

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Огородников Сергей Сергеевич

**Опыт эталонирования почв сельскохозяйственных угодий при помощи
различных методологических приемов (на примере территории бывшего
совхоза «Тихий Дон» Куркинского района Тульской области)**

Специальность 1.5.19 (03.02.13) – Почвоведение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель *Яковлев Александр Сергеевич – доктор биологических наук, профессор*

Официальные оппоненты *Русаков Алексей Валентинович – доктор географических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Институт наук о земле, заведующий кафедрой почвоведения и экологии почв*

Сапожников Петр Михайлович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, факультет почвоведения ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра физики и мелиорации почв, ведущий научный сотрудник

Яковлева Людмила Вячеславовна – доктор биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет», заведующая кафедрой почвоведения, землеустройства и кадастров

Защита диссертации состоится «27» сентября 2022 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 (МГУ.03.05) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, аудитория М-2.

E-mail: tparamonova@soil.msu.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/453198768/>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Т.А. Парамонова

Общая характеристика работы

Разработка эталона почв, который может использоваться для оценки и нормирования её качества, на первый взгляд, прикладная задача. Однако она затрагивает такие фундаментальные вопросы почвоведения, как концепция пространства в почвоведении, концепция эволюции почв, концепция геохимии ландшафта. Несмотря на большое обилие разнообразных подходов к выбору эталонных участков, фоновых территорий, разработке эталонов на основе различных уравнений и моделей, данная задача до сих пор окончательно не решена ни в научной среде, ни на законодательном уровне.

Степень разработанности. Концепция «агроэкологических локальных моделей (региональных эталонов) состояния почвенного плодородия» была создана Д.С. Булгаковым в конце XX века (Булгаков, 1999). Разработку эталонов почв на землях сельскохозяйственного назначения осуществляли Булгаков Д.С., Славный Ю.А., Воронин Н.Я., Фрид А.С., Шишов Л.Л., Дурманов Д.Н. и др.

Появление персональных компьютеров и развитие информатики привело к тому, что в конце XX века появилось множество исследований, посвященных установлению оптимальных значений показателей почвенного плодородия и эталонов почв методами математического моделирования. Активное участие в этой работе принимали сотрудники Почвенного института В.В. Докучаева, сделавшие серию публикаций в Трудах почвенного института. Различные модели, предлагаемые исследователями, были объединены в общий банк математических моделей «ПЛОМОД».

Разработкой эталонов почв в границах особо охраняемых природных территорий для создания красных книг почв в различных субъектах РФ занимались Добровольский Г.В., Чернова О.В., Семенюк О.В., Богатырев Л.Г., Безуглова О.С., Севостьянова О.В., Горбунов Р.В., Ергина Е.И., Сикорский И.А., Лебедев Я.О., Хижняк Ю.С., Лисецкий Ф.Н., Замураева М.Е., Половинко В.В., Данильченко М.А., Околелова А.А., Желтобрюхов В.Ф., Егорова Г.С., Плеханова Л.Н. и др.

В настоящее время разработкой логико-математических моделей эталонов почв активно занимаются сотрудники Алтайского государственного аграрного университета: Кононцева Е.В., Хлуденцов Ж.Г. Пивоварова Е.Г., Кононова А.Ю., Федченко Л.А. Вепрынцева К.С., Аверьянова И.П., Попова Е. С., Домникова Е.Ю.

Использованная в работе макрокинетическая модель была предложена и впоследствии активно апробировалась на различных объектах Гендуговым В.М., Глазуновым Г.П., Евдокимовой М.В., Шулаковой Е.А., Яковлевым А.С.

Актуальность темы. Основной массив работ, по установлению почвенных эталонов на землях сельскохозяйственного назначения относится к 80-90 годам XX века. На сегодняшний день существенно расширились возможности использования вычислительной техники. Появились геоинформационные системы, программы статистической обработки массивов почвенных данных, открытые базы, содержащие данные дистанционного зондирования. В связи с этим подходы, использовавшиеся 20-30 лет назад требуют актуализации с учетом новых возможностей для проведения исследований.

Также следует отметить, что с изменением формы собственности на землю, исчезновением колхозов и совхозов, и изменением структуры землеустройства возникает необходимость в актуализации подходов к установлению региональных эталонов почв на землях сельскохозяйственного назначения. Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью корректировки существующих подходов к установлению эталонов почв и поиском новых методов, отвечающих современному уровню развития науки.

Цель работы: разработка подходов к установлению региональных эталонов почв для оценки и управления плодородием почв с учетом агрохимического и экологического аспектов.

Задачи работы:

1. Обобщить существующие подходы к установлению эталонов почв.
2. Сформировать комплексный банк данных почвенной информации для исследуемой территории, содержащий сведения об отборах проб, результаты

химических анализов, ретроспективный анализ архивных материалов, данные дистанционного зондирования и т.д.

3. Определить эталоны почв и оптимальные показатели почвенного плодородия для исследуемой территории применяя: картографические методы, методы численной таксономии (метод главных компонент), макрокинетическую модель, основанную на зависимости «доза-эффект», логико-математическую модель, ретроспективный анализ.

4. Провести сравнительный анализ полученных результатов. Определить применимость полученных эталонов для целей нормирования и оценки почв.

Объектом исследования являются почвы на землях сельскохозяйственного назначения на территории бывшего совхоза «Тихий Дон» в Куркинском районе Тульской области.

Предметом исследования является научная задача по установлению эталонов почв для исследуемого объекта.

Научная новизна. Для определения эталонов почв на землях сельскохозяйственного назначения впервые предложено использовать макрокинетическую модель отклика растительности в виде NDVI на показатели почвенного плодородия.

На основе построения картограмм обеспеченности почв элементами питания предложен пространственный интегральный индекс, позволяющий определить ареалы, в границах которых располагаются эталонные для данной территории почвы.

Научная и практическая значимость. Постановлением Правительства Российской Федерации от 13.02.2019 г. № 149 введено в действие «Положение о разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды», которое определило основные принципы разработки нормативов качества окружающей среды. Несмотря на то что для оценки качества почв для категории земель сельскохозяйственного назначения по химическим веществам устанавливаются гигиенические нормативы, для осуществления мониторинга

земель сельскохозяйственного назначения нерешенным остается вопрос установления фоновых и оптимальных значений показателей химического состояния почв.

В соответствии с ПП-149 значения (интервал допустимого отклонения от значений) показателей природного фона территорий могут определяться на основании информации и сведений, содержащихся в едином государственном фонде данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении, государственном водном реестре, государственном фонде недр, государственном лесном реестре, Едином государственном реестре недвижимости, фонде данных государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды). Представленные в работе результаты могут быть использованы при разработке подзаконных актов к Постановлению Правительства Российской Федерации от 13.02.2019 г. № 149.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в работе, состоит в подробном анализе и обобщении литературных источников, в планировании экспериментов, в получении фактических данных в ходе полевых и лабораторных работ (отбор проб, пробоподготовка, проведение исследований почвенных образцов, математическая обработка результатов, построение картограмм в ГИС), в написании статей (совместно с соавторами) в подготовке докладов на конференциях, и в составлении текста диссертации.

Работы [2,4] написаны без соавторов, в работе [3] вклад автора составляет 0,2 п.л. из 0,4 п.л., в работе [1] – 0,25 п.л. из 1,0 п.л.

Диссертационное исследование поддержано грантом Российского фонда фундаментальных исследований (Конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты») №20-34-90131.

Апробация работы. В общей сложности сделано 17 научных докладов (в том числе 4 пленарных) на международных и всероссийских конференциях.

Основные результаты работы апробированы на конференциях: Международной научной конференции XXIV Докучаевские молодежные чтения

«Почвоведение в цифровом обществе» (Санкт-Петербург, 2021); Международной научно-практической конференции «Обеспечение устойчивого развития в контексте сельского хозяйства, зелёной энергетики, экологии и науки о Земле» (Смоленск, 2021); Международной научной конференции XXIII Докучаевские молодежные чтения «Почва в условиях глобального изменения климата» (Санкт-Петербург, 2020); XXIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2020» (Москва, 2020); 21-ой Международной Пущинской школе-конференции молодых ученых (Пущино, 2017); Международной молодежной научной конференции «Почва и бобовые – симбиоз для жизни» (Москва, 2016); XXIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016» (Москва, 2016); Международной научной конференции XIX Докучаевские молодежные чтения «Почва – зеркало ландшафта» (Санкт-Петербург, 2016); 20-ой Международной Пущинской школе-конференции молодых ученых «Биология – наука XXI века» (Пущино, 2016); International Congress on "Soil Science in International Year of Soil" (Сочи, 2015).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 18 работ: 4 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в списки Scopus/RSCI, 2 статьи и журналах из перечня ВАК, 2 статьи в журналах РИНЦ, 1 монография и 2 учебных пособия (в соавторстве), 7 тезисов докладов на международных научных конференциях.

Благодарности. Автор выражает признательность научному руководителю, д.б.н., проф. Яковлеву А.С., д.б.н., проф. Глазунову Г.П., д.б.н. Макарову О.А., к.б.н. Карпухину М.М., к.б.н. Евдокимовой М.В. за ценные консультации; Борзилову К.В. и Колетвинову Д.С. за помощь в организации отбора проб, Огородниковой С.В. и Филипповой Л.М. за моральную поддержку.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Интегральный индекс обеспеченности, позволяющий определить ареалы почв, считающихся эталонными для данной территории. Реализация на

практике требования выбора «эталонной площадки» установленного Постановлением Правительства РФ №149.

2. Использование макрокинетического уравнения, основанного на зависимости «доза-эффект», для установления эталонов почв. С его помощью определяются оптимальные (эталонные) показатели плодородия для яровой пшеницы, произрастающей на исследуемой территории.

3. Комплексная оценка и определение эталонов почв возможна только с применением пула методов эталонирования: картографических методов, методов численной таксономии, макрокинетических и логико-математических моделей, ретроспективного анализа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 152 страницах, содержит 27 рисунков, 11 таблиц, 7 приложений на 26 листах. Список литературы включает 155 источников, в том числе 12 на иностранном языке.

Глава 1. Литературный обзор

В литературе отсутствует однозначное определение почвенного эталона. Одни исследователи допускают возможность выделения эталонов почв исключительно в границах ООПТ, другие, напротив, считают, что эталонные почвы можно определять на землях сельскохозяйственного назначения.

В главе 1 рассмотрено понятие эталона почв в отечественной и зарубежной литературе. Проанализированы и обобщены (рис. 1) подходы к установлению эталонов почв на землях особо охраняемых природных территорий и землях сельскохозяйственного значения.

Установлено, что в настоящее время для эталонирования почв применяются следующие подходы: экспертный подход, методы численной таксономии, ГИС-системы, математические модели. В качестве критерия почвенного эталона используются: почвы с преобладающей площадью, редкие почвы, степень окультуренности почв.

Для целей экологической оценки и нормирования качества почв и земель целесообразно ввести определения «естественного природного эталона почв» и «природно-антропогенного эталона почв».



Рис. 1. Методы определения эталонов почв

Глава 2. Объекты и методы исследования

В главе дана подробная почвенно-климатическая характеристика территории бывшего совхоза «Тихий Дон», расположенного в Куркинском районе Тульской области. Приведены данные о мониторинге за состоянием почвенного покрова исследуемой территории за период 1992–2019 годы. Отбор проб проводился в соответствии с «Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения» (2003). Определение значений рН в солевой вытяжке (ГОСТ 26483-85) проводились на потенциометре Hanna рН 211. Содержание органического углерода по методу Тюрина в модификации Никитина (ГОСТ 26213-91). Определение валового содержания тяжелых металлов проводилось в аккредитованной лаборатории методом атомно-адсорбционной спектроскопии

(«Руководство по санитарно-химическому исследованию почвы», 1993). Согласно архивным данным, в 2014 году лабораторные анализы проводились методами, рекомендуемыми для Нечернозёмной зоны. В 1992 году использовались следующие методы: рН электрометрически, гидролитическая кислотность по Каппену, сумма поглощенных оснований по Каппену, подвижный фосфор по Кирсанову, обменный калий по Бровкиной, гумус по Тюрину.

Особое внимание уделено рассмотрению методологии установления эталонов почв; предложено 4 подхода.

1). Картографические методы. Построение картограмм различных свойств почв проводилось с использованием программ QGis 3.10.14, Google EarthPro, SASplaneta. Исходными данными послужили оцифрованная почвенная карта совхоза «Тихий Дон» 1992 года и синтезы на основе космических снимков.

Для определения ареалов распространения почв, которые могут рассматриваться в качестве эталонных, в программе QGis3.10.14 была создана таблица атрибутов, содержащая информацию о координатах точек пробоотбора и результатах химических испытаний, характеризующих исследованные образцы. Методом обратно взвешенных расстояний строилась растровая поверхность, характеризующая то или иное почвенное свойство. Строилось псевдоцветное изображение, цвета на котором соответствовали разной степени обеспеченности почв. Растровое изображение переводилось в векторную форму с помощью инструментов оцифровки.

Далее была определена площадь ареалов с различной степенью обеспеченности. Пять картограмм (значений рН, содержания гумуса, содержания азота (NH_4), подвижного фосфора и обменного калия) были объединены в одну общую картограмму. Были получены контуры, характеризующиеся различными оценками степени обеспеченности. Все оценки степени обеспеченности были суммированы, получен общий балл обеспеченности, на основе которого проводилась интегральная оценка обеспеченности почв.

Интегральный индекс обеспеченности почв ($\text{ИИ}_{\text{общ}}$) предлагается рассчитать по формуле (1):

$$ИИ_{\text{общ}} = ИОБ_{\text{гумус}} + ИОБ_{\text{P}_2\text{O}_5} + ИОБ_{\text{K}_2\text{O}} + ИОБ_{\text{NH}_4} + И_{\text{pH}} \quad (1), \text{ где}$$

$ИОБ_{\text{гумус}}$, $ИОБ_{\text{P}_2\text{O}_5}$, $ИОБ_{\text{K}_2\text{O}}$, $ИОБ_{\text{NH}_4}$ – оценки степени обеспеченности почв гумусом, подвижным фосфором, обменным калием, азотом.

$И_{\text{pH}}$ – бальная оценка значений рН.

Разбиение значений интегрального индекса обеспеченности на три группы проводится следующим образом: если все исследуемые показатели имеют степень обеспеченности от средней и ниже, но суммарное значение интегрального индекса не может превышать 15 баллов.

Повышенная степень обеспеченности для 5-и исследуемых показателей дает степень обеспеченности в 20 баллов. Дальнейшее увеличение значений интегрального показателя возможно только за счет наличия высокой и очень высокой степени обеспеченности почв элементами питания. Максимально возможное значение интегрального индекса – 26 баллов.

Таким образом, предложенный индекс позволяет перейти от обеспеченности конкретными элементами питания, содержания гумуса и значения рН к интегральному индексу обеспеченности, имеющему следующие диапазоны: Низкая обеспеченность (9-15 баллов); Средняя обеспеченность (15-20 баллов); Высокая обеспеченность (20-26 баллов).

2) Метод главных компонент (ГК) позволяет уменьшить число переменных, выбрав самые изменчивые из них и перейти к новым переменным. Метод позволяет перейти от реальной системы координат (например, a_1, a_2, \dots, a_i) к новой системе координат (b_1, b_2, \dots, b_i). Новые координаты называются главными компонентами. Новые координаты выбираются так, чтобы главная компонента имела максимальную дисперсию. Следующая главная компонента выбирается так, чтобы она имела максимальную дисперсию из всех оставшихся компонент и т.д. (Мешалкина, Самсонова, 2008).

3) Логико-математический анализ. Впервые данный метод в почвоведение был введен Пузаченко Ю.Г. (1970). В основе этого подхода лежит утверждение, что «специфические состояния свойств почв определяют классификационные границы между подтипами» (Пивоварова, Вепрынцева,

2018). Для того чтобы определить, как классификационные границы связаны с тем или иным почвенным свойством «необходимо рассчитать коэффициент передачи информации (Кэфф), отражающий степень связи между фактором и явлением. По величине Кэфф можно установить таксономический вес каждого признака. Для каждого центрального образа (таксона) можно рассчитать специфичные (наиболее вероятные) состояния признаков (генетически обусловленных свойств почв). По набору этих параметров дается количественная характеристика таксона (типа, подтипа, рода) почв исследуемой территории» (Кононцева и др., 2018).

4) Макрокинетическая модель отклика индекса NDVI на оптимальные концентрации элементов питания. Материалы дистанционного зондирования в форме NDVI для однородных во всех отношениях (кроме химического состава почвы) площадок пробоотбора, анализировали с использованием макрокинетической модели:

$$q = \Lambda c^{-B} \exp\left(\frac{K}{c}\right). \quad (2)$$

где:

Λ – масштабирующий коэффициент;

K – коэффициент, характеризующий интенсивность возрастания фотосинтетически активной биомассы (NDVI) в ответ на рост показателя концентрации, c (мг/кг),

B – коэффициент, характеризующий интенсивность убывания фотосинтетически активной биомассы.

В качестве оценки расчетного максимума NDVI использовали максимальные за вегетационный сезон наблюдаемые значения по материалам Sentinel-2 от 13.06.2019 г. из источника BEGA-Science.

Для нахождения значений коэффициентов уравнения был применен метод наименьших квадратов. Практически он реализуется с помощью специального алгоритма, написанного на языке программирования Python 3, с применением библиотек SciPy, NumPy, Pyeq3 и Matplotlib.

Особые точки модели, которые разделяют кривые отклика на интервалы, характеризующиеся сходством макроскопической кинетики, были найдены при помощи анализа коэффициентов модели, производных первого, второго и третьего порядка по z и c для модели. Для работы применялся пакет программ компьютерной алгебры Maxima. Цифровую модель рельефа построили по материалам радарной съемки SRTM с использованием QGIS 3.18.1.

Найдя константы и особые точки уравнения (2), определили оптимальные значения показателей плодородия почв, а также диапазоны их фоновых значений. Точке максимума модели c_4 соответствуют оптимальные значения показателей.

Глава 3. Эталоны почв для территории бывшего совхоза «Тихий Дон»

В главе приведены результаты применения различных подходов установления эталонов почв.

3.1. Эталоны почв по картограммам обеспеченности элементами питания

По содержанию гумуса на исследуемой территории преобладают среднегумусные черноземы (Рис. 2). Ареалы малогумусных и тучных черноземов имеют очень маленькую площадь.

На западе исследуемой территории выделен крупный участок с содержанием гумуса 7-9%. Большая часть территории характеризуется содержанием гумуса 5-7%.

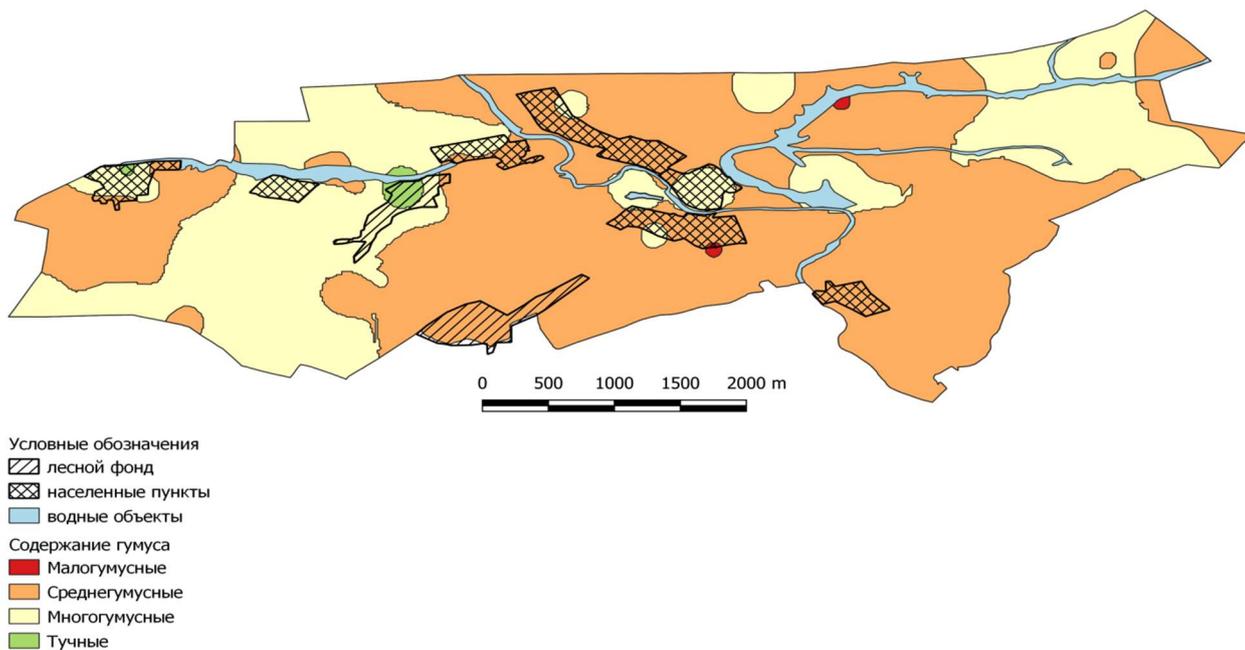


Рис. 2. Картограмма содержания гумуса

Более половины исследуемой территории (51%) характеризуется значением рН больше 6 (Рис.3). Примерно одинаковую площадь занимают почвы со значением рН в интервалах 5.1 – 5.5 и 5.5. – 6.0 (по 24%).

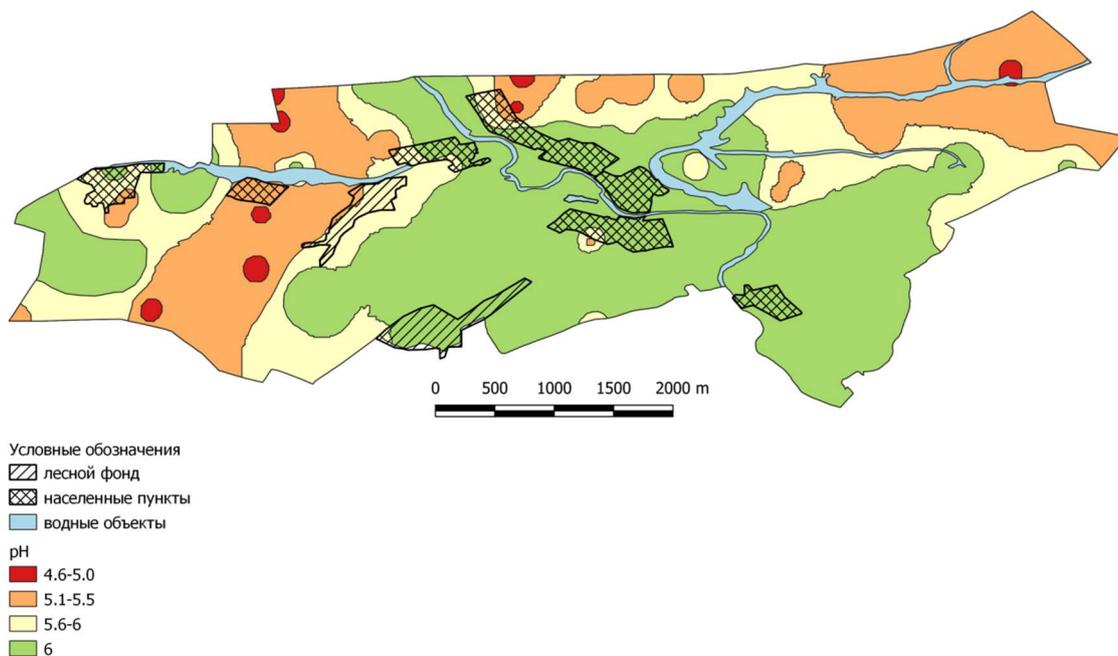


Рис. 3. Картограмма распределения показателей рН (солевая вытяжка)

Видна закономерность, что в ареалах, почвы которых характеризуются как многогумусные (ареалы в западной и северо-восточной частях картограммы, содержание гумуса 7-9%) значения рН (4,6-5,5) ниже, чем на большей части исследуемой территории (6,0). Данная закономерность может быть объяснена тем, что почвы со значительным содержанием гумуса являются более кислыми, поскольку хуже связывают кальций.

Наблюдается высокая неоднородность исследуемой территории по содержанию азота (Рис.4). Наибольшую площадь занимают территории со средним (25%) и высоким (21%) содержанием азота. Примерно одинаковую площадь занимают территории с очень низким и повышенным содержанием азота (16% и 17% соответственно). Очень низким содержанием азота характеризуется 15% исследуемой территории, а очень высоким всего 6%.

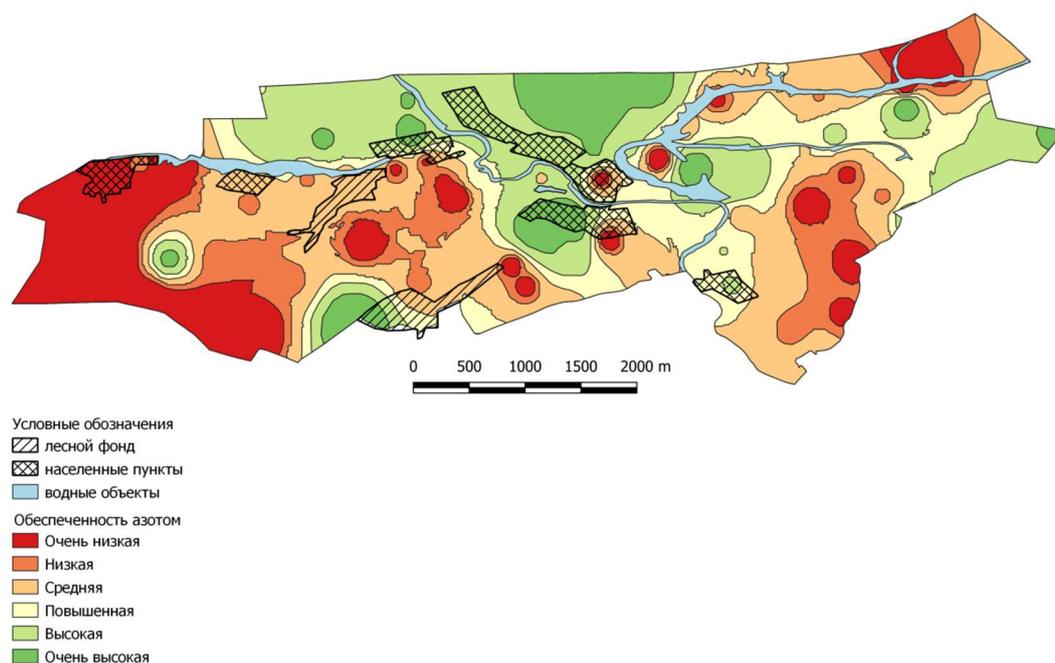


Рис. 4. Картограмма обеспеченности исследуемой территории азотом (NH_4)

Ареал с самым низким содержанием азота расположен на западе исследуемой территории. Участки с высоким содержанием азота сосредоточены в центре картограммы ближе к пойме реки Дон.

Территория бывшего совхоза «Тихий Дон» характеризуется повышенной (42%) и средней (35%) степенями обеспеченности доступными формами фосфора (Рис. 5). На ареалы с низкой и высокой степенью обеспеченности приходится 2-3% от площади.

При этом очень высокой степенью обеспеченности характеризуется 18% территории, что может говорить о нерациональном применении удобрений и зафосфачивании отдельных территорий. Самые высокие концентрации зафиксированы в центре исследуемой территории.

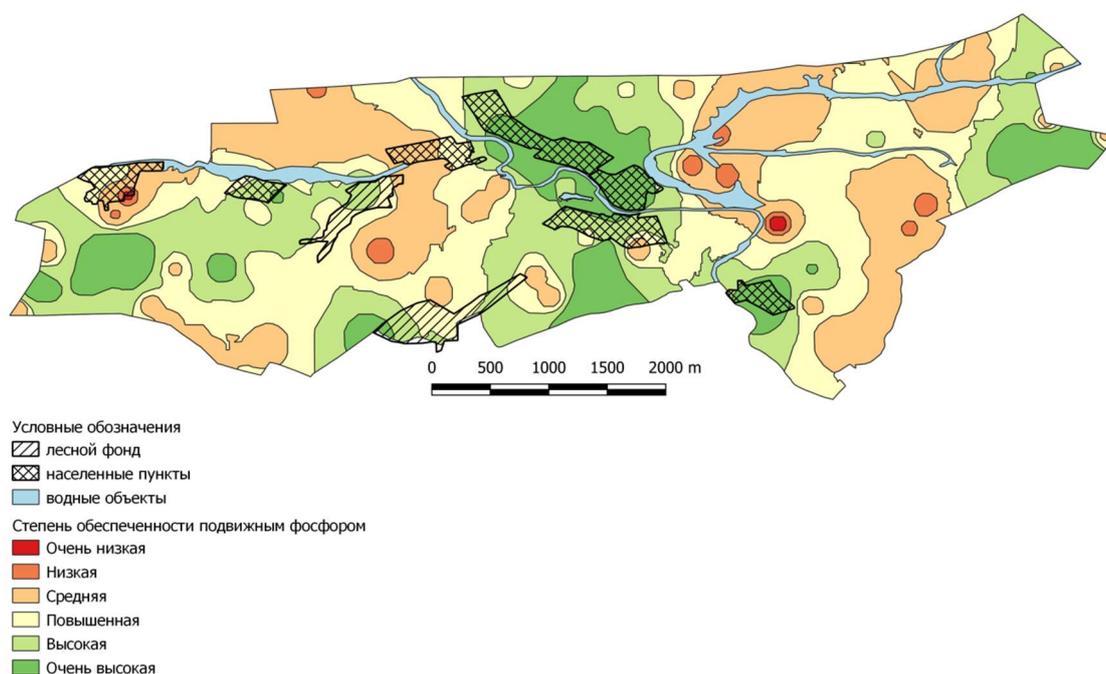


Рис. 5. Картограмма обеспеченности исследуемой территории подвижным фосфором (P_2O_5)

Исследуемая территория имеет хорошую обеспеченность калием (Рис 6).

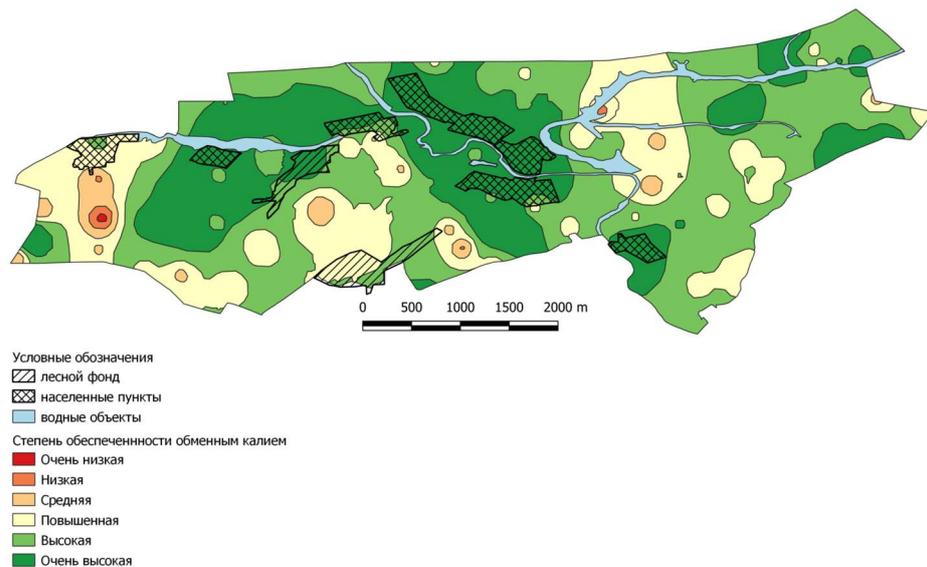


Рис. 6. Картограмма обеспеченности исследуемой территории обменным калием (K_2O)

Около трети территории (32%) имеет очень высокую степень обеспеченности, 42% – высокую, 24% – повышенную. На остальные градации шкалы обеспеченности приходится всего 2%.

63,9% территории имеют среднюю обеспеченность по исследуемым показателям. Низкой обеспеченностью характеризуется 15,8% территории, на данных участках можно рекомендовать применение агротехнических приёмов для повышения плодородия почв. 20,3% исследуемой территории имеет высокую степень обеспеченности элементами питания и является локальным эталоном почв (Рис.7).

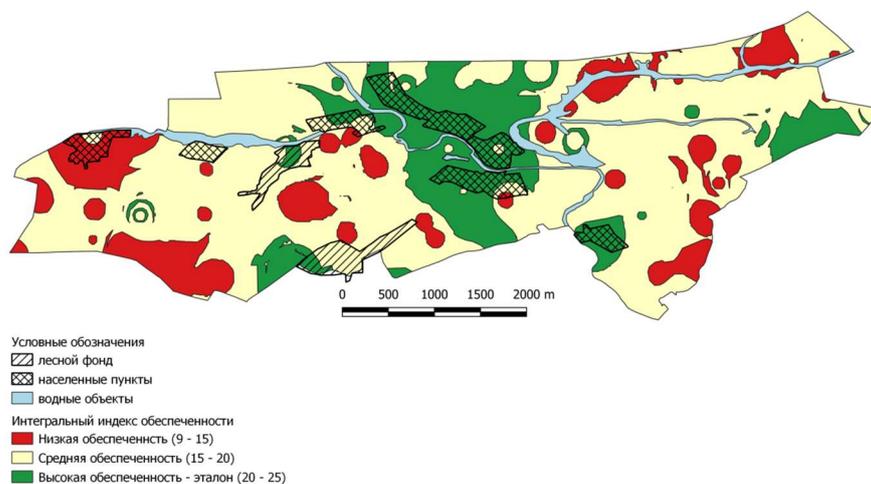


Рис.7. Картограмма интегрального индекса обеспеченности почв

Таким образом, представленный подход позволил определить пространственное расположение почв, которые для исследуемой территории могут быть приняты в качестве эталонных.

3.2. Метод главных компонент

Проекция точек пробоотбора на факторную плоскость (Рис.8) показывает, что два фактора описывают 61% дисперсии. Точки на графике обозначают пробы почв, относящиеся к различным почвенным разностям.

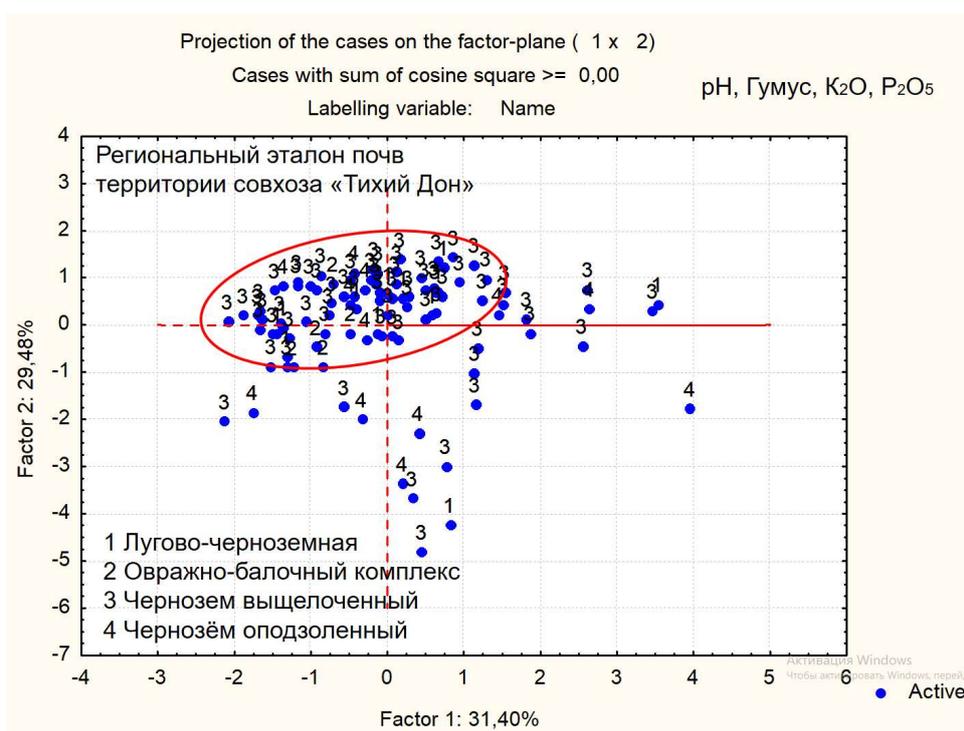


Рис. 8. Проекция изучаемых почв на факторную плоскость

Для установления эталонов почв метод главных компонент может использоваться 2-мя способами: 1) Если по результатам измеренных характеристик новые мониторинговые точки не попадают в «облако точек» характерной для них таксономической группы, можно говорить об отклонении данной почвы от эталона. 2) Значения физических и химических характеристик почв, составляющих «облако точек» могут являться граничными значениями, с которыми должны сравниваться новые результаты мониторинга.

3.3. Логико-математический анализ

Содержание гумуса имеет одно из самых низких значений $K_{эфф}$ (Табл. 1). Это объясняется тем, что с одной стороны в пределах одной классификационной почвенной единицы выделяются почвы разной степени гумусированности. С другой стороны, многолетнее сельскохозяйственное освоение территории приводит к тому, что верхний почвенный горизонт ($A_{пах}$) различных почв перемешивается при распашке полей. В пределах одного поля на котором присутствуют разные почвы он гомогенизируется. Этот вывод подтверждается результатами, полученными Е.Г. Пивоваровой, К.С. Вепрынцевой (2018).

Табл. 1. Значения коэффициента передачи информации ($K_{эфф}$) и суммы произведений вероятности ранга v_j на количество информации, содержащееся в этом ранге (Т)

Показатели	Т	$K_{эфф}$
Рельеф	1,9028	0,8903
Сu кг/кг	0,3246	0,1803
Са кг/кг	0,3096	0,1748
P ₂ O ₅ кг/кг	0,2923	0,1672
Mg кг/кг	0,3024	0,1598
N-NH ₄ кг/кг	0,2602	0,1563
K ₂ O кг/кг	0,2740	0,1550
Mn кг/кг	0,2693	0,1496
В кг/кг	0,2530	0,1290
гумус кг/кг	0,1895	0,1101
Zn кг/кг	0,1867	0,1070

Наибольший информационный вклад в классификационные единицы почв вносит рельеф. Вклад других показателей, по сравнению с рельефом значительно меньше. В целом показатели химического состояния почв исследуемой территории имеют невысокий таксономический вес. Мы связываем это с тем, что

верхний горизонт почв исследуемой территории слабо дифференцирован по химическим свойствам.

На наш взгляд, именно об этом говорил И.А. Соколов (1993), отмечая, что соседи всегда ближе друг к другу, чем к своему собственному центральному образу.

На основе значений $K_{эфф}$ была разработана качественная модель диагностики почв (3):

$$\text{Эталон} = Rv(Cu \wedge (P \boxtimes Ca(K \boxtimes Mg \boxtimes N(Mn \boxtimes (Bv(Hum \boxtimes Zn)))))) \quad (3)$$

Примечание. R, Cu, P, Ca, K, Mg, N, Mn, B, Hum, Zn – ранг почвенного эталона в зависимости от положения в рельефе, концентрации меди, подвижного фосфора, кальция, обменного калия, магния, азота, марганца, бора, содержания гумуса, концентрации цинка, соответственно;

\wedge – знак дизъюнкции;

v – знак конъюнкции;

\boxtimes – знак логической функции нелинейного произведения.

Чтобы диагностировать реальные почвы, требуется фактические значения показателей, характеризующих почвы, перевести в ранговые. Предложенная информационно-логическая модель может использоваться для целей агроэкологического мониторинга.

3.4. Отклик сельскохозяйственных культур на оптимальные значения показателей почвенного плодородия

Расчет констант и особых точек уравнения (2) позволил определить оптимальные концентрации элементов питания в почвах. Расположение точек пробоотбора для совокупности полей представлено на рис. 9 (карта построена в QGIS). Культура, произрастающая на полях – яровая пшеница.

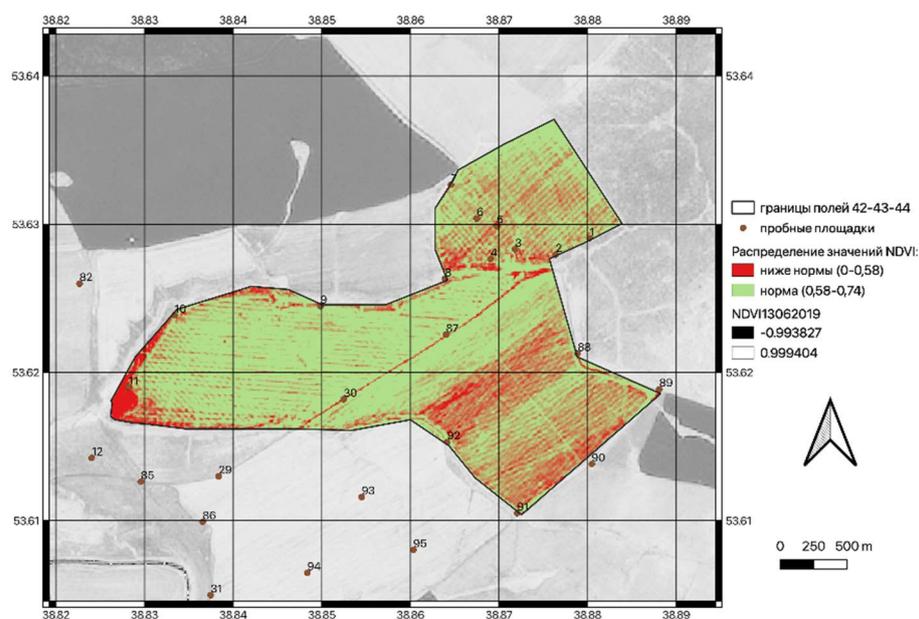
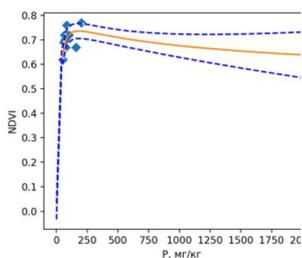


Рис. 9. Расположение пробных площадок в рельефе

Методической проблемой предложенного подхода является возможное засорение полей, при котором откликом NDVI становится не отклик культурных растений, а совокупность отклика культурных растений и сорной растительности. Согласно данным полевых обследований, содержащихся в карточке муниципального района Куркинский подготовленной Плавским ЦХСР доля засоренных полей в районе, составляет 2,97% от общей площади. При визуальном осмотре полей, засоренности, способной исказить результаты оценки, выявлено не было.

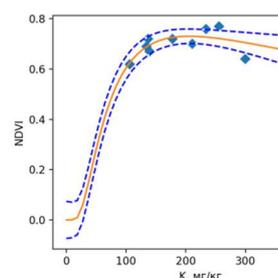
Следующей методологической проблемой является то, что разные сельскохозяйственные культуры имеют разную потребность в элементах питания, поэтому установление эталона почв по отклику растительности становится затруднительным. Для решения этой проблемы необходимо рассмотреть структуру посевных площадей территории, для которой устанавливается почвенный эталон. По данным Росстата (2012-2020 гг.) в среднем 50% пашни ежегодно занято под пшеницу (озимую и яровую); 77% площади в среднем ежегодно занимают зерновые культуры. Таким образом, с учетом сложившейся в районе системы землепользования, обоснованным является установление эталонов почв для преобладающих культур – зерновых.

Применение уравнения (2) позволило построить модели для показателей плодородия и интегрального показателя (z) представленные на рис. 10. Точки на рисунках соответствуют пробным площадкам, сплошные линии – уравнению (1), RMSE – среднеквадратическая ошибка. Для демонстрации точности модели на рисунках приведены пунктирные линии, характеризующие область значений 95% доверительных интервалов.



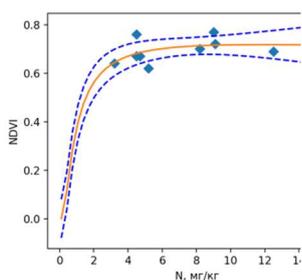
RMSE=0,03

$R^2= 0,46$



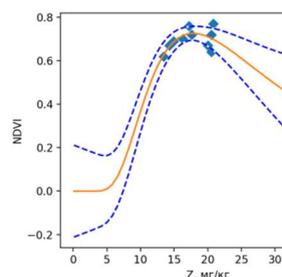
RMSE=0,03

$R^2= 0,51$



RMSE=0,04

$R^2= 0,25$



RMSE=0,04

$R^2= 0,40$

Рис. 10. Зависимость вегетационного индекса NDVI, от концентрации в почве N, P, K и всех исследованных элементов.

Доказана возможность применения теоретической модели отклика культурных растений на значения показателей почвенного плодородия для установления оптимальных (эталонных) значений для исследуемой территории. Оптимальные показатели плодородия для яровой пшеницы на исследованных полях составляют: 12,0 мг/кг азота, 178 мг/кг подвижного фосфора, 205 мг/кг обменного калия. Содержание цинка, меди и магния в почвах оказывает существенно меньшее влияние на урожай, по сравнению с элементами питания.

Выводы

1. Сформулировано определение эталона почв на землях сельскохозяйственного назначения. **Эталон почв** – это пространственная или математическая модель, отражающая совокупность почвенных свойств, характеризующихся оптимальными значениями для исследуемой территории или для преобладающих сельскохозяйственных культур, установленная специфическими методами эталонирования.

2. Оптимальные показатели плодородия для яровой пшеницы, произрастающей на исследуемой территории, установленные с помощью макрокинетической модели, составляют: 12,0 мг/кг азота, 178 мг/кг подвижного фосфора, 205 мг/кг обменного калия.

3. Для практической реализации норм установленных Постановлением правительства №149 эффективнее всего применять интегральную оценку обеспеченности территории элементами питания. Установлено, что эталонные почвы находятся в центре исследуемой территории.

4. Логико-математический анализ показывает, что для исследуемых почв ключевым фактором дифференциации почвенных разностей является рельеф. Показатели плодородия вносят значительно меньший вклад в коэффициент передачи информации, поскольку пахотный горизонт территории бывшего совхоза «Тихий Дон» в высокой мере гомогенизирован.

5. Метод главных компонент показывает, что относящиеся к разным типам и подтипам пробы почв отобранные в 2019 году образуют на факторной плоскости общее «облако точек» включающее 85% исследованных образцов. По сравнению с 1992 годом, пахотный горизонт исследуемой территории характеризуется меньшей пространственной неоднородностью.

6. Для комплексной оценки и определения эталонов почв исследуемой территории необходимо использовать весь пул представленных методов: картографические методы, методы численной таксономии (метод главных компонент), макрокинетическую модель, основанную на зависимости «доза-эффект», логико-математическую модель, ретроспективный анализ. Выбор

методов установления эталонов почв исследуемой территории должен быть обусловлен целями и задачами проводимых работ по оценке и нормированию. В зависимости от цели работ набор методов может различаться.

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.5.19 (03.02.13) – Почвоведение

1. Яковлев А.С., Макаров О.А., Евдокимова М.В., **Огородников С.С.** Деградация земель и проблемы устойчивого развития // Почвоведение. – № 9. – 2018. – с. 1167-1174. DOI: 10.1134/S0032180X18090149 (2-летний IF РИНЦ 2018: 1,478. 1 п.л.)

2. **Огородников С.С.** Определение эталонных участков на землях сельскохозяйственного назначения // Агрехимический вестник. – № 6. – 2021. – с. 90-92. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-6-018 (2-летний IF РИНЦ 2020: 0,475. 0,3 п.л.)

3. **Огородников С.С.** Яковлев А.С., Евдокимова М.В. Определение эталонных значений показателей почвенного плодородия на основе зависимости «доза-эффект» // Плодородие. – № 6. – 2021. – с. 6-9. DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.02 (2-летний IF РИНЦ 2020: 0,688. 0,4 п.л.)

4. **Ogorodnikov S.S.** Land degradation neutrality in the Tula region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — no. 723. — P. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042053 (SJR 2020: 0,18. 0,37 п.л.)

Иные публикации:

Всего по теме диссертации опубликовано 18 работ, полный список имеется на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/profile/Ogorodnikov/>