

УДК 631.4

**МУЛЬТИВРЕМЕННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТКРЫТОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ
ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПАХОТНЫХ ГОРИЗОНТОВ**

© 2025 г. П.В. Королева, Д.И. Рухович, Д.Г. Боршев, А.Д. Рухович

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева
Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2
E-mail: soilmap@yandex.ru, landmap@yandex.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2024. После доработки 10.01.2025. Принята к публикации 10.02.2025.

В Южнорусской провинции степной зоны Восточно-Европейской равнины реализован новый метод построения карты содержания почвенного органического вещества на основе мультимедийных спектральных характеристик открытой поверхности почвы. Карта построена на основе выявленной функциональной связи между содержанием почвенного органического вещества и мультимедийными характеристиками открытой поверхности почвы с коэффициентом детерминации 0.81. Детальность карты составила 30 м, что превосходит точность существующего агрохимического обследования пахотных угодий России. Реализация нового подхода потребовала модификации наземного агрохимического обследования на основе карты коэффициента «С» мультимедийной линии почвы. Детальная карта содержания почвенного органического вещества развивает методы картографирования структуры почвенного покрова в направлении выявления внутриполевой неоднородности почвенного покрова для систем точного земледелия.

Ключевые слова: спектральные характеристики почвы, органическое вещество почв, линия почвы, большие данные дистанционного зондирования, нейросети, машинное обучение, агрохимическое обследование.

DOI: 10.24412/1993-3916-2025-2-20-32

EDN: EDXUDQ

Почвенный покров Южнорусской провинции степной зоны (Природно-сельскохозяйственное районирование ..., 1984) разнообразен и контрастен при преобладающих (зональных) черноземах выщелоченных, обыкновенных и южных (Почвенная карта ..., 1985). Структура почвенного покрова региона включает солонцовые комплексы, почвы лугового ряда, выходы песчаных и щебенчатых (опоки) пород. Пестрота почвенного покрова затрудняет вовлечение в пахотные угодья в рамках одного сельскохозяйственного поля почв с близкими агрохимическими показателями, включая содержание почвенного органического вещества (ПОВ) – гумуса. А значит, картографирование ПОВ желательно вести с внутриполевой детальностью (Hu et al., 2024; Rukhovich et al., 2024).

Построение карт содержания ПОВ – важная задача, которую решают теми или иными способами на территории России десятки лет (Родин и др., 1968; Базилевич, 1993; Титлянова, 2007; Smith et al., 2007; Афонин и др., 2008; Щепашенко и др., 2013; Чернова и др., 2021; Бурдуковский и др., 2021; Курганова и др., 2022; Romanenkov et al., 2024). Но точность (детальность) этих работ до настоящего времени была невысока. В работах до сих пор не задействуется государственная почвенная карта (Рухович и др., 2013). На других территориях и другими методами удается добиться большей детальности (Ellili et al., 2019; Poggio et al., 2021; Lemercier et al., 2022; Sakhaee et al., 2022; Zeraatpisheh et al., 2022; Žižala et al., 2022; Hu et al., 2023). Наиболее детальное (1 проба с 10-20 га) картографирование содержания ПОВ на территорию пахотных угодий России проводит с 1964 года Агрохимическая служба (Постановление ..., 1964) по единой методике (Максимов, Флоринский, 1994).

Современные системы земледелия (точное земледелие) уже 35 лет (Haneklaus et al., 2016; Kukutai, 2016) ставят новые задачи перед картографированием почвенного покрова и требуют дальнейшего развития учения о структуре почвенного покрова (Fridland, 1974). Развитие идет по пути

увеличения точности (детальности) картографических работ (Breakthroughs ..., 1985; Robert, 1982, 1993, 2002; Myslyva et al., 2023). Точное земледелие требует картографирования внутриполевой неоднородности почвенного покрова, в то время как классическое крупномасштабное почвенное картографирование СССР не имело четкой внутриполевой направленности (Общесоюзная инструкция ..., 1973; Robert, 1993; Сорокина, 2006; Куляница и др., 2020). Повышение точности картографирования структуры почвенного покрова ведет и к увеличению точности (детальности) картографирования ПОВ до пространственного разрешения 30 м (Hu et al., 2024; Rukhovich et al., 2024).

Происходит объединение кажущихся несвязанными задач: детального картографирования ПОВ и разработки методов картографирования структуры почвенного покрова для нужд точного земледелия. Обе задачи в современных условиях решаются с пространственным разрешением 30 м (Khitrov et al., 2020; Rukhovich et al., 2024). Достижение подобной точности обеспечивается обработкой данных дистанционного зондирования (ДДЗ).

При обработке ДДЗ могут использоваться отдельные снимки (Varvel et al., 1999; Eckert et al., 2015; Yengoh et al., 2015; Phinzi, Ngetar, 2017; Xu et al., 2019), внутригодовые ряды (Yang, Anderson, 1999; Ayalew et al., 2020; Alexakis et al., 2021; Romano et al., 2021), мультитременные ряды (De Carvalho et al., 2014; Eckert et al., 2015; Khitrov et al., 2020; Iwahashi et al., 2021). При индикации разных почв и их пространственной неоднородности используют как вегетационные индексы, отражающие чаще всего растительный покров (Khitrov et al., 2020; Iwahashi et al., 2021; Qi et al., 2021; Romano et al., 2021; Rukhovich et al., 2021; Zhang et al., 2022), так и открытую поверхность почвы (Robert, 1993; Рухович и др., 2016а, 2016б, 2021; Королева и др., 2017, 2018; Куляница и др., 2020, 2017; Gallo et al., 2018). Из наиболее современных методов следует выделить методы обработки больших данных дистанционного зондирования (БДДЗ; Liu et al., 2018; Rukhovich et al., 2022, 2024; Di, Yu, 2023).

Задачами данного исследования являются изучение функциональных связей между содержанием почвенного органического вещества и спектральными характеристиками открытой поверхности почвы, построение карты содержания почвенного органического вещества в степной зоне на основе обработки больших данных дистанционного зондирования с детализацией, соответствующей системам точного земледелия.

Материалы и методы

Объект исследования – центральный, степной, возвышенно-волнистый, щебнистый выщелоченно-черноземный, обыкновенно-черноземный район Южнорусской провинции степной зоны Восточно-Европейской равнины, коэффициент увлажнения – от 0.44 до 0.77, сумма активных температур – от 2600 до 3200°C (Базарно-Карабулакский район Саратовской области; рис. 1).

Для расчетов коэффициентов мультитременной линии почвы (МЛП) использовались архивы сцен Landsat 4, 5, 7, 8 level 1 с 1984 по 2021 гг. Атмосферная коррекция проводилась с использованием модуля ATCOR программного комплекса ERDAS Imagine (2024). Для нормализации спектральных характеристик применялась кусочно-линейная аппроксимация спектральной окрестности линии почв (англ. «spectral neighborhood of the soil line» или SNSL; Куляница и др., 2017).

Для ретроспективного мониторинга почвенно-земельного покрова использовались топографические карты и тематические материалы в масштабе 1:25 000 и ДДЗ разного пространственного разрешения: высокого – IKONOS, GeoEye-1, WorldView (Рухович и др., 2012), среднего пространственного разрешения – Landsat, Sentinel с 1984 по 2023 гг. (Landsat data ..., 2023; Modified Copernicus ..., 2024), а также архивных данных CORONA 1968 и 1975 гг. (USGS ..., 2018).

Для организации полевого агрохимического и почвенного обследования использовались топографические карты масштаба 1:25 000 и цифровые модели рельефа с пространственным разрешением 30 м – SRTM (2018) и COPERNICUS (European Space Agency, 2021).

1. Картографический анализ применен для пересечения различных картографических материалов между собой для получения электронных таблиц. Использовалась ArcGIS (2023).

2. Вычисление коэффициентов мультитременной (эмпирической) линии почвы. В теории вегетационных индексов (Jordan, 1969) введено понятие «шапочка с кисточкой» и линия почвы (Kauth, Thomas, 1976). В дальнейшем «шапочку с кисточкой» и линию почв предложено рассчитывать не для сцены ДДЗ, а для каждого пикселя ДДЗ по всем значениям RED-NIR в пикселе на всех сценах ДДЗ за 30-40 лет – с 1984 года по настоящее время (Королева и др., 2017; Rukhovich, 2022).

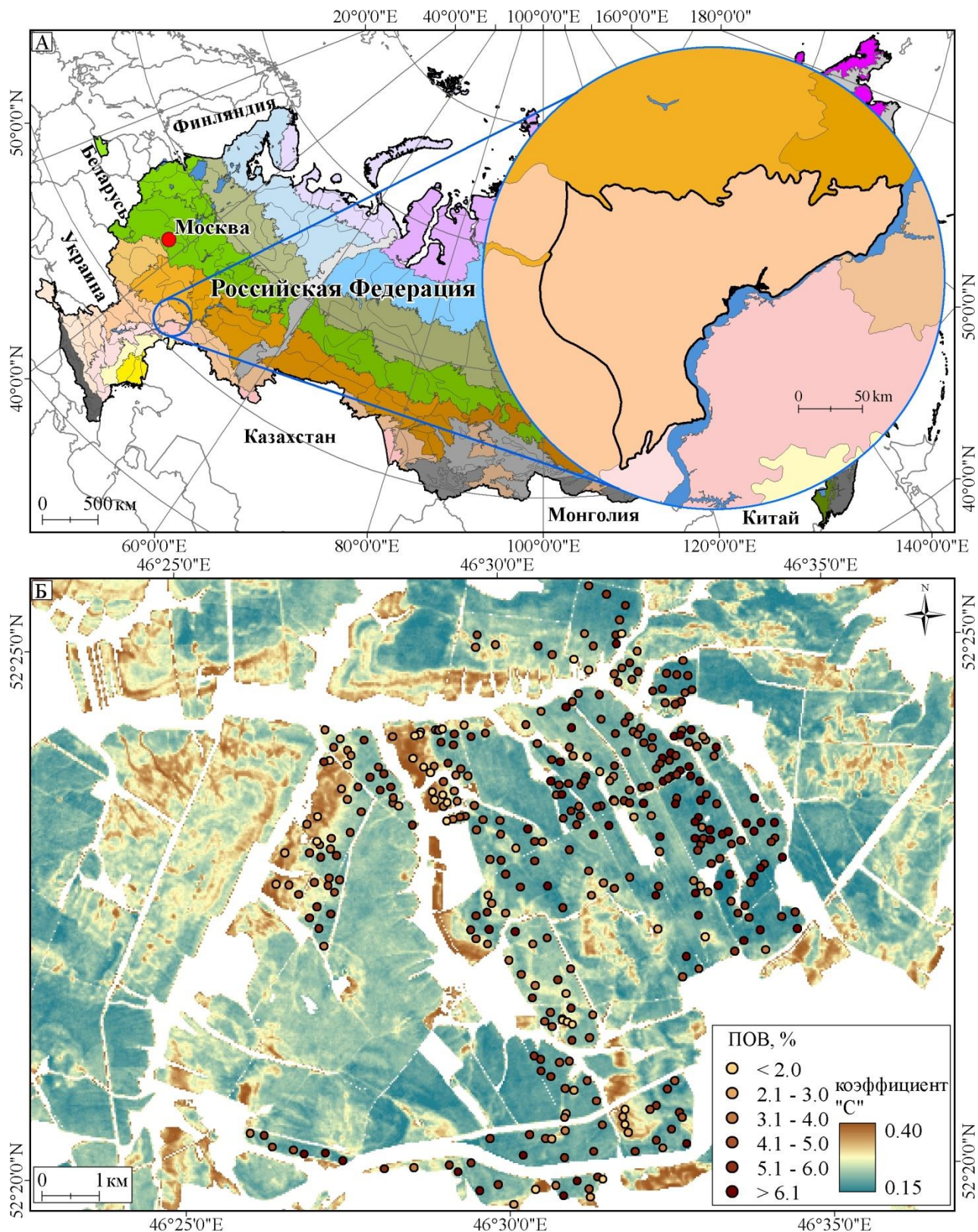


Рис. 1. Местоположение области исследования (сверху) – центрально степной возвышенно-волнистый, щебнистый выщелоченно-черноземный, обыкновенно-черноземный район Южнорусской провинции степной зоны Восточно-Европейской равнины; и карта коэффициента «С» МЛП с точками модифицированного агрохимического обследования (снизу), цветом обозначено содержание ПОВ.

В результате для каждого пикселя строится мультитременная «шапочка с кисточкой» и на ней выделяется область распространения открытой поверхности почвы. Область распространения открытой поверхности почвы (ОПП) во времени описывается эллипсом аппроксимации возможных значений RED-NIR. Большая полуось эллипса и является мультитременной линией почвы. Величина удаленности центра эллипса от начала координат спектральной плоскости RED-NIR является коэффициентом «С» МЛП (Rukhovich et al., 2024).

3. Ретроспективный мониторинг почвенно-земельного покрова. Метод позволяет восстановить изменение границ пахотных угодий в период с настоящего времени до 1968 года. Использован в работе для определения границ полей, которые за исследуемый период переставали обрабатываться (забрасывались). Особая детализация проводится с 1984 года по настоящее время, когда наблюдалась высокая динамика площадей пахотных угодий России (ЕМИСС, 2019). Точность метода соответствует точности традиционного картографирования в масштабе 1:10 000 (Bryzzhev et al., 2015; Шаповалов и др., 2020). Метод требует наличия ГИС-проекта определенного состава и качества (геореференсация и атмосферная коррекция). Метод был изложен в серии работ 2014-2020 гг. (Рухович и др., 2014, 2015, 2016в, 2017; Bryzzhev et al., 2015; Королева и др., 2019; Шаповалов и др., 2020).

4. Фильтрация архивов ДДЗ (машинное обучение 1). Для расчетов коэффициентов мультитременной линии почвы (Королева и др., 2017) необходимо наличие на кадрах ДДЗ открытой поверхности почвы. Для этого необходимо выбрать кадры ДДЗ или фрагменты кадров ДДЗ, на которых можно распознавать ОПП, т.е. без облачности, воды, саж, снега и т.д. Одним из вариантов отбора пригодных изображений является перебор сцен ДДЗ вручную (Королева и др., 2017). Результат ручного отбора преобразуется в dataset. На основе dataset проводится машинное обучение и автоматизация фильтрации ДДЗ. Эта проблема была решена авторами на основе разработки и применения машинного обучения (Rukhovich et al., 2021).

Хорошим методом машинного обучения для фильтрации пригодности ДДЗ является градиентный бустинг (Friedman, 2001). Реализация метода детально изложена в работе 2021 года (Rukhovich et al., 2021). Использован созданный вручную dataset, содержащий набор фрагментов ДДЗ с указанием растительности, облачности, переувлажнения, снега и проч. Применена библиотека CatBoost (Prokhorenkova et al., 2018) языка программирования Python.

5. Распознавание ОПП на отобранных сценах ДДЗ (машинное обучение 2). Для полного кадра ДДЗ (Landsat, Sentinel) ОПП в спектральной плоскости RED-NIR принимает форму эллипса (Королева и др., 2017). Эллипс спектральных характеристик ОПП находится на линии почвы между областями пожнивных остатков (соломы) и следов сельскохозяйственных пожаров (саж; McCarty et al., 2012; Королева и др., 2017). В связи с этим ОПП на всем кадре ДДЗ не может быть выделена на основе вегетационных индексов (Королева и др., 2017). Эллипс спектральных значений ОПП детектируется на графиках «шапочки с кисточкой» вручную (Kauth, Thomas, 1976; Crist, Cicone, 1984). Из выделенных вручную областей ОПП на ДДЗ за 35 лет формируется dataset, на основе которого проводится глубокое машинное обучение и автоматизация выделения областей распространения ОПП на сценах ДДЗ. Эта проблема была решена на основе разработки и применения сверточной нейронной сети (Rukhovich et al., 2022).

При глубоком машинном обучении применяется популярная нейронная архитектура для сегментации изображений U-Net (Zhang et al., 2021), функция активации ReLU и пакетная нормализация (Ioffe, Szegedy, 2015), функция потерь Dice Loss (Jadon, 2020), алгоритм оптимизации Adam (Kingma, Ba, 2014). Разработка и применение нейросети для распознавания ОПП детально изложены в работе D.I. Rukhovich с соавторами (2022).

6. Модифицированное агрохимическое обследование. Классическое агрохимическое обследование проводится на территории России единообразно по единой методике (Максимов, Флоринский, 1994). В этой методике предполагается отбор смешанных проб с каждых 10-20 га в зависимости от сложности почвенного покрова. Более того, при закладке элементарных участков отбора проб, предполагается использование почвенных карт, которые в свою очередь создаются по единой методике почвенного обследования (Общесоюзная инструкция ..., 1973). На территорию исследования все участки агрохимического обследования носили характер регулярной сети, образованной прямоугольными ячейками. На сельскохозяйственное поле накладывалась сеть,

состоящая из прямоугольников с площадью около 20 га. Учета почвенных контуров по почвенной карте района исследований (Почвенная карта ..., 1979) не отмечено ни на одном поле (рис. 2). Почвенный покров представлен серыми лесными почвами, черноземами выщелоченными, солонцовыми комплексами, черноземно-луговыми, пойменными почвами разной гумусированности, эродированности и гранулометрического состава, а также почвами оврагов и балок.

Для учета всех почвенных разностей, а их на почвенной карте хозяйства отмечено 26 (Почвенная карта ..., 1979), и всего диапазона значений коэффициента «С» МЛП на территорию обследования были взяты 363 почвенные пробы. Они брались смешанными, в радиусе 25 м от намеченной координаты обследования. Одна проба бралась на 15 га (рис. 1Б).

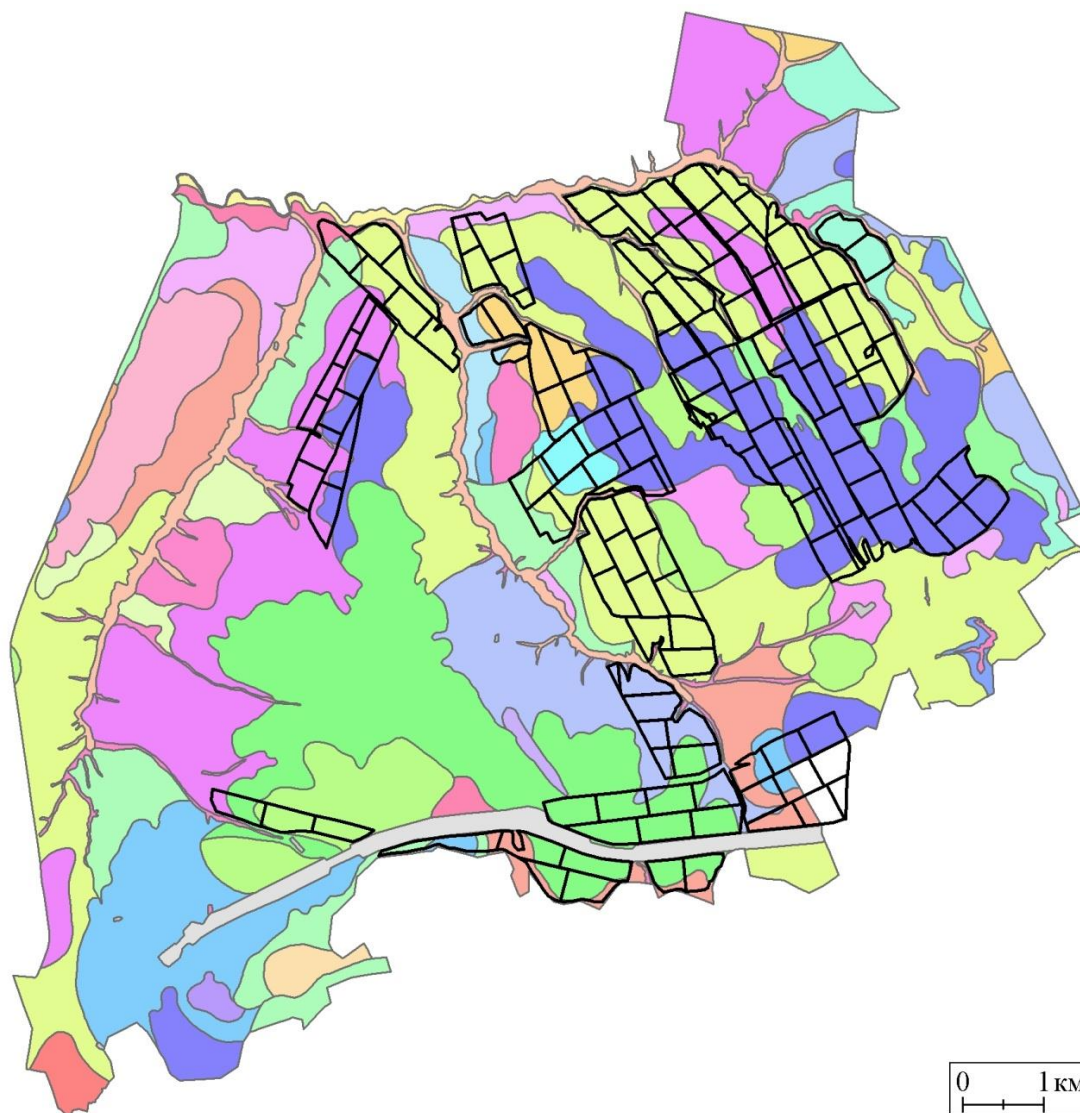


Рис. 2. Контурсы «Почвенной карты колхоза “Родина”» (1979), почвенные разности на которой, согласно легенде, окрашены в произвольные цвета для контрастности изображения, и элементарные участки традиционного агрохимического обследования (черные контурсы).

7. *Определение содержания ПОВ в образцах.* Для всех почвенных и агрохимических обследований содержания ПОВ (гумуса) проводилось и проводится по Тюрину (ГОСТ ..., 1993). Прямым аналогом метода определения гумуса по Тюрину является метод Walkley–Black (1934).

8. *Блок-схема работы.* На рисунке 3 представлена блок-схема настоящего исследования. Блок-схема состоит из двух последовательностей действий (комбинаций методов), пересекающихся друг с другом в нескольких местах, и самостоятельных блоков машинного обучения.

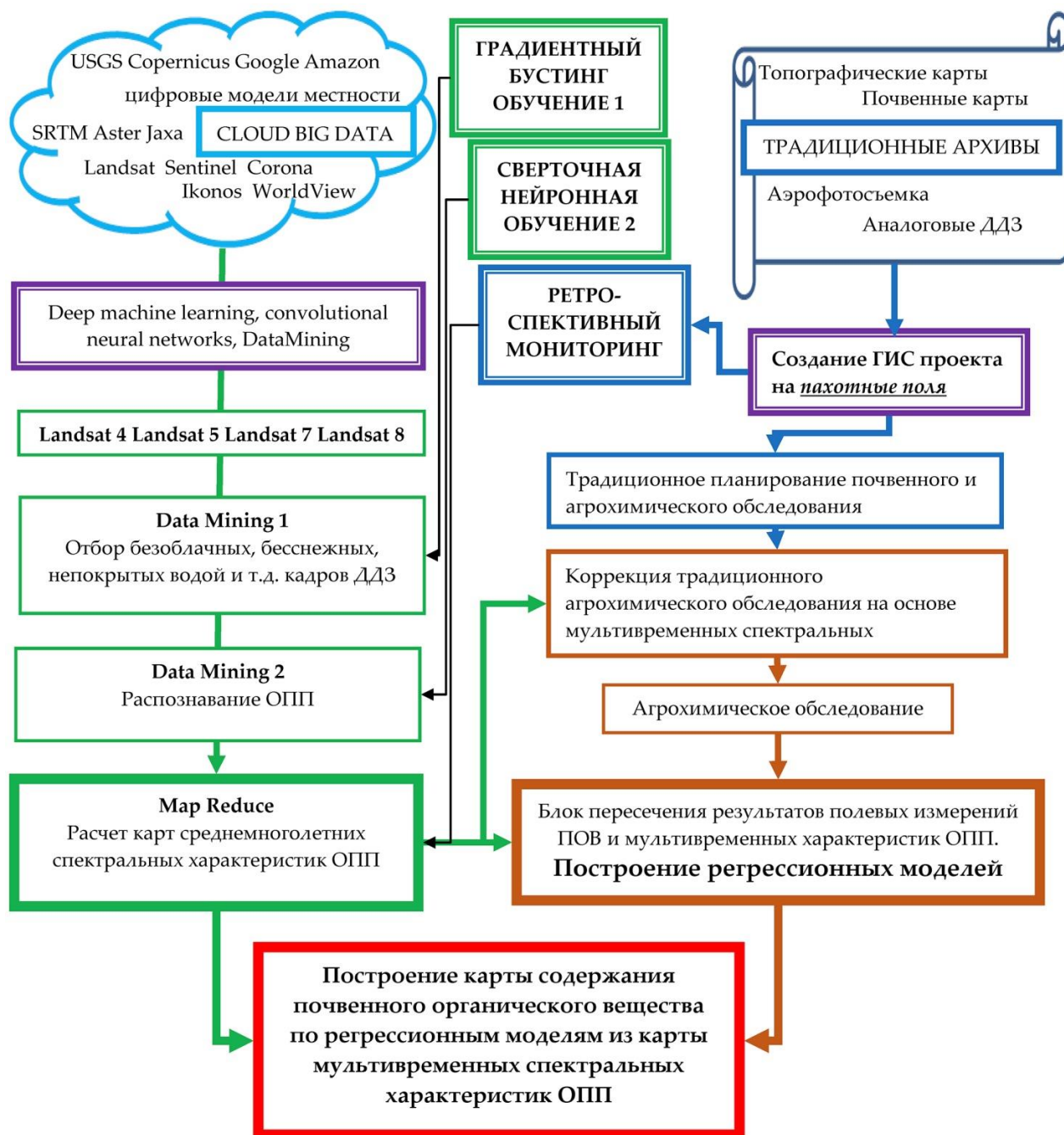


Рис. 3. Блок-схема работы.

Первая последовательность традиционная, состоящая из сбора архивных данных для организации агрохимического обследования с учетом почвенных разностей. На основе этого подхода формируется ГИС, обеспечивающая реализацию ретроспективного мониторинга почвенно-земельного покрова. Ретроспекция обеспечивает исследование границами пахотных полей, т.е. территорией, на которую строится карта содержания ПОВ (гумуса).

Второй блок основан на обработке БДЗ с применением нейронных сетей. Этот блок позволяет создать карту коэффициента «С» МЛП – карту усредненных мультивременных спектральных характеристик ОПП. Для реализации второго блока необходимы границы пахотных угодий (ретроспективный мониторинг) и нейросетевая фильтрация мультивременных массивов БДЗ.

Результаты второго блока в виде карты коэффициента «С» МЛП используются для коррекции первого блока при организации полевого агрохимического обследования, выявления

функциональных связей между содержанием ПОВ и спектральными характеристиками почвы, как основа построения карты содержания ПОВ.

Результаты и обсуждение

1. *Карта ОПП – карта коэффициента «С» МЛП.* В 2021 году на основе машинного обучения (метод 4) проведен отбор ДДЗ Landsat 4, 5, 7, 8 с 1984 по 2020 гг. Всего отобрано 415 кадров. На основе машинного обучения (метод 5) на кадрах ДДЗ распознаны области ОПП. Для каждого пикселя области исследования построены МЛП и рассчитаны их коэффициенты (метод 2). МЛП рассчитывались только при наличии не менее шести значений ОПП за 35 лет (Rukhovich et al., 2024). Расчет велся в границах пахотных полей, полученных ретроспективным мониторингом почвенно-земельного покрова (метод 3).

На рисунке 1 приведен фрагмент карты коэффициента «С» МЛП, построенной на Базарно-Карабулакский район Саратовской области. Фрагмент охватывает площадь в 22 135 га, из которых 15014 га являются пашней. Диапазон значений коэффициента «С» МЛП для области исследования составил 0.15-0.39. Карта коэффициента «С» МЛП использовалась для планирования точек наземного опробования (метод 6; рис. 1).

Поскольку ОПП может встречаться за пределами пахотных угодий (населенные пункты, выходы пород, карьеры и т.п.), область исследования задана по границам пахотных угодий. Решить проблему автоматизации получения векторных границ полей нужной точности (картографический масштаб 1:10 000) на основе машинного обучения в настоящем исследовании не удалось. Применен метод ретроспективного мониторинга (метод 3; рис. 2).

2. *Построение функциональной зависимости.* В 2024 году отобраны 363 образца по методу 6, в них измерено содержание ПОВ методом мокрого озоления (метод 7). По координатам 363 точек получены значения коэффициентов «С» МЛП (метод 1). Значения ПОВ и мультимедийных спектральных характеристик представлены на рисунке 4. Аппроксимация полученного распределения имеет высокие значения коэффициента детерминации – 0.81. Полученную степенную зависимость можно использовать для построения карты содержания ПОВ исследуемого района.

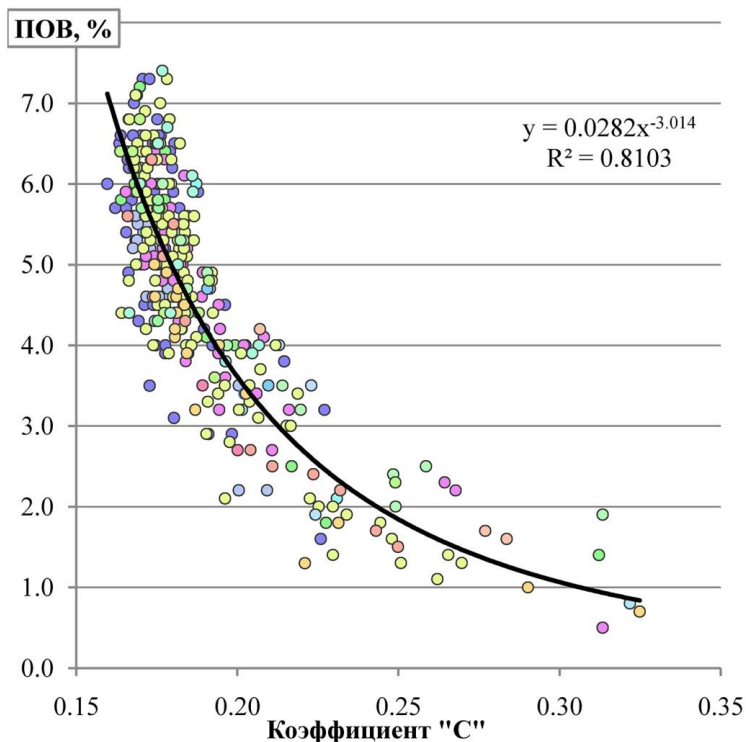


Рис. 4. Зависимость содержания ПОВ от мультимедийных спектральных характеристик почвы (коэффициента «С» МЛП) в точках модифицированного агрохимического обследования (окрашены в соответствии с почвенными разностями).

3. *Построение карты содержания ПОВ.* Для каждого пикселя карты коэффициента «С» МЛП (рис. 1) по формуле функциональной зависимости (рис. 4) рассчитываются значения величин ПОВ. Результат пересчета величин коэффициентов «С» МЛП в значения величин ПОВ по формуле аппроксимации представлен на рисунке 5. Получена карта содержания ПОВ с пространственным разрешением 30 м. Подтверждена возможность построения карт содержания ПОВ в Южнорусской провинции степной зоны (Природно-сельскохозяйственное районирование ..., 1984) на основе мультитременных спектральных характеристик ОПП.

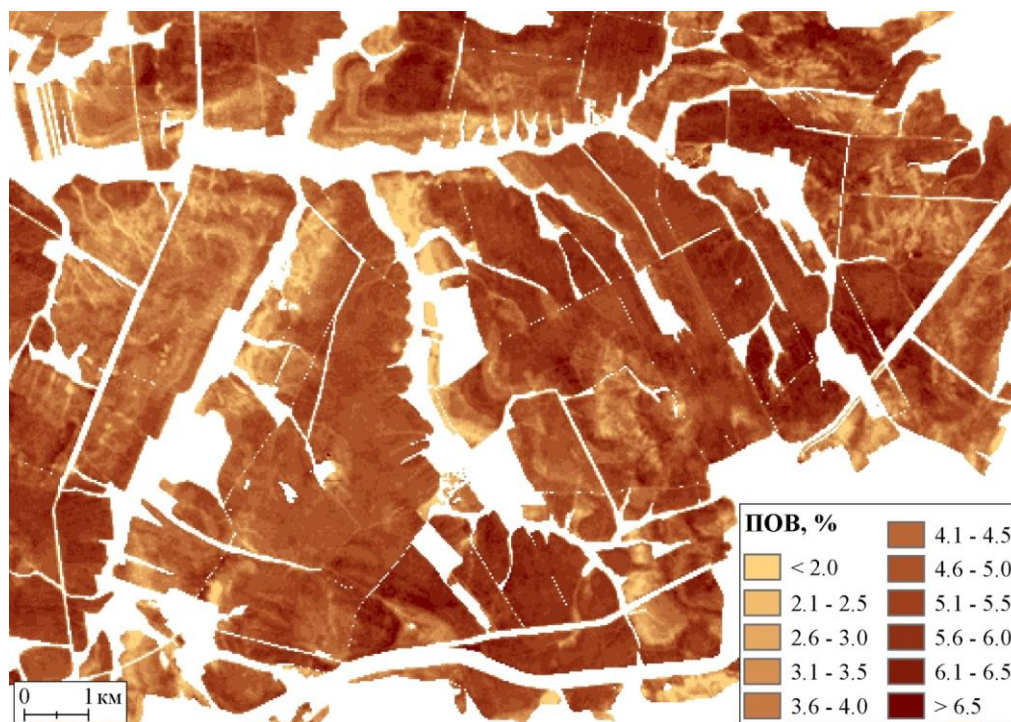


Рис. 5. Расчетная карта содержания ПОВ.

Созданию карт содержания ПОВ с различным уровнем детальности от 90 м до 1 км (Wadoux et al., 2020; Chen et al., 2022) посвящено множество работ за последние годы в разных регионах мира (Ellili et al., 2019; Poggio et al., 2021; Lemercier et al., 2022; Sakhaee et al., 2022; Zeraatpisheh et al., 2022; Žižala et al., 2022; Hu et al., 2023; Zhang et al., 2025). Многие из этих работ проведены в парадигме модели Scooran, целью которой является описание количественных взаимосвязей между свойствами почвы и ковариатами окружающей среды, включая почву, климат, организмы, рельеф, исходный материал, время и пространство, что является основной теорией цифровой почвенной картографии.

Необходимость большого количества разнородной пространственной информации затрудняет реализацию этой парадигмы на территории России. Сложно собрать количественную информацию о плотности и гранулометрическом составе почв на все пахотные угодья с внутрислоевой детализацией (Rukhovich et al., 2007). Это заставляет искать новые методы построения карт содержания ПОВ. Один из которых, построенный на принципах обработки БДДЗ, представлен в настоящем исследовании.

Метод вычисления коэффициентов МЛП и построения карт коэффициентов МЛП предложен авторами данной статьи в 2016-2018 гг. и запатентован. На территорию степной зоны метод применен впервые, также впервые в степной зоне вычислена формула аппроксимации мультитременных спектральных характеристик ОПП и величин содержания ПОВ. Также впервые на основе вычисленной формулы и БДДЗ построена карта содержания ПОВ с детальностью 30 м на площади в тысячи га. Пространственная точность карты (30 м), коэффициент детерминации (0.81) и минимизация входных данных (только открытые массивы ДДЗ), показывает существенные преимущества предложенного метода в сравнении с текущими разработками по картографированию содержания ПОВ.

Выводы

Для степной зоны впервые выявлены функциональные связи между содержанием ПОВ и мультимедийными спектральными характеристиками ОПП. Мультимедийные спектральные характеристики получены в виде карты коэффициента «С» МЛП, разработанной в понятийном аппарате спектральной окрестности линии почв. На основе выявленных функциональных связей впервые для степной зоны построена карта содержания ПОВ с пространственным разрешением 30 м. Полученная детальность карты содержания ПОВ делает ее пригодной для картографирования структуры почвенного покрова для систем точного земледелия. Полученная карта содержания ПОВ превосходит по точности и детальности существующие карты содержания ПОВ хозяйств и административных районов. Предложенный подход может быть рекомендован для модернизации агрохимического обследования в Южноуральской провинции степной зоны.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания № FGUR-2025-0001 «Исследовать внутривидовую неоднородность, трансформацию, эволюцию, деградацию почвенного покрова агроландшафтов на разных уровнях организации на основе сочетания наземных обследований и цифровых технологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афонин А.Н., Грин С.Л., Дзюбенко Н.И., Фролов А.Н.* 2008. Агроэкологический атлас России и сопредельных государств: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения [Электронный ресурс <http://www.agroatlas.ru> (дата обращения 23.12.2024)].
- Базилевич Н.И.* 1993. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука. 293 с.
- Бурдуковский М.Л., Голов В.И., Перепелкина П.А., Киселева И.В., Тимофеева Я.О.* 2021. Агрогенные и постагрогенные изменения запасов углерода и физических свойств подбелов темногомусовых // Почвоведение. № 6. С. 747-756.
- ГОСТ 26213-91. 1993. Почвы. Методы определения органического вещества [Электронный ресурс <http://docs.cntd.ru/document/1200023481> (дата обращения 23.12.2024)].
- ЕМИСС – Единая межведомственная информационно-статистическая система. 2019 [Электронный ресурс <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения 23.12.2024)].
- Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С.* 2017. Местоположение открытой поверхности почвы и линии почвы в спектральном пространстве RED-NIR // Почвоведение. № 12. С.1435-1446.
- Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С.* 2018. Характеристика почвенных типов и подтипов в N-мерном пространстве коэффициентов мультимедийной (эмпирической) линии почв // Почвоведение. № 9. С. 1085-1098.
- Королева П.В., Рухович Д.И., Шаповалов Д.А., Сулейман Г.А., Долинина Е.А.* 2019. Ретроспективный мониторинг переувлажнения почвенного покрова пахотных земель Тамбовской области в 2018-1968 гг. // Почвоведение. № 7. С. 872-890.
- Куляница А.Л., Рухович Д.И., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В.* 2020. Анализ информативности методов обработки больших спутниковых данных систем точного земледелия при коррекции крупномасштабных почвенных карт // Почвоведение. № 12. С. 1460-1477.
- Куляница А.Л., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Королева П.В., Рухович Д.И., Симакова М.С.* 2017. Применение кусочно-линейной аппроксимации спектральной окрестности линии почв для анализа качества нормализации материалов дистанционного зондирования // Почвоведение. № 4. С. 401-410.
- Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп С.Л., Казанов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В.* 2022. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ состояния почв и запасы углерода в лесной растительности // Почвы и окружающая среда. Т. 5. № 2. 16 с.
- Максимов П.Г., Флоринский М.А.* 1994. Методические указания по проведению комплексного агрохимического обследования почв сельскохозяйственных угодий. М.: ЦНТИПР Минсельхозпрода Российской Федерации. 97 с.
- Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования. 1973 / Ред. Т.А. Ищенко. М.: Колос. 95 с.
- Постановление Совета министров СССР от 9 апреля 1964 г. № 319 «Об организации Государственной агрохимической службы в сельском хозяйстве». 1964 [Электронный ресурс <https://docs.cntd.ru/document/901747968> (дата обращения 23.12.2024)].
- Почвенная карта колхоза «Родина» Базарно-Карабулакского района Саратовской области. 1979. Масштаб

- 1:25 000. Саратов: МСХ РСФСР. 1 л.
- Почвенная карта Саратовской области. 1985. Масштаб 1:300 000 / Ред. Е.М. Цвылев. Винница.: Винницкая картографическая фабрика ГУГК СССР. 1 л.
- Природно-сельскохозяйственное районирование земельного фонда СССР. 1984. Масштаб 1:8 000 000 / Ред. Д.И. Шашко, Е.И. Гайдамака, А.Н. Каштанов и др. М.: ГУГК. 1 л.
- Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. 1968. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука. 143 с.
- Рухович Д.И. 2022. Патент № 2777272 С1, Российская Федерация, МПК G01V 9/00. Способ создания почвенных карт по результатам анализа данных дистанционного зондирования. № 2021108753. Заявл. 31.03.2021; опубл. 01.08.2022.
- Рухович Д.И., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В. 2012. Цифровая тематическая картография как смена доступных первоисточников и способов их использования // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Всероссийское общество почвоведов им. В.В. Докучаева. С. 58-86.
- Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Симакова М.С., Долинина Е.А., Рухович С.В. 2013. Государственная почвенная карта – версия ArcInfo // Почвоведение. №3. С. 251-267.
- Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Сулейман Г.А., Черноусенко Г.И. 2021. Детектирование деградированных участков пашни на основе анализа больших спутниковых данных // Почвоведение. № 2. С. 151-167.
- Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжжев А.В., Королева П.В. 2016а. Построение карт усредненных спектральных отклонений от линии почв и их сравнение с традиционными почвенными картами // Почвоведение. № 7. С. 794-812.
- Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжжев А.В., Королева П.В. 2016б. Информативность коэффициентов а и b линии почв для анализа материалов дистанционного зондирования // Почвоведение. № 8. С. 903-917.
- Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжжев А.В., Калинина Н.В., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. 2014. Влияние лесополос на фрагментацию овражно-балочной сети и образование мочаров // Почвоведение. № 11. С. 1043-1045.
- Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжжев А.В., Калинина Н.В., Королева П.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. 2015. Ретроспективный анализ изменчивости землепользования на слитых почвах замкнутых западин // Почвоведение. № 10. С. 1168-1194.
- Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. 2016в. Методология сравнения разновременных почвенных карт в целях выявления и описания динамики почвенного покрова на примере мониторинга засоления почв // Почвоведение. № 2. С. 164-181.
- Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. 2017. Влияние засоленных почв на изменчивость типов землепользования в Азовском районе Ростовской области // Почвоведение. № 3. С. 289-310.
- Сорокина Н.П. 2006. Методология составления крупномасштабных агроэкологически ориентированных почвенных карт. М.: Россельхозакадемия. 159 с.
- Титлянова А.А. 2007. Запасы фитомассы, мортмассы (мертвая фитомасса) и депонированных в них элементов питания; чистая первичная продукция и потребление элементов питания; поступление отмершей фитомассы и возврат элементов питания в подстилку и почву в экосистемах Евразии, Северной и Южной Америки, Африки и Австралии. База данных. [Электронный ресурс <http://biodat.ru/db/dbsoil.htm> (дата обращения 23.12.2024)].
- Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепаченко Д.Г. 2021. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. № 3. С. 273-286.
- Шаповалов Д.А., Королева П.В., Калинина Н.В., Рухович Д.И., Сулейман Г.А., Долинина Е.А. 2020. Учет и выделение переувлажненных территорий при почвенном картографировании и землеустройстве // Почвоведение. № 3. с. 291-307.
- Щепаченко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. 2013. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. № 2. С. 123.
- Alexakis D.D., Manoudakis S., Agapiou A., Polykretis C. 2021. Towards the assessment of soil-erosion-related C-Factor on European scale using Google Earth Engine and Sentinel-2 images // Remote Sensing. Vol. 13(24). P. 5019.
- ArcGIS. 2023 [Электронный ресурс <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/about-arcgis/overview> (дата обращения 23.12.2024)].
- Ayalew D.A., Deimlich D., Šarapatka B., Doktor D. 2020. Quantifying the sensitivity of NDVI-Based C factor estimation and potential soil erosion prediction using Spaceborne earth observation data // Remote Sensing. Vol. 12(7). P. 1136.

- Breakthroughs in Precision Agriculture. 1985 [Электронный ресурс <https://maes.umn.edu/history/discoveries> (дата обращения 23.12.2024)].
- Bryzhev A.V., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Vilchevskaya E.V., Dolinina E.A., Rukhovich S.V. 2015. Organization of retrospective monitoring of the soil cover of Rostov oblast // Eurasian Soil Science. Vol. 48 (10). P. 1029-1049.
- Chen S.C., Arrouays D., Mulder V.L., Poggio L., Minasny B., Roudier P., Libohova Z., Lagacherie P., Shi Z., Hannam J., Meersmans J., Richer-de-Forges A.C., Walter C. 2022. Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review // Geoderma. Vol. 409. P. 115567.
- Crist E.P., Cicone R.C. 1984. A physically-based transformation of Thematic Mapper data – The TM Tasseled Cap. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 22 (3). P. 256-263.
- De Carvalho D.F., Durigon V.L., Antunes M.A.H., De Almeida W.S., Oliveira P.T.S. 2014. Predicting soil erosion using Rusle and NDVI time series from TM Landsat 5 // Pesquisa Agropecuária Brasileira. Vol. 49. P. 215-224.
- Di L., Yu E. 2023. Remote Sensing Big Data. Cham: Springer International Publishing, 306 p.
- Eckert S., Hüsler F., Liniger H., Hodel E. 2015. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia // Journal of Arid Environments. Vol. 113. P. 16-28.
- Ellili Y., Walter C., Michot D., Pichelin P., Lemercier B. 2019. Mapping soil organic carbon stock change by soil monitoring and digital soil mapping at the landscape scale // Geoderma. Vol. 351. P. 1-8.
- ERDAS Imagine. 2024 [Электронный ресурс <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine> (дата обращения 23.12.2024)].
- European Space Agency. 2021. Copernicus Global Digital Elevation Model [Электронный ресурс <https://doi.org/10.5069/G9028PQB> (дата обращения 23.12.2024)].
- Fridland V.M. 1974. Structure of the soil mantle // Geoderma. Vol. 12. P. 35-42.
- Friedman J.H. 2001. Greedy function approximation: A gradient boosting machine // Annals of Statistics. Vol. 29. P. 1189-1232.
- Gallo B.C., Demattê J.A.M., Rizzo R., Safanelli J.L., Mendes W.D.S., Lepsch I.F., Sato M.V., Romero D.J., Lacerda M.P.C. 2018. Multi-temporal satellite images on topsoil attribute quantification and the relationship with soil classes and geology // Remote Sensing. Vol. 10. P. 1571.
- Haneklaus S., Lilienthal H., Schnug E. 2016. 25 years precision agriculture in Germany – a retrospective // Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture, St. Louis, Missouri, USA [Электронный ресурс https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00039296 (дата обращения 23.12.2024)].
- Hu B.F., Ni H., Xie M.D., Li H.Y., Wen Y.L., Chen S.C., Zhou Y., Teng H.F., Bourenmane H., Shi Z. 2023. Mapping soil organic matter and identifying potential controls in the farmland of Southern China: Integration of multi-source data, machine learning and geostatistics // Land Degradation & Development. Vol. 34 (17). P. 5468-5485.
- Hu B., Xie M., Zhou Y., Chen S., Zhou Y., Ni H., Peng J., Ji W., Hong Y., Li H., Shi Z. 2024. A high-resolution map of soil organic carbon in cropland of Southern China // Catena. Vol. 237. P. 107813.
- Ioffe S., Szegedy C. 2015. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift // International conference on machine learning. P. 448-456.
- Iwahashi Y., Ye R., Kobayashi S., Yagura K., Hor S., Soben K., Homma K. 2021. Quantification of changes in rice production for 2003–2019 with MODIS LAI data in Pursat Province, Cambodia // Remote Sensing. Vol. 13. P. 1971.
- Jadon S.A. 2020. A survey of loss functions for semantic segmentation // 2020 IEEE conference on computational intelligence in bioinformatics and computational biology. P. 1–7.
- Jordan C.F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor // Ecology. Vol. 50. P. 663-666.
- Kauth R.J., Thomas G.S. 1976. The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat // LARS Symposia. P. 159.
- Khitrov N.B., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Trubnikov A.V., Petukhov D.A., Kulyanitsa A.L. 2020. A study of the responsiveness of crops to fertilizers by zones of stable intra-field heterogeneity based on big satellite data analysis // Archives of Agronomy and Soil Science. Vol. 66 (14). P. 1963-1975.
- Kingma D.P., Ba J. 2014. Adam: A method for stochastic optimization. arXiv2014., arXiv:1412.6980 [Электронный ресурс <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (дата обращения 23.12.2024)].
- Kukutai A. 2016. Can digital farming deliver on its promise [Электронный ресурс <http://www.agnewscenter.com/archives.cfm?news=9903> (дата обращения 23.12.2024)].
- Landsat data courtesy of the U.S. Geological Survey. 2023 [Электронный ресурс <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 23.12.2024)].
- Lemercier B., Lagacherie P., Amelin J., Sauter J., Pichelin P., Richer-de-Forges A.C., Arrouays D. 2022. Multiscale evaluations of global, national and regional digital soil mapping products in France // Geoderma. Vol. 425. P. 116052.
- Liu P., Di L., Du Q., Wang L. 2018. Remote sensing big data: theory, methods and applications // Remote Sensing. Vol. 10. P. 711.

- McCarty J.L., Ellicott E.A., Romanenkov V., Rukhovitch D., Koroleva P. 2012. Multi-year black carbon emissions from cropland burning in the Russian Federation // *Atmospheric Environment*. Vol. 63. P. 223-238.
- Modified Copernicus Sentinel data 2016-2024. 2024 [Электронный ресурс <https://www.sentinel-hub.com> (дата обращения 23.12.2024)].
- Myslyva T., Nadtochiy P., Bilyavskiy Y., Trofymenko P. 2023. Intra-field spatial heterogeneity prediction for the purposes of precision farming: comparison of frequency ratio and Shannon's entropy models // *Scientific Papers. Series A: Agronomy*. Vol. LXVI (1). P. 138-147 [Электронный ресурс https://agronomyjournal.usamv.ro/pdf/2023/issue_1/Art19.pdf (дата обращения 23.12.2024)].
- Phinzi K., Ngetar N.S. 2017. Mapping soil erosion in a quaternary catchment in Eastern Cape using geographic information system and remote sensing // *South African Journal of Geomatics*. Vol. 6. 11 p.
- Poggio L., De Sousa L.M., Batjes N.H., Heuvelink G., Kempen B., Ribeiro E., Rossiter D. 2021. SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty // *Soil*. Vol. 7 (1). P. 217-240.
- Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A.V., Gulin 2018. A. Catboost: Unbiased boosting with categorical features // *Advances in Neural Information Processing Systems*. Vol. 31. P. 6638-6648.
- Qi G., Chang C., Yang W., Gao P., Zhao G. 2021. Soil salinity inversion in coastal corn planting areas by the satellite-UAV-ground integration approach // *Remote Sensing*. Vol. 13. P. 3100.
- Robert P.C. 1982. Evaluation of some remote sensing techniques for soil and crop management. PhD thesis. St. Paul, MN: University of Minnesota. 244 p.
- Robert P. C. 1993. Characterisation of soil conditions at the field level for soil specific management // *Geoderma*. Vol. 60. P. 57-72.
- Robert P.C. 2002. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management // *Plant and Soil*. Vol. 247. P. 143-149.
- Romanenkov V.A., Meshalkina J.L., Gorbacheva A.Y., Krenke A.N., Petrov I.K., Golozubov O.M., Rukhovich D.I. 2024. Maps of soil organic carbon sequestration potential in the Russian croplands // *Eurasian Soil Science*. Vol. 57 (5). P. 737-750.
- Romano E., Bergonzoli S., Pecorella I., Bisaglia C., De Vita P. 2021. Methodology for the definition of durum wheat yield homogeneous zones by using satellite spectral indices // *Remote Sensing*. Vol. 13 (11). P. 2036.
- Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Rukhovich D.D., Kalinina N.V. 2021. The use of deep machine learning for the automated selection of remote sensing data for the determination of areas of arable land degradation processes distribution // *Remote Sensing*. Vol. 13. P. 155.
- Rukhovich D.I., Koroleva P., Rukhovich A., Komissarov M. 2024. A detailed mapping of soil organic matter content in arable land based on the multitemporal soil line coefficients and neural network filtering of big remote sensing data // *Geoderma*. Vol. 447. P. 116941.
- Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Rukhovich D.D., Rukhovich A.D. 2022. Recognition of the bare soil using deep machine learning methods to create maps of arable soil degradation based on the analysis of multi-temporal remote sensing data // *Remote Sensing*. Vol.14. P. 2224.
- Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Vilchevskaya E.V., Romanenkov V., Kolesnikova L.G. 2007. Constructing a spatially-resolved database for modelling soil organic carbon stocks of croplands in European Russia. // *Regional Environmental Change*. Vol. 7. P. 51-61.
- Sakhaee A., Gebauer A., Ließ M., Don A. 2022. Spatial prediction of organic carbon in German agricultural topsoil using machine learning algorithms // *Soil*. Vol. 8 (2). P. 587-604.
- Smith P., Smith J.U., Wattenbach M., Gottschalk P., Franko U., Kuka K., Romanenkov V.A., Shevtsova L.K., Sirotenko O.D., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Romanenko I.A., Lisovoi N.V. 2007. Changes in mineral soil organic carbon stocks in the croplands of European Russia and the Ukraine, 1990-2070; Comparison of three models and implications for climate mitigation // *Regional Environmental Change*. Vol. 7 (2). P. 105-119.
- SRTM. 2018 [Электронный ресурс <http://srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения 23.12.2024)].
- USGS EROS Archive-Declassified Data-Declassified Satellite Imagery-1. 2018 [Электронный ресурс https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-declassified-data-declassified-satellite-imagery-1?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects (дата обращения 23.12.2024)].
- Varvel G.E., Schlemmer M.R., Schepers J.S. 1999. Relationship between spectral data from an aerial image and soil organic matter and phosphorus levels // *Precision Agriculture*. Vol. 1. P. 291-300.
- Wadoux A.M.J.C., Minasny B., McBratney A.B. 2020. Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions // *Earth-Science Reviews*. Vol. 210. P. 103359.
- Walkley A., Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method // *Soil science*. Vol. 37 (1). P. 29-38.
- Xu H., Hu X., Guan H., Zhang B., Wang M., Chen S., Chen M.A. 2019. Remote sensing based method to detect soil erosion in forests. // *Remote Sensing*. Vol. 11. P. 513.
- Yang C., Anderson G.L. 1999. Airborne videography to identify spatial plant growth variability for grain sorghum. // *Precision Agriculture*. Vol. 1. P. 67-79.

- Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J.* 2015. Limits to the use of NDVI in land degradation assessment // Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales; Springer Briefs in Environmental Science. Springer, Cham. P. 27-30.
- Zeraatpisheh M., Garosi Y., Owliaie H.R., Ayoubi S., Taghizadeh-Mehrjardi R., Scholten T., Xu M.* 2022. Improving the spatial prediction of soil organic carbon using environmental covariates selection: A comparison of a group of environmental covariates // *Catena*. Vol. 208. P. 105723.
- Zhang J., Zhu H., Wang P., Ling X.* 2021. ATT squeeze U-Net: a lightweight network for forest fire detection and recognition // *IEEE Access* 2021. Vol. 9. P. 10858-10870.
- Zhang M.W., Sun X.L., Zhang M.N., Yang H.X., Liu H.J., Li H.X.* 2025. Improved soil organic matter monitoring by using cumulative crop residue indices derived from time-series remote sensing images in the central black soil region of China // *Soil and Tillage Research*. Vol. 246. P. 106357.
- Zhang Y., Walker J.P., Pauwels V.R.N., Sadeh Y.* 2022. Assimilation of wheat and soil states into the APSIM-Wheat crop model: a case study // *Remote Sensing*. Vol. 14. P. 65.
- Žižala D., Minařík R., Skála J., Beitlerová H., Juřicová A., Reyes Rojas J., Penížek V., Zádorová T.* 2022. High-resolution agriculture soil property maps from digital soil mapping methods, Czech Republic // *Catena*. Vol. 212. P. 106024.