Frid A. S., Sravnitel'naya ocenka metodov opredeleniya sodержaniya gumusа v pochvah (Comparative evaluation of methods for determining humus content in soils), *Eurasian Soil Science*, 1993, No 9, pp. 119–123.
- Kumar S., Lal R., Liu D., A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock, *Geoderma*, 2012, Vol. 189, pp. 627–634.
- Lagacherie P., McBratney A.B., Voltz M., Digital Soil Mapping. An Introductory Perspective, *Developments in Soil Science*, 2007, Vol. 31, pp. 3–22.
- Lo Seen D., Ramesh B. R., Nair K. M., Martin M., Arrouays D., Bourgeon G., Soil carbon stocks, deforestation and landcover changes in the Western Ghats biodiversity hotspot (India), *Global Change Biology*, 2010, Vol. 16, Issue 6, pp. 1777–1792.
- Martin M., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C., Boulonne L., Arrouays D., Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France, *Biogeosciences*, 2011, Vol. 8, Issue 5, pp. 1053–1065.
- McBratney A. B., Mendoca Santos M. L., Minasny B., On digital soil mapping, *Geoderma*, 2003, Vol. 117, Issues 1–2, pp. 3–52.
- Meersmans J., De Ridder F., Canters F., De Baets S., Van Molle M., A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium), *Geoderma*, 2008, Vol. 143, pp. 1–13.
- Meersmans J., Martin M., Lacarce E., De Baets S., Jolivet C., Boulonne L., Lehmann S., Saby N., Bispo A., Arrouays D., A high resolution map of French soil organic carbon, *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, Vol. 32, No 4, pp. 841–851.
- Meshalkina Yu. L., Vasenev I. I., Kuzyakova I. F., Romanenkov V. A., *Geoinformacionnye sistemy v pochvovedenii i ekologii. Interaktivnyj kurs* (Geoinformation systems in

- soil science and ecology. Interactive course), Moscow: RGAU-MSKHA, 2010, 95 p.
- Minasny B., Mcbratney A., Chapter 12 Latin Hypercube Sampling as a Tool for Digital Soil Mapping, *Developments in Soil Science*, 2006, Vol. 31, pp. 153–165.
- Mishra U., Lal R., Liu D., Van Meirvenne M., Predicting the spatial variation of the soil organic carbon pool at a regional scale, *Soil Science Society of America Journal*, 2010, Vol. 74, pp. 906–914.
- Mishra U., Lal R., Slater B., Calhoun F., Liu D. S., Van Meirvenne M., Predicting Soil Organic Carbon Stock Using Profile Depth Distribution Functions and Ordinary Kriging, *Soil Science Society of America Journal*, 2009, Vol. 73, Issue 2, pp. 614–621.
- Mulder V. L., Lacoste M., Richer-de-Forges A. C., Martin M. P., Arrouays D., National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France, *Geoderma*, 2016, Vol. 263, pp.16–34.
- Narykova A. N., Plotnikova A. S., Podgotovka prediktorov dlya modelirovaniya klimatoreguliruyushch ih ekosistemnyh uslug lesov na regional'nom urovne s pomoshch'yu Google Earth Engine (Preparation predictors for modeling climate-regulating forest ecosystem services at the regional level using Google Earth Engine), *Vserossijskaya nauchnaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 30-letiyu CEPL RAN "Nauchnye osnovy ustojchivogo upravleniya lesami"* (All-Russian scientific conference with international participation "Scientific foundations of sustainable forest management", dedicated to the 30th anniversary of the CEPL RAS), Moscow: CEPF RAS, 2022, pp. 182–194.
- Nussbaum M., Papritz A., Baltensweiler A., Walthert L., Estimating soil organic carbon stocks of Swiss forest soils by robust external-drift kriging, *Geoscientific Model Development Discussions*, 2014, Vol. 7, pp. 1197–1210.
- Olson D. M., Dinerstein E., Wikramanayake E. D., Burgess N. D., Powell G. V. N., Underwood E. C., D'Amico J. A., Itoua I., Strand H. E., Morrison J. C., Loucks C. J., Allnutt T. F., Ricketts T. H., Kura Y., Lamoreux J. F., Wettengel W. W., Hedao P., Kassem K. R., Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth, *Bioscience*, 2001, Vol. 51, Issue 11, pp. 933–938.
- Padarian J., Minasny B., McBratney A. Using deep learning to predict soil properties from regional spectral data, *Geoderma Regional*, 2019, Vol. 16. Article: e00198.
- Padarian J., Minasny B., McBratney A. B. Chile and the Chilean soil grid: a contribution to GlobalSoilMap, *Geoderma Regional*, 2017, Vol. 9, pp. 17–28.
- Pastuhov A. V., Kaverin D. A., Postroenie regional'nyh cifrovyyh tematicheskikh kart (na primere karty zapasov ugleroda v pochvah bassejna r. Usa) (Construction of regional digital thematic maps (on the example of a map of carbon stocks in soils of the Usa river basin)), *Eurasian Soil Science*, 2016, No 9, pp. 1042–1051.
- Pastuhov A. V., Kaverin D. A., Zapasy pochvennogo ugleroda v tundrovyyh i taezhnyh ekosistemah Severo-Vostochnoj Evropy

- (Soil carbon stocks in the tundra and taiga ecosystems of northeastern Europe), *Eurasian Soil Science*, 2013, No 9, pp. 1084–1094.
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay E. Scikitlearn: Machine learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 2011, Vol. 12, pp. 2825–2830.
- Piao S. L., Fang J., Ciais P., Peylin P., Huang Y., Sitch S., Wang T., The carbon balance of terrestrial ecosystems in China, *Nature*, 2009, Vol. 458, pp. 1009–1013.
- Pochvennaya karta RSFSR. Masshtab 1 : 2 500 000* (Soil map of the RSFSR, Scale 1 : 2 500 000, V. M. Friedland (ed.), Moscow: GUGUK, 1998 (Corrected digital version, 2007).
- Poggio L., de Sousa L., Batjes N., Heuvelink G., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D., Soil-Grids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty, *SOIL*, 2021, Vol. 7, Issue 1, pp. 217–240.
- Poggio L., Gimona A., National scale 3D modelling of soil organic carbon stocks with uncertainty propagation — An example from Scotland, *Geoderma*, 2014, Vol. 232–234, Issue 1, pp. 284–299.
- Rainford S., Martin-Lopez J. M., Da Silva M., Approximating Soil Organic Carbon Stock in the Eastern Plains of Colombia, *Frontiers in Environmental Science*, 2021, Vol. 9. Article: 685819.
- Rojas R., Adhikari K., Ventura S. J., Projecting soil organic carbon distribution in Central Chile under future climate scenarios, *Journal of Environmental Quality*, 2018, Vol. 47, pp. 735–745.
- Rossiter D. G., Assessing the thematic accuracy of area-class soil maps, Enschede, Holland: Soil Science Division, 2001, 46 p.
- Rukovodjashhie principy nacional'nyh inventarizacij parnikovyh gazov MGJeIK* (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 4: Sel'skoe hozjajstvo, lesnoe hozjajstvo i drugie vidy zemlepol'zovanija (Agriculture, forestry and other types of land use.), Japan, IGES, 2006, available at: URL: <https://goo.su/bZ5Vk5q> (February 15, 2023).
- Ryzhova I. M., Podvezennaja M. A., Zapasy gumusa v avtonomnyh pochvah prirodnyh jekosistem Vostochno-Evropejskoj ravniny i ih chuvstvitel'nost' k izmenenijam parametrov krugovorota ugleroda (Humus reserves in autonomous soils of native ecosystems in the East European plain and their sensitivity to changes in carbon cycle parameters), *Eurasian Soil Science*, 2003, No 9, pp. 1043–1049.
- Samsonova V. P., Meshalkina J. L., Kolichestvennyj metod sravnenija pochvennyh kart i kartogramm (Quantitative method of soil maps and cartograms comparison), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 1 Pochvovedenie*, 2011, No 3, pp. 3–5.

- Sanchez P. A., Ahamed S., Carré F., Hartemink A. E., Hempel J., Huising J., Lagacherie P., McBratney A. B., McKenzie N. J., Mendonça-Santos M. L., Minasny B., Montanarella L., Okoth P., Palm C. A., Sachs J. D., Shepher K. D., Vagen T.-G., Vanlauwe B., Walsh M. G., Winowiecki L. A., Zhang G.-L., Digital Soil Map of the World, *Science*, 2009, Vol. 325, No 5941, pp. 680–681.
- Schepaschenko D. G., Muhortova L. V., Shvidenko A. Z., Vedrova Je. F., Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvah Rossii (The Pool of Organic Carbon in the Soils of Russia), *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No 2, pp. 107–116.
- Shamrikova E. V., Kondratenok B. M., Tumanova E. A., Vanchikova E. V., Lapteva E. M., Zonova T. V., Lu-Lyan-Min E. I., Davydova A. P., Libohova Z., Suvannang N., Transferability between soil organic matter measurement methods for database harmonization, *Geoderma*, 2022, Vol. 412, Article: 115547.
- Shamrikova E. V., Vanchikova E. V., Kondratjonok B. M., Lapteva E. M., Kostrova S. N., Problemy i ogranichenija dihhromatometricheskogo metoda izmerenija sodержaniya pochvennogo organicheskogo veshhestva (obzor) (Approaches and methods for studying soil organic matter (review), *Eurasian Soil Science*, 2022, No 7. pp. 787–794.
- Sharyj P. A., Geomorfometrija v naukah o Zemle i jekologii, obzor metodov i prilozhenij (Geomorphometry in Earth sciences and ecology, an overview of methods and applications), *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2006, Vol. 8, No 2, pp. 458–473.
- Sharyj P. A., Sharaja L. S., Pastuhov A. V., Kaverin D. A., Prostranstvennoe raspredelenie organicheskogo ugleroda v pochvah Vostochno-Evropejskoj tundry i lesotundry v zavisimosti ot klimata i rel'efa (Spatial Distribution of Organic Carbon in Soils of Eastern European Tundra and Forest-Tundra Depending on Climate and Topography), *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2018, No 6, pp. 39–48.
- Shaw C. F., Potent factors in soil formation, *Ecology*, 1930, Vol. 11, No 2, pp. 239–245.
- Shepelev A. G., Geoinformacionnoe kartografirovanie pochvennogo ugleroda na primere (Geoinformation mapping of soil carbon on the example of Central Yakutia), *Vestnik nauki i obrazovanija*, 2022, No 9, pp. 38–44.
- Soil organic carbon mapping cookbook*, Rome: FAO, 2018, 205 p.
- SoilGrids — global gridded soil information, available at: URL: <https://www.isric.org/explore/soilgrid> (February 15, 2023).
- Somarathna P. D. S. N., Malone B. P., Minasny B., Mapping soil organic carbon content over New South Wales, Australia using local regression kriging, *Geoderma Regional*, 2016, Vol. 7, Issue 1, pp. 38–48.
- Suleymanov A., Abakumov E., Suleymanov R., Gabbasova I., Komissarov M., The Soil Nutrient Digital Mapping for Precision Agriculture Cases in the Trans-Ural Steppe

- Zone of Russia Using Topographic Attributes, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, Vol. 10, Issue 4, Article: 243.
- Szatmari G., Pasztor L., Heuvelink G. B. M., Estimating soil organic carbon stock change at multiple scales using machine learning and multivariate geostatistics, *Geoderma*, 2021, Vol. 403, Article: 115356.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Nabiollahi K., Kerry R., Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran, *Geoderma*, 2016, Vol. 266, pp. 98–110.
- The SoLIM Project, 2004, available at: URL: <https://goo.su/Bblpp> (February 03, 2023).
- Todd-Brown K. E. O., Randerson J. T., Post W. M., Hoffman F. M., Tarnocai C., Schuur E. A. G., Allison S. D., Causes of variation in soil carbon simulations from CMIP5 Earth system models and comparison with observations, *Biogeosciences*, 2013, Vol. 10, Issue 3, pp. 1717–1736.
- Vapnik V. N., *Statistical learning theory*, New York: John Wiley and Sons, 1998, 768 p.
- 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, Article: 145384.
- Viatkin K., Zalavskiy Yu., Bihun O., Lebed V., Sherstiuk O., Plisko I., Nakisko S., Sozдание nacional'noj karty zapasov organicheskogo ugleroda v pochvah Ukrainy s ispol'zovaniem cifrovyyh metodov pochvennogo kartografirovaniya (Creation of the Ukrainian National soil organic carbon stocks map using digital soil mapping methods), *Soil Science and Agrochemistry*, 2018, Vol. 2, pp. 5–17.
- Wadoux A. M. J. C., Walvoort D. J. J., Brus D. J., An integrated approach for the evaluation of quantitative soil maps through Taylor and solar diagrams, *Geoderma*, 2022, Vol. 405, Article: 115332.
- Walkley A., Black I. A., An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method, *Soil science*, 1934, Vol. 37, Issue 1, pp. 29–38.
- Wang B., Waters C., Orgill S., Gray J., Cowie A., Clark A., Liu D., 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.
- 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, Article: 143644.
- Wang S., Zhuang Q., Yang Z., Yu N., Jin X., Temporal and spatial changes of soil organic carbon stocks in the forest area of north-eastern China, *Forests*, 2019, Vol. 10, Issue 11, Article: 1023.
- Wiesmeier M., Barthold F., Blank B., Kögel-Knabner I., Digital mapping of soil organic matter stocks using Random Forest

- modeling in a semi-arid steppe ecosystem, *Plant Soil*, 2011, Vol. 340, pp. 7–24.
- Wiesmeier M., Barthold F., Sporlein P., Geuß U., Hangen E., Reischl A., Schilling B., Angst G., von Lutzow M., Kogel-Knabner I., Estimation of total organic carbon storage and its driving factors in soils of Bavaria (southeast Germany), *Geoderma Regional*, 2014, Vol. 1, pp. 67–78.
- Yang Y. H., Fang J. Y., Tang Y. H., Ji C. J., Zheng C. Y., He J. S., Zhu B. A., Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands, *Global Change Biology*, 2008, Vol. 14, pp. 1592–1599.
- Zaharov S. A., *Kurs pochvovedeniya* (Soil science course), M.-L.: Gosizdat, 1927, 440 p.
- Zhang Z., Zhang H., Xu E., Enhancing the digital mapping accuracy of farmland soil organic carbon in arid areas using agricultural land use history, *Journal of Cleaner Production*, 2022, Vol. 334, Article: 130232.
- Zhou T., Geng Y., Ji Ch., Xuc X., Wang H., Pan J., Bumberger J., Haase D., Lausch A., 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, Article: 142661.
- Zhou Y., Hartemink A.E., Shi Z., Liang Z., Lu Y., Land use and climate change effects on soil organic carbon in North and Northeast China, *Science of The Total Environment*, 2019, Vol. 647, pp. 1230–1238.
- Zhu X., Junxiu Li, Cheng H., Zheng L., Huang W., Yan Y., Liu H., Yang X., Assessing the impacts of ecological governance on carbon storage in an urban coal mining subsidence area, *Ecological Informatics*, 2022, Vol. 72, Article: 101901.

MAPPING OF SOIL ORGANIC CARBON CONTENT AND STOCK AT THE REGIONAL AND LOCAL LEVELS: THE ANALYSIS OF MODERN METHODOLOGICAL APPROACHES

N. V. Gopp¹, J. L. Meshalkina², A. N. Narykova³, A. S. Plotnikova³, O. V. Chernova⁴

¹ Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences pr. Akademika Lavrentieva 8/2, Novosibirsk, 630099, Russian Federation

² Lomonosov Moscow State University
Leninskie Gory 1 bldg. 12, Moscow, 119234, Russian Federation

³ Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russian Federation

⁴ A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution
Leninskii pr. 33, Moscow, 119071, Russian Federation

E-mail: gopp@issa-siberia.ru

Received 04.02.2023

Revised: 18.03.2023

Accepted: 20.03.2023

This paper provides an overview of scientific publications in Russia and other countries devoted to the soil organic carbon (SOC) content and stocks mapping at regional and local levels. The analysis showed that the cartographic assessment of the SOC content and stocks was conducted using various approaches that the choice depends on the multiple factors: the size of the territory (continental, national, regional, local levels); the cartographic basis availability (maps of soil types, of landscapes, of vegetation formations, remote sensing data, etc.) and laboratory and field surveys data. Two main approaches were generally used for SOC content and stocks mapping: (1) based on available thematic maps; (2) digital soil mapping. The review also provides the analysis of all spatial predictors that were used in collected papers in concordance with the SCORPAN model widely used in digital soil mapping. Spatial terrain data was one of the most commonly used predictors, followed by the vegetation and climate variables. The accuracy of predictive maps significantly increased by using soil maps. The reviewed studies showed that climate variables had a significant impact on the spatial variation of the SOC content and stocks at the regional level, while at the local level the influence of climatic variables was less significant. The analysis showed that the most common methods used in digital mapping were machine learning algorithms. Random Forest method often showed the best results. Results were cross-validated almost in all studies. Tests of the map's accuracy using an external independent validation dataset were rare, although this was the most important stage of digital soil mapping. R was the most popular software, that was used for modeling the SOC content and stocks. SAGA GIS, QGIS, ArcGIS, and cloud platform Google Earth Engine (GEE) were most commonly used to prepare predictors.

Key words: *digital soil mapping, soil predictors, machine learning, Random Forest, Regression Kriging, Support Vector Machine, cross-validation, bootstrap, Gradient Boosting, monitoring*

Рецензент: д. б. н. Щепашенко Д. Г.

Приложение А

Современные методические подходы к картографированию содержания/запасов ПОУ на региональном и локальном уровнях

Природная зона (Olson et al., 2001), рис. 6	Территория исследования	Типы землепользования / растительности	Пространственное разрешение / масштаб	Содержание/запасы ОУ/ Как полуплотность (d/dv/ ПТФ)	Почвенный горизонт и/или глубина	Обучающая выборка/ размер БД (число точек наблюдений)	Почвенная карта / Предикторы на основе модели SCORPAN	Использованные методы	Валидация карты / Оценки точности модели	Программное обеспечение	Ссылка на публикацию
Подход I — Картографирование на основе почвенных карт											
6, 11	Россия, республика Коми	Все типы растительности	1 : 25 000 30 м	ЗПОУ	0–2 м	200	БД WRB, 2006; Landsat ETM+ и QuickBird; Топографические и карты четвертичных отложений	Метод автоматической управляемой классификации (Supervised Classification). Нахождение среднего арифметического значения	Валидация по литературным данным	ERDAS Imagine и ArcGIS	Пастухов, Каверин, 2013
4, 8	Россия, Московская, Ростовская и Белгородская области	Земли с/х использования 3-х областей (МО, РО и БО)	1 : 300 000	ЗПОУ dv, ПТФ	0–30 см	ПГБД РФ 2000	Почвенная карта РСФСР (1 : 2 500 000); Почвенная карта Крыма (1 : 2 500 000); среднemasштабные почвенные карты МО, БО, РО; ПГБД РФ	1. Расчет ЗПОУ на основании данных государственных Центров агрохимической службы (содержание гумуса в почвах и плотность почв) 2. Наложение на мелкомасштабные раскрасочные карты ЗПОУ в почвах областей	Не проводилась	ArcGIS	Чернова и др., 2021

Природная зона (Olson et al., 2001), рис. 6	Территория исследования	Типы землепользования / растительности	Пространственное разрешение / масштаб	Содержание / запасы ОУ / Как полена плотность (d/dv/ ПТФ)	Почвенный горизонт и/или глубина	Обучающая выборка / размер БД (число точек наблюдений)	Почвенная карта / Предикторы на основе модели SCORPAN	Использованные методы	Валидация карты / Оценки точности модели	Программное обеспечение	Ссылка на публикацию
11	Россия, Республика Коми	Все типы землепользования	30 м	ЗПОУ	0–2.5 м	152	ЦМР SRGM; топографическая карта (1 : 100 000); почвенная карта (1 : 25 000); карта растительности на основе Landsat-7; почвенная карта ключевых участков	Создание карты растительности по данным Landsat-7, выявление связей между типами растительности и почвами с учетом ландшафтных факторов и ЦМР, составление почвенной карты. Составление тематической карты ЗПОУ; добавление БД почвенных профилей к каждой группе почв с вычисленными средними значениями углерода	Оценка точности управляемой классификации на основе матрицы совпадений и коэффициента Каппа-статистики	Классификация снимков в ERDAS Imagine, ArcGIS	Пастухов и др., 2016
6, 11	Россия, Центральная Якутия	Все типы землепользования	Ландшафтный комплекс	ЗПОУ	0–0.2 м; 0–1 м; 0–2 м; 0–3 м; 0–4 м	NCSCD	–	Лабораторный анализ запасов углерода и многокомпонентный анализ на основе ГИС	R ² , стандартное отклонение, IQR	QGIS	Шепелев, 2022
Подход II – Цифровое почвенное картографирование											
РОССИЯ											
4, 8	Россия, Воронежская область	Тестовые участки на с/х землях (СХП)	30 м, 10 м	СПОУ	Пахотный горизонт почв	22	O, R 19 предикторов	RF, XGBoost, BART	Метод перекрестной проверки R ² , MAE, RMSE	Обработка спутниковых данных: QGIS. Подготовка предикторов: Saga GIS	Чинилин, Савин, 2018

Природная зона (Olson et al., 2001), рис. 6	Территория исследования	Типы землепользования / растительности	Процентное разделение / масштаб	Содержание/запасы ОУ/ Как получена плотность (d/dv/ ПТФ)	Почвенный горизонт и/или глубина	Обучающая выборка/ размер БД (число точек наблюдений)	Почвенная карта / Предикторы на основе модели SCORPAN	Использованные методы	Валидация карты / Оценки точности модели	Программное обеспечение	Ссылка на публикацию
4	Россия, Брянская область, ЗП «Брянский лес»	Все типы растительности	10 м	СПОУ, ЗПОУ	Лесная подстилка (подгруппы L, FH)	33	O, R, N 14 предикторов	RF Информативность переменных: MDA	R ² , RMSE	Подготовка предикторов: Saga GIS Моделирование: R, пакеты «caret», «ranger»	Гаврилюк и др., 2021
11	Россия, Республика Коми	Естественные ландшафты	300 м	СПОУ, ЗПОУ dv, ПТФ		150	S, C, R 5 предикторов	Нелинейная множественная регрессия	Гистограмма стандартного отклонения	Аналитическая ГИС Эко, версия 1.08г.	Шарый и др., 2018
8, 4	Россия, Республика Башкортостан	Антропогенно образованные угодья	30 м	СПОУ	0–10 см	76	R 17 предикторов	MLR, SVM	R ² , RMSE	R	Suleymanov et al., 2021
8	Россия, Новосибирская область	Естественные и антропогенно образованные угодья	30 м	СПОУ	0–30 см	263	R 1 предиктор	OK, RK	R ² , RMSE	Surfer, SAGA GIS	Гопп, 2022
ЕВРОПА											
Европа: 4, 5, 6, 8, 12	Европа, Австралия: Новый Южный Уэльс и Северная Виктория	Европа: все типы землепользования Австралия: с/х угодья	-	СПОУ	Европа: 0–30 см Австралия: 0–1 м	Европа: набор данных LUCAS — 19 036 Австралия: 72	S	CNN, PLS, Cubist	Данные LUCAS: 50% — обучение, 25% — валидация, 25% — тестирование. Данные на Австралию: 75% — обучение, 25% — валидация RMSE, R ² , ME	CNN: Python v3.6.2, Keras v2.1.2 и Tensorflow v1.4.1 Cubist и PLS: R v3.3.1, пакеты Cubist v0.2.1 и pls v2.6-0	Radari-an et al., 2019
Австралия: 4, 8, 12, 13											

Природная зона (Olson et al., 2001), рис. 6	Территория исследования	Типы землепользования / растительности	Пространственное разрешение / масштаб	Содержание / запасы ОУ / Как полена плотность (d/dv/ ПТФ)	Почвенный горизонт и/или глубина	Обучающая выборка / размер БД (число точек наблюдений)	Почвенная карта / Предикторы на основе модели SCORPAN	Использованные методы	Валидация карты / Оценки точности модели	Программное обеспечение	Ссылка на публикацию
4, 12	Франция	Естественные и антропогенно преобразованные уголья	50 м	ЗПОУ dv изменена	0–45 см: 0–7.5 см, 7.5–15 см, 15–30 см, и 30–45 см	64	O, R, P 17 предикторов	MLR, RK, RF	Оценка неопределенности в каждой точке, R ² , RMSE	R	Elli et al., 2019
4, 12	Франция	3 модели: 1. лесные экосистемы; 2. возделываемые земли, 3. все типы землепользования	12 км	ЗПОУ dv изменена	0–30 см	RMQS 2158	S, C, O	BRT	К-кратная перекрестная валидация MPE, SDPE, RMSPE, R ²	R, пакет «gbm»	Martin et al., 2011
4, 12	Франция	Все типы землепользования Построены две модели	250 м	СПОУ	0–30 см	RMQS 2158	S, C, O	MLR, AIC, AICc	RMSE	Картографирование в ArcGIS 9.3. Валидация модели в R v2.9.0	Meermans et al., 2012
4	Венгрия	Все типы землепользования Построены две модели: 1992, 2010 гг.	100 м	ЗПОУ dv изменена в 1992 г.	0–30 см	SIMS 1236	S, C, O, R, P 26 предикторов	RF soRK LMC	10-кратная перекрестная валидация ME, RMSE, LCCC	-	Szattmari et al., 2021
4, 12, 5	Италия	Все типы землепользования	100 м	СПОУ	0–50 см	17 817	S, C, O, R, P	MLRA RK	R ² , RMSE, t-test	R	Fantappiè et al., 2011
4, 12, 5	Италия, С-В часть	Все типы землепользования	30 м	СПОУ	0–20 см	258	O, R, P 10 предикторов	RK	ME, RMSE, RMNSE	R, ArcGis	Francaviglia et al., 2014

Природная зона (Olson et al., 2001), рис. 6	Территория исследования	Типы землепользования / растительности	Пространственное разрешение / масштаб	Содержание/запасы ОУ/ Как полупочена плотность (d/dv/ ППФ)	Почвенный горизонт и/или глубина	Обучающая выборка/ размер БД (число точек наблюдений)	Почвенная карта / Предикторы на основе модели SCORPAN	Использованные методы	Валидация карты / Оценки точности модели	Программное обеспечение	Ссылка на публикацию
АЗИЯ											
13, 10, 4, 5, 9, 3	Китай	Все типы землепользования	90 м	ЗПОУ	0–20 см	1980-е: 8897 2010-е: 4534	С, О, R	BRT 2 модели для: 1980-х гг. 2010-х гг.	Из выборки: 80% — обучение, 20% — валидация ME, RMSE, R ² , LCCC	Подготовка предикторов: ArcGIS 10, Saga GIS Моделирование: R, пакет «gbm»	Wang et al., 2021
13	Китай , провинция Цитай	С/х земли аридных ландшафтов (пшеница и кукуруза)	30 м	СПОУ	0–20 см	115	С, О, R 11 предикторов	RF	Из выборки: 70% — обучение, 30% — валидация R ² RMSE	Подготовка предикторов: ArcGIS; Моделирование: R, пакет «Random Forest» Расчет статистики: SPSS Statistics	Zhang et al., 2022
4	Китай , провинция Ляонин	Лесные экосистемы	90 м	ЗПОУ ППФ для 1990 г.	0–30 см	1990 г.: 367 2015 г.: 549	С, О, R 9 предикторов	BRT	R ² , MAE, RSME, LCCC	Подготовка предикторов: ArcGIS, Saga GIS, ENVI Моделирование: R, пакет «dismo»	Wang et al., 2019
4	Китай , городской округ Хуайбэй в провинции Аньхой	Все типы землепользования	30 м	ЗПОУ по опубликованным данным	в целом в ландшафте (т/га)	-	С, О, R 12 предикторов	СА, цепи Маркова	-	-	XiaoJun Zhu et al., 2022

Природная зона (Olson et al., 2001), рис. 6	Территория исследования	Типы землепользования / растительности	Пространственное разрешение / масштаб	Содержание / запасы ОУ / Как получена плотность (d/dv/ ПТФ)	Почвенный горизонт и/или глубина	Обучающая выборка/ размер БД (число точек наблюдений)	Почвенная карта / Предикторы на основе модели SCORPAN	Использованные методы	Валидация карты / Оценки точности модели	Программное обеспечение	Ссылка на публикацию
1	Китай, остров Хайнань	Все типы землепользования	90 м	СПОУ	0–20 см	2511	C, O, R, P, N 21 предиктор	RFRK, SLR, RF	Из выборки: 70% — обучение, 30% — валидация ME, MAE, RMSE, R ²	–	Guo et al., 2015
13	Иран	Все типы землепользования	30 м	СПОУ	0–20 см	201	O 37 предикторов	RF, SVR, ANN	R ² , RMSE	R	Fathiazad et al., 2022
13	Иран, С-В часть	Все типы землепользования	30 м	СПОУ	0–20 см	288	S, C, O, R, P 30 предикторов	RF, Cubist, RK	NRMSE	R	Kaya et al., 2022
13	Иран, провинция Альборз	Все типы землепользования	30 м	СПОУ	0–30 см	362	S, O, R	ANN, DT (CART)	Из выборки: 70% — обучение, 15% — тестирование, 15% — валидация R ² , RMSE, коэфф. корреляции Пирсона	Подготовка предикторов: ERDAS IMAGINE, SAGA, ArcGIS 9.3 Моделирование: ANN, DT (CART)	Hatefard et al., 2019
13	Иран, провинция Курдистан	Все типы землепользования	30 м	ЗПОУ	0–1 м; 0–15 см и 15–30 см; 30–60 см и 60–100 см	188	O, R 18 предикторов	ANN, SVR, RF, метод к-средних	5-кратная перекрестная валидация RMSE, LCCC	–	Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016

Природная зона (Olson et al., 2001), рис. 6	Территория исследования	Типы землепользования / растительности	Пространственное разрешение / масштаб	Содержание/запасы ОУ/ Как получена плотность (d/dv/ ПТФ)	Почвенный горизонт и/или глубина	Обучающая выборка/ размер БД (число точек наблюдений)	Почвенная карта / Предикторы на основе модели SCORPAN	Использованные методы	Валидация карты / Оценки точности модели	Программное обеспечение	Ссылка на публикацию
СЕВЕРНАЯ АМЕРИКА											
4	США, штат Пенсильвания	Все типы землепользования	30 м	ЗПОУ dv, ПТФ из NCSS	0–100 см	878	O, R 12 предикторов	GWRK, RK	Из выборки: 80% — обучение, 20% — валидация MEE, MAEE, RMSE	Анализ предикторов: GWR software, Регрессионный анализ: SAS, Подготовка предикторов: Surfer 9	Kumar et al., 2012
4	США, штат Висконсин	Лесные экосистемы; с/х; пастбища и прерии; водноболотные угодья	90 м	ЗПОУ dv, ПТФ из NCSS и RaCA	0–30 см	280	S, C, O, R, P	Cubist	Из выборки: 75% — обучение; 25% — валидация R ² , RMSE, ME	-	Adhikari et al., 2019
5, 9	США, штат Флорида	Естественные угодья	10 м 30 м 250 м 2000 м	ЗПОУ d определена в лабораторных условиях	0–10 см 10–20 см	108	O, R, P 62 предиктора	RF	R ² , RMSE Leave-one-out cross-validation	R	Kim, Grunwald, 2016
5, 9	США, штат Флорида	Все типы землепользования	30 м	ЗПОУ dv изменена	0–20 см	SSURGO 1014	S, C, O, R, P 53 предиктора	Выбор предикторов: Boruta Моделирование: MLR, CART, RF, SVM, BoRT, BaRT, OK, RK	Из выборки: 70% — обучение; 30% — валидация R ² , RMSD, RPD, RPIQ	R 3.2.0, пакеты «gpart», «ipred», «gbm», «gstat», «randomForest», «kernlab», «pls»	Keskin et al., 2019

Природная зона (Olson et al., 2001), рис. 6	Территория исследования	Типы землепользования / растительности	Пространственное разрешение / масштаб	Содержание / запасы ОУ / Как полужена плотность (d/dv / ПТФ)	Почвенный горизонт и/или глубина	Общая выборка / размер БД (число точек наблюдений)	Почвенная карта / Предикторы на основе модели SCORPAN	Использованные методы	Валидация карты / Оценки точности модели	Программное обеспечение	Ссылка на публикацию
1, 2, 3	Доминиканская Республика	Лесные экосистемы	30 м	ЗПОУ	0–15 см	268	Модель А: С, О, R Модель В: С, R Модель С: O 20 предикторов	RF	Из выборки: 70% — обучение, 30% — валидация. R ² , LCCC, RMSE, MAPE, MAD	GEE	Duarte et al., 2022
ЮЖНАЯ АМЕРИКА											
1, 2, 7, 9, 13, 14	Бразилия	Все типы землепользования	1 км	ЗПОУ 10% — dv из мерена, 90% — ПТФ	0–1 м	8227	С, О, R, P 74 предиктора	Выбор предикторов: RFE Моделирование: RF, Cubist, SVM, GLM	Из выборки: 80% — обучение, 20% — валидация R ² , RMSE, MAE	Подготовка предикторов: RSAGA Моделирование: R, пакет «Caret»	Gomes et al., 2019
1, 2, 7	Колумбия	Все типы землепользования	90 м	ЗПОУ dv из ISRIC	0–30 см	653	С, О, R, P 9 предикторов	RF	R ² , RMSE	R Подготовка предикторов: SAGA GIS, ArcGIS	Rainford et al., 2021
АФРИКА											
1, 10, 12, 13, 14	ЮАР	Все типы землепользования	30 м	ЗПОУ dv из мерена / БД betaSoil Grids 2019	0–20 см 0–30 см	5834	С, О, R 40 предикторов	RF	Из выборки: 70% — обучение, 30% — валидация R ² , RMSE, MAE	GEE	Venter et al., 2021

Природная зона (Olson et al., 2001), рис. 6	Территория исследования	Типы землепользования / растительности	Пространственное разрешение / масштаб	Содержание / запасы ОУ / Как получена плотность (d/dv / ПТФ)	Почвенный горизонт и/или глубина	Обучающая выборка / размер БД (число точек наблюдений)	Почвенная карта / Предикторы на основе модели SCORPAN	Использованные методы	Валидация карты / Оценки точности модели	Программное обеспечение	Ссылка на публикацию
АВСТРАЛИЯ											
4, 8, 12, 13	Австралия, Новый Южный Уэльс	Все типы землепользования	100 м	СПОУ	0–5 см, 5–15 см, 15–30 см, 30–60 см, 60–100 см	5386	С, О, R, 8 предикторов	MLR, Cubist, SVM	Из выборки: 70% — обучение, 30% — валидация R ² , RMSE, CCC	–	Somathath et al., 2016
7	Австралия, штат Новый Южный Уэльс	Кустарниковые заросли, редколесья, пастбища	30 м	СПОУ dv из мерена	0–5 см, 0–30 см	705	С, С, О, R, P 12 предикторов	RF, BRT, SVM	R ² , LCCC, RMSE, MAE	R, пакеты: «Random Forest» «gbm», «e1071»	Wang et al., 2018

Приложение Б

Используемые при цифровом картографировании содержания/запасов ПОУ предикторы

Группы предикторов (Модель SCORPAN)	Исследование
S — ПОЧВА	
Почвенная карта/классификационная единица почв	Martin et al., 2011; Chen et al., 2018; Fantappiè et al., 2011; Zhang et al., 2022; Szatmari et al., 2021; Keskin et al., 2019; Gomes et al., 2019; Шарый и др., 2018
Необработанные спектральные данные (VNIR) образцов почв в виде спектрограммы	Padarian et al., 2019
Содержание ила	Zhang et al., 2022; Francaviglia et al., 2014; Kaya et al., 2022
Содержание песка	Zhang et al., 2022; Kaya et al., 2022
Концентрации радиоэлементов калия/урана/тория / гамма съемка	Wang et al., 2018; Somaratha et al., 2016; Ellili et al., 2019
Класс дренажа почвы	Keskin et al., 2019
Влагоудерживающая способность почвы (AWC - Available Water Capacity)	Keskin et al., 2019
Температура почвы	Fantappiè et al., 2011
Индекс засушливости почвы/ Индекс сухости почв/ Степень увлажненности почвы	Fantappiè et al., 2011; Keskin et al., 2019
Набор данных LUCAS (почвенная БД)	Padarian et al., 2019
Водный режим почв	Martin et al., 2011
Индекс солености (Salinity Index)	Hateffard et al., 2019; Fathizad et al., 2022; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016
Кислотность почв	Kaya et al., 2022
C — КЛИМАТ	
Осадки	
Среднегодовое количество осадков (MAP — Mean Annual Precipitation)	Adhikari et al., 2019; Chen et al., 2018; Fantappiè et al., 2011; Somaratha et al., 2015; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2022; Wang et al., 2018; Venter et al., 2021; Duarte et al., 2022; Kumar et al., 2012; Szatmari et al., 2021; Wang et al., 2019; Gomes et al., 2019; Gu et al., 2022; Kaya et al., 2022
Среднемесячное количество осадков	Martin et al., 2011; Keskin et al., 2019; Rainford et al., 2021; Guo et al., 2015
Суммарное годовое количество осадков	Meersmans et al., 2012; Kaya et al., 2022; Xiaojun Zhu et al., 2022
Сумма осадков самого холодного/теплого/сухого/влажного квартала	Venter et al., 2021
Сумма осадков самого холодного/теплого/сухого/влажного месяца	Venter et al., 2021; Gomes et al., 2019; Шарый и др., 2018
Сезонность осадков	Venter et al., 2021; Kaya et al., 2022
Индекс эффективности осадков	Rainford et al., 2021

Группы предикторов (Модель SCORPAN)	Исследование
Температура / влажность воздуха / солнечная радиация / ветер	
Среднегодовая температура (MAT — Mean Annual Temperature)	Martin et al., 2011; Somaratha et al., 2016; Meersmans et al., 2012; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2022; Wang et al., 2018; Venter et al., 2021; Duarte et al., 2022; Kumar et al., 2012; Szatmari et al., 2021; Wang et al., 2019; Gu et al., 2022
Среднегодовая минимальная температура	Adhikari et al., 2019; Fantappiè et al., 2011
Годовой/сезонный/суточный диапазон температур	Venter et al., 2021
Температура самого влажного/сухого квартала	Venter et al., 2021
Максимальная/минимальная/средняя температура по месяцам	Keskin et al., 2019; Gomes et al., 2019; Rainford et al., 2021; Guo et al., 2015
Сумма среднемесячной температуры (SAMT — Sum of monthly mean temperature)	Gomes et al., 2019
Потенциальное / Среднегодовое суммарное испарение	Martin et al., 2011; Somaratha et al., 2016; Szatmari et al., 2021
Относительная влажность воздуха	Duarte et al., 2022
Солнечная радиация	Francaviglia et al., 2014; Kaya et al., 2022
Воздействие ветра (Windward effect)	Adhikari et al., 2019
О — ОРГАНИЗМЫ, РАСТИТЕЛЬНОСТЬ, ФАУНА, ЧЕЛОВЕК	
Тип растительности (Land Cover) / БД CORINE Land Cover / сезонно активная растительность / данные о сезонном фракционном покрытии на основе Landsat (Seasonal fractional cover data) / Фракционный древесный покров (Fractional woody cover)	Keskin et al., 2019; Wang et al., 2018; Venter et al., 2021; Szatmari et al., 2021; Keskin et al., 2019; Ellii et al., 2019, Xiaojun Zhu et al., 2022
NPP	Chen et al., 2018; Martin et al., 2011; Venter et al., 2021
GPP	Gomes et al., 2019
NDVI / NDVI green	Martin et al., 2011; Somaratha et al., 2016; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2022; Venter et al., 2021; Duarte et al., 2022; Kumar et al., 2012; Wang et al., 2019; Keskin et al., 2019; Gomes et al., 2019; Hateffard et al., 2019; Francaviglia et al., 2014; Kaya et al., 2022; Kaya et al., 2022; Fathizad et al., 2022; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Guo et al., 2015; Чинилин, Савин, 2018
EVI	Duarte et al., 2022; Keskin et al., 2019; Kim, Grunwald, 2016; Чинилин, Савин, 2018
NDWI (green-NIR)/(green+NIR)	Xiaojun Zhu et al., 2022
LAI	Venter et al., 2021
SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)	Duarte et al., 2022; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Чинилин, Савин, 2018
BSI (Bare Soil Index) / Частота открытых поверхностей (Bare surface frequency)	Duarte et al., 2022; Venter et al., 2021

Группы предикторов (Модель SCORPAN)	Исследование
Индекс насыщения (Saturation index)	Kaya et al., 2022
Индекс зернистости (Grain Size Index)	Francaviglia et al., 2014; Kaya et al., 2022
RVI (Ratio vegetation index)	Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016
Разносезонные мультиспектральные изображения Sentinel-2	Гаврилюк и др., 2021
Спутниковые данные Landsat / многолетние сезонные данные о наземном покрове на основе Landsat (AusCover)	Wang et al., 2018; Hateffard et al., 2019; Xiaojun Zhu et al., 2022; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016
Доля фотосинтетически активной радиации (fraction of photosynthetically active radiation)	Venter et al., 2021
Отражение в синем/красном/зеленом/ближнем ИК диапазоне	Venter et al., 2021; Duarte et al., 2022; Чинилин, Савин, 2018; Wang et al., 2019; Kim, Grunwald, 2016; Kaya et al., 2022; Fathizad et al., 2022; Xiaojun Zhu et al., 2022; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016
Отражение в коротковолновом инфракрасном диапазоне 1/2 (SWIR 1/2)	Venter et al., 2021; Duarte et al., 2022; Fathizad et al., 2022; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016
Отражение в дальнем инфракрасном диапазоне (TIRS)	Kaya et al., 2022
Землепользование	
Данные/карты землепользования	Fantappiè et al., 2011; Kumar et al., 2012; Rainford et al., 2021; Xiaojun Zhu et al., 2022
Данные LULC из БД NLCD	Adhikari et al., 2019; Meersmans et al., 2012; Mishra et al., 2010; Mulder et al., 2016; Keskin et al., 2019
TERUTI (Utilisation du Territoire)	Martin et al., 2011
Данные о внесении навоза	Meersmans et al., 2012
Сценарии землепользования: Источник мелиорации (Reclamation source) / Севооборот, доля трав в севообороте (Cultivation year)	Zhang et al., 2022; Ellili et al., 2019
Пастбищная нагрузка (Livestock density)	Venter et al., 2021
Частота возникновения пожаров	Venter et al., 2021
Индекс плотности застройки (Index-Based built-up Index)	Duarte et al., 2022
R — РЕЛЬЕФ	
Высота над уровнем моря (Elevation)	Adhikari et al., 2019; Chen et al., 2018; Fantappiè et al., 2011; Гаврилюк и др., 2021; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2022; Wang et al., 2018; Venter et al., 2021; Duarte et al., 2022; Kumar et al., 2012; Szatmari et al., 2021; Wang et al., 2019; Keskin et al., 2019; Gomes et al., 2019; Hateffard et al., 2019; Gu et al., 2022; Ellili, 2019 (разрешение 50 м); Suleymanov et al., 2021; Гопп, 2022; Francaviglia et al., 2014; Шарый и др., 2018; Kim, Grunwald, 2016; Kaya et al., 2022; Ellii et al., 2019; Xiaojun Zhu et al., 2022; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Guo et al., 2015

Группы предикторов (Модель SCORPAN)	Исследование
Нормализованная высота (Normalized height) / Стандартизированная высота (Standardized height)	Adhikari et al., 2019; Gomes et al., 2019
Экспозиция (Aspect)	Чинилин, Савин, 2018; Wang et al., 2021; Venter et al., 2021; Duarte et al., 2022; Gomes et al., 2019; Hateffard et al., 2019; Suleymanov et al., 2021; Francaviglia et al., 2014; Xiaojun Zhu et al., 2022; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Guo et al., 2015
Уклон (Slope / Slope height / Mid-slope position / Slope-length factor/ local hillslope gradient/ MaxdownSlope)	Adhikari et al., 2019; Chen et al., 2018; Fantappiè et al., 2011; Чинилин, Савин, 2018; Гаврилюк и др., 2021; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2022; Venter et al., 2021; Duarte et al., 2022; Kumar et al., 2012; Szatmari et al., 2021; Somaratha et al., 2016; Wang et al., 2019; Keskin et al., 2019; Gomes et al., 2019; Hateffard et al., 2019; Gu et al., 2022; Suleymanov et al., 2021; Ellii et al., 2019; Xiaojun Zhu et al., 2022; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Guo et al., 2015
Кривизна вертикальная/горизонтальная и др. (Curvature flow line/ profile/ maximal/ minimal/ plan/total)	Чинилин, Савин, 2018; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2022; Szatmari et al., 2021; Gomes et al., 2019; Hateffard et al., 2019; Francaviglia et al., 2014; Шарый и др., 2018; Kaya et al., 2022; Ellii et al., 2019; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Guo et al., 2015
Ротор (Rotor)	Шарый и др., 2018
Формы рельефа (классификация геоморфонов)	Rainford et al., 2021
Карта холмов (Hill)	Gomes et al., 2019
Выпуклость/Текстура поверхности (Terrain surface convexity / Terrain surface texture)	Gomes et al., 2019
Индекс влажности (SAGA wetness index)	Adhikari et al., 2019; Szatmari et al., 2021
Скорость эрозии	Chen et al., 2018
Отмывка рельефа (Hillshade)	Kumar et al., 2012; Suleymanov et al., 2021
Потенциал почвенного стока	Keskin et al., 2019
Топографический индекс влажности (TWI — Topographic Wetness Index/ Modified topographic wetness index)	Chen et al., 2018; Чинилин, Савин, 2018; Somaratha et al., 2016; Adhikari et al., 2019; Wang et al., 2021; Duarte et al., 2022; Szatmari et al., 2021; Wang et al., 2019; Hateffard et al., 2019; Francaviglia et al., 2014; Шарый и др., 2018; Kaya et al., 2022; Rainford et al., 2021; Suleymanov et al., 2021; Ellii et al., 2019; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Guo et al., 2015
Индекс топографического разнообразия / положения (Topographic diversity / Position index / Relative Position index)	Venter et al., 2021; Szatmari et al., 2021; Guo et al., 2015
Индекс расчлененности рельефа (Terrain ruggedness index)	Adhikari et al., 2019; Szatmari et al., 2021
Индекс непрерывной тепловой нагрузки от солнечного излучения (Continuous heat insolation load index)	Venter et al., 2021

Группы предикторов (Модель SCORPAN)	Исследование
Водосбор	
Площадь / Удельная площадь водосбора (Specific catchment area) /MCA — Modified catchment area	Adhikari et al., 2019; Чинили, Савин, 2018; Wang et al., 2021; Szatmari et al., 2021; Hateffard et al., 2019; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016
Уклон водосбора (Catchment Slope)	Adhikari et al., 2019; Hateffard et al., 2019
Индекс плоскостности вершины гребня/дна долины (MrRTF — Multiresolution ridge top / MrVBF — valley bottom flatness index)	Szatmari et al., 2021; Somaratha et al., 2016; Hateffard et al., 2019; Suleymanov et al., 2021; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016
Базовый уровень сети каналов (Channel network base level)	Adhikari et al., 2019; Hateffard et al., 2019
Расстояние по вертикали до сети каналов (Vertical distance to channel network) / Расстояние до водосбора	Szatmari et al., 2021; Kim, Grunwald, 2016
Высота над сетью каналов (Altitude above channel network)	Adhikari et al., 2019
Индекс баланса массы (Mass-balance index)	Adhikari et al., 2019; Szatmari et al., 2021
Глубина долин (Valley depth)	Adhikari et al., 2019; Gomes et al., 2019
Индекс мощности потока (Stream power index)	Szatmari et al., 2021; Hateffard et al., 2019; Kaya et al., 2022; Guo et al., 2015
P — МАТЕРИНСКАЯ ПОРОДА, ЛИТОЛОГИЯ	
Карта почвообразующих пород / геологическая карта	Adhikari et al., 2019; Chen et al., 2018; Szatmari et al., 2021; Keskin et al., 2019; Gomes et al., 2019; Rainford et al., 2021; Ellii et al., 2019; Guo et al., 2015
Концентрация калия	Kim, Grunwald, 2016
Сила тяжести Буге	Kim, Grunwald, 2016
Изостатическая остаточная гравитационная аномалия / Магнитная аномалия	Kim, Grunwald, 2016
Минералогический состав: содержание глины, иллита, смектита или каолинита; отношение смектита к каолиниту; индекс кремнезема, карбонатный индекс, глинистый индекс	Zhang et al., 2022; Wang et al., 2018; Hateffard et al., 2019; Francaviglia et al., 2014; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016
Индекс выветривания (Weathering index)	Wang et al., 2018
Максимальная и минимальная глубина залегания грунтовых вод	Meersmans et al., 2008
N — ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОЛОЖЕНИЕ	
Географические координаты (Широта/Долгота)	Fantappiè et al., 2011; Гаврилюк и др., 2021

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ:

ГИС — геоинформационная система

ЦМР — цифровая модель рельефа

ДЗЗ — дистанционное зондирование Земли

МВ — морфометрические величины

МГЭИК — Межправительственная группа экспертов по изменению климата

ПОУ — почвенный органический углерод

ЗПОУ — запасы органического углерода

СПОУ — содержание органического углерода

ЦПК — цифровое почвенное картографирование

VNIR — visible-near ranges (видимый ближний диапазон)

СХП — сельскохозяйственное предприятие

dv — Плотность почвы в естественном сложении/объемная масса

d — Плотность твердой фазы

ПТФ — Педотрансферные функции

Модель SCORPAN:

S — почва (другие характеристики почвы);

C — климат (локальные климатические характеристики);

O — организмы, растительность, фауна, человек;

R — рельеф (морфометрические величины);

P — материнская порода, литология;

A — возраст, время;

N — пространственное положение.

Предикторы:

BSI — Bare Soil Index (индекс открытой почвы)

EVI — Enhanced Vegetation Index

GPP — Gross Primary Production

IBI — Index-Based built-up Index (индекс застройки территории)

LAI — Leaf Area Index (индекс листовой поверхности)

NDVI — Normalized Difference Vegetation Index

NDVI green — Normalized Difference Vegetation Green Index

NDWI — Normalized Difference Water Index

NIR — Near-infrared

NPP — Net primary productivity

SWIR — Shortwave-infrared

TVI — Transformed Vegetation Index;

Методы моделирования:

ANN — Artificial Neural Network (Искусственная нейронная сеть)

CA — Cellular Automata (клеточный автомат)

CART — Classification and Regression Tree (Дерево классификации и регрессии)

CNN — Convolutional Neural Network (Сверточная нейронная сеть)

BaRT — байесовские регрессионные деревья

BRT — Boosted Regression Trees (Улучшенные деревья решений)

DT — Decision Tree (Дерево решений)

GLM — Generalized Linear Model Boosting (Обобщенная линейная модель)

GWR — Geographically weighted regression (Географически взвешенная регрессия)

GWRK — Geographically weighted regression kriging (Географически взвешенный регрессионный кригинг)

MLR / MLRA — множественная линейная регрессия

OK — Ordinary Kriging (Ординарный кригинг)

PLSR — Partial Least Squares Regression (Частичная регрессия наименьших квадратов)

RF — Random Forest (Случайный лес)

RFRK — RF plus residuals kriging

RK — Regression Kriging (Регрессионный кригинг)

RFE — Recursive Feature Elimination (Алгоритм рекурсивного устранения признаков)

SLR — Stepwise Linear Regression (Пошаговая линейная регрессия)

SVM / SVR — Support Vector Machine/Support Vector Regression (Метод опорных векторов)

XGBoost — Бустинг регрессионных деревьев

Оценка точности модели:

CCC / LCCC — Concordance Correlation Coefficient / Lin's Concordance Correlation Coefficient
(Коэффициент корреляции соответствия)

IQR — Интерквартильный размах

MAE / MAEE — Mean Absolute Error / Mean Absolute Estimation Error (Средняя абсолютная ошибка)

MAPE — Mean Absolute Percentage Error (Средняя абсолютная ошибка в процентах)

MDA — Mean Decrease in Accuracy (Показатель среднего уменьшения общей точности модели)

ME / MEE — Mean Error / Mean Estimation Error (Средняя ошибка)

R² — Коэффициент детерминации

RMSD / RMSE — Root Mean Square Deviation / Root Mean Squared Error (Среднеквадратическая ошибка)

RPD — Ratio of Performance of Deviation

RPIQ — Ratio of performance to inter-quartile

Облачная платформа:

GEE — Google Earth Engine

Базы данных:

ISRIC — Международного справочно-информационного центра почв

NSSC — National Soil Survey Laboratory. Soil characterization database. National Soil Survey Lab., Lincoln, NE.

NCSS — National Cooperative Soil Survey

NCSCD — Northern Circumpolar Soil Carbon Database

RaCA — Rapid Carbon Assessment

RMQS — French National Soil Survey (Réseau de Mesures de la Qualité des Sols) — французская сеть почвенных исследований

SIMS — Венгерская система информации и мониторинга почв

SSURGO — Soil Data Mart-Soil Survey

WRB — World Reference Base (Реферативная база почвенных ресурсов)

ПГБД РФ — Почвенно-географическая база данных Российской Федерации

Географические названия:

МО — Московская область

БО — Белгородская область

РО — Ростовская область