

На правах рукописи



Хакунова Елена Мухадиновна

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ И АГРОГЕННЫХ
ГОРНЫХ ЧЕРНОЗЁМОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА**

1.5.15. Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Нальчик – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова Российской академии наук
и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук

Научный руководитель: **Горобцова Ольга Николаевна**,
кандидат биологических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки Институт
экологии горных территорий им. А.К. Темботова
Российской академии наук, лаборатория почвенно-
экологических исследований, заведующая

Официальные оппоненты: **Тихомирова Елена Ивановна**,
доктор биологических наук, профессор, Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
Институт урбанистики, архитектуры и строительства,
кафедра экологии и техносферной безопасности,
заведующий

Самофалова Ираида Алексеевна,
доктор биологических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Пермский государственный
аграрно-технологический университет имени академика
Д.Н. Прянишникова», кафедра агрохимии и
почвоведения, профессор

Защита диссертации состоится **18 декабря 2025 г. в 15:00** на заседании
диссертационного совета ЮФУ801.01.14 по биологическим наукам на базе Академии
биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета по
адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194/1, к. 712.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им.
Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону,
ул. Зорге, 21 Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1346209/>

Автореферат разослан «___»_____ 2025 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием даты, полностью ФИО, учёной степени
со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-
mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-
Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 804, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.14
Тимошенко А.Н., а также в формате pdf на e-mail: atimoshenko@stefu.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимошенко Алёна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Изучение биологических свойств почв предгорий – продолжение комплексных фундаментальных исследований, направленных на экологическую оценку состояния почвенного покрова Центрального Кавказа.

Горные чернозёмы расположены на границе предгорий и горных территорий (500-1500 м над ур. м.). Эти уникальные, высокоплодородные почвы образовались и функционируют на территории Центрального Кавказа в условиях пояса луговых степей и остепнённых лугов эльбрусского варианта поясности (Соколов, Темботов, 1989). Они занимают площадь 845 км² и активно используются под пашню, многолетние насаждения, сенокосы и пастбища. При пахотном использовании происходит интенсивное влияние на основные режимы и свойства почвы. В научной литературе, посвящённой описанию горных чернозёмов, представлены сведения, описывающие их генетические особенности (СевКавНИИгипрозем, 1984; Молчанов, 2003, 2010), физические и химические свойства (Кумахов, 2007; Молчанов и др., 2017). Однако, до сих пор не были подробно изучены различные аспекты биологических свойств горных чернозёмов на Центральном Кавказе. Не проводили оценку биологической активности этих почв в естественных и агрогенных условиях, поэтому вопрос о степени её изменения при пахотном воздействии горных чернозёмов оставался открытым.

Биологические свойства почвы, обеспечивающие стабильность функционирования почвенной системы, первыми реагируют на изменения условий почвообразования или антропогенное воздействие (Казеев и др., 2004). Определение биологических параметров горных чернозёмов (таких как активность почвенных ферментов, микробиологические показатели) не только дополняют сведения об этих почвах необходимыми данными, но и является основой мониторинга состояния почвенного покрова предгорий Центрального Кавказа, в условиях изменения климата и роста антропогенного воздействия.

Горно-луговые чернозёмовидные почвы на исследуемых территориях залегают в комплексах с горными чернозёмами и отдельными массивами. Они являются сенокосами и пастбищами, так как особенности генезиса и расположения затрудняют их использование под пашню. Исследование биологических свойств горно-луговых чернозёмовидных почв стало необходимой частью работы при формировании картографических моделей, отражающих структуру почвенного покрова и пространственную вариабельность изученных показателей в предгорных районах Центрального Кавказа.

Созданная в результате проведённых исследований многослойная интерактивная картографическая модель является одновременно и базой данных. Каждый пиксель представленной модели несёт информацию о географических координатах, классификационной принадлежности почвы на уровне подтипа, наличии или отсутствии пахотного воздействия и содержит оценочную характеристику каждого из девяти контролируемых показателей, характеризующих важнейшие физико-химические и биологические свойства почвы. Отдельный слой картографической модели отображает изменение общего уровня биологической активности почв исследуемых территорий.

Представленный в работе оригинальный информационный продукт создан на основе методики, сочетающей совместный анализ фактических данных о почвах (обучающая выборка) с ландшафтными характеристиками, полученными из независимых источников измерения (данные дистанционного зондирования Земли)

(Пузаченко и др., 2006; Корзников и др., 2020). Полученный информационный продукт является эффективным инструментом, который может быть использован для оценки состояния почвенного покрова Центрального Кавказа, а также решения целого ряда научных и практических задач.

Актуальность вопросов контроля и оценки состояния пахотных почв возрастает по мере интенсификации сельского хозяйства и увеличения площади почв, испытывающих на себе высокую степень агрогенной нагрузки. В России площадь деградированных земель сельскохозяйственного назначения составляет около 130 млн га и ежегодно эта цифра увеличивается в среднем на 1 млн га (Кулик и др., 2020). По мнению ФАО (<http://www.fao.org/news/story/ru/item/1148827/icode/>), наиболее серьезными общемировыми проблемами являются потеря почвами органического углерода и дисбаланс питательных веществ. Негативным процессам подвержены и наиболее продуктивные почвы Центрального Кавказа - горные черноземы, устойчивость которых при сельскохозяйственном использовании снижается из-за особых условий, характерных для горных ландшафтов. Высокая чувствительность биологических параметров к агрогенному воздействию обуславливает их эффективность для экологического контроля и мониторинга состояния пахотных почв.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – на основе физико-химических и биологических параметров дать комплексную оценку современному состоянию, антропогенной динамике и пространственной изменчивости горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв предгорий Центрального Кавказа.

Задачи исследования:

- 1) изучить изменчивость физико-химических и биологических показателей в профилях естественных и агрогенных горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв предгорий Центрального Кавказа;
- 2) установить интегральные показатели эколого-биологического состояния исследуемых почв и оценить влияние пахотного использования на общий уровень биологической активности горных чернозёмов;
- 3) разработать картографические модели пространственной изменчивости физико-химических и биологических параметров естественных и агрогенных почв;
- 4) построить и верифицировать интерактивную картографическую модель, отражающую современное состояние почвенного покрова предгорной части Центрального Кавказа на площади 1785 км².

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что впервые проведены исследования, направленные на определение комплекса микробиологических и биохимических показателей, позволяющих установить и оценить уровень биологической активности различных подтипов естественных и агрогенных горных чернозёмов и, залегающих в комплексах с ними, горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа. Для оценки общего уровня биологической активности исследуемых почв определены интегральные эколого-биологические показатели, которые объединяют в себе комплекс параметров, характеризующих интенсивность, происходящих в почве микробиологических и биохимических процессов. На основе новых сведений о биологических свойствах почв предгорий Центрального Кавказа, с использованием данных дистанционного зондирования и статистических методов, сформирована интерактивная картографическая модель, которая является новым информационным продуктом. Созданная модель состоит из пикселей, которые представляют собой квадраты со стороной 90 м. Каждый пиксель содержит достоверную информацию о географических

координатах, типе (подтипе) почвы и наличии пахотной обработки, а также оценку (низкая, средняя, высокая) 9 почвенных показателей, включая уровень биологической активности на данном участке.

Теоретическая и практическая значимость работы. Созданная интерактивная картографическая модель является одновременно базой данных, которая может эффективно использоваться для административно-хозяйственных целей при планировании и организации землеустроительных и мелиоративных мероприятий. Визуальное отображение собранной информации делает удобным применение данных о пространственном варьировании, отображённых в различных слоях модели почвенных показателей при внедрении в хозяйствах Республики принципов точечного земледелия, направленных на оптимизацию агротехники, улучшение качества обработки почв и повышение урожаев. Методические подходы, использованные в данной работе, позволяют на основе комплекса биологических показателей осуществлять мониторинговые программы и контроль за состоянием пахотных горных чернозёмов, определять допустимый уровень антропогенной нагрузки на почвенный покров в условиях горных ландшафтов и, тем самым, способствовать сохранению высокоплодородных почв Центрального Кавказа.

Методология и методы исследования. Методология включает обзор и анализ литературных сведений по теме работы, постановку цели, задач и основных защищаемых положений, организацию полевых исследований, направленных на изучение структуры почвенного покрова, заложение и описание полнопрофильных почвенных разрезов, отбор почвенных образцов, проведение лабораторно-аналитических исследований, статистическую обработку полученных данных, сбор и обработку информации со спутников (Landsat 8) и глобальных баз данных (SRTM, WorldClim), осуществление всех этапов моделирования, анализ и верификацию полученных моделей. Основой моделирования послужил анализ взаимосвязей между установленными почвенными параметрами и пространственной информацией, характеризующей растительность, рельеф и климат Центрального Кавказа. В работе использованы методы полевых исследований (почвенные и геоботанические), статистические методы (описательная статистика, корреляционный анализ, t-критерий Стьюдента для независимых выборок), методы моделирования и визуализации моделей (дискриминантный анализ и пространственный анализ).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сельскохозяйственное использование горных чернозёмов Центрального Кавказа приводит к негативным изменениям свойств пахотных и подпахотных горизонтов: процессам дегумификации, ослаблению активности почвенных ферментов и микроорганизмов, снижению общего уровня биологической активности (на 36%), а, следовательно, вызывает ухудшение их экологического состояния и падение ресурсного значения.

2. Современное состояние естественных горно-луговых черноземовидных почв является стабильным, установленные интегральные показатели эколого-биологического состояния свидетельствуют о сохранении ими высокого природного потенциала, который может стать основой для развития туристско-рекреационной сферы в экономике региона.

3. Созданная интерактивная картографическая модель адекватно (средняя точность 68%) описывает структуру и свойства почвенного покрова на площади 1785 км² и является эффективным инструментом, необходимым для решения научных, экологических и хозяйственных проблем региона.

Степень достоверности результатов.

Использование традиционных методов экологических исследований, современных методов статистической обработки информации и картографического моделирования в сочетании со значительным объемом первичных полевых данных позволяет говорить о достоверности полученных результатов и выводов.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были доложены на научной конференции «Ломоносов» (Москва, 13-17 апреля 2015 г.), научной конференции XX, XXI «Докучаевские молодежные чтения» (Санкт-Петербург, 1-4 марта 2017 г.; 28 февраля – 3 марта 2018 г.); «Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность» (Нальчик, 22 марта 2018 г.); VI, VII, VIII, IX Всероссийской конференции с международным участием «Горные экосистемы и их компоненты» (Нальчик, 11-16 сентября 2017 г.; 15-20 сентября 2019 г.; 12-17 сентября 2021 г.; 22-28 сентября 2024 г.); II, III Международная научная конференция «Современное состояние чернозёмов» (Ростов-на-Дону, «ЮФУ» 2018, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликована 31 научная работа, в том числе 4 – в журналах, включенных в перечень периодических научных изданий ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 10 статей – в научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, содержащего 267 работ, из которых 69 иностранных источников. Объем работы – 147 страниц, в том числе 35 рисунков и 20 таблиц.

Личный вклад автора. Исследования в рамках диссертационной работы проводились автором лично в 2016-2023 гг. Организация и проведение полевых работ (2016-2023 гг.), пробоподготовка, аналитические определения, статистический анализ полученных материалов, построение картографических моделей, обобщение и интерпретация полученных результатов выполнены автором при корректирующем и направляющем участии научного руководителя, с помощью сотрудников лаборатории почвенно-экологических исследований ИЭГТ РАН. Автор лично представлял результаты исследований на научных мероприятиях, перечисленных выше.

Финансовая поддержка работы. Исследование выполнено при поддержке Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета ("Приоритет-2030"), а также при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова» РАН в рамках Государственных заданий Рег. № 01201456902, Рег.№ АААА-А19-119022890027-1, Рег. № 124020600027-6.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность и глубокую благодарность за оказанную помощь, руководство и поддержку в подготовке диссертации научному руководителю зав. лабораторией почвенно-экологических исследований ИЭГТ РАН, к.б.н, доценту О.Н. Горбцовой; искреннюю признательность за всестороннюю помощь, ценные советы и рекомендации на всех этапах исследования – член-корр. РАН Ф.А. Темботовой; за помощь при освоении методик обработки ДДЗ и почвенного картографирования – к.б.н., Р.Х. Темботову; за совместную работу, ценные консультации и поддержку – всем сотрудникам лаборатории почвенно-экологических исследований и ИЭГТ РАН.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. Литературный обзор

В пяти подглавах представлен обзор отечественной и зарубежной литературы по теме исследования.

ГЛАВА 2. Природно-климатические условия почвообразования и почвы района исследований

Район исследования занимает площадь 1785 км² в предгорной части Кабардино-Балкарии (500-1500 м над ур. м.), расположен в границах 43°54'802" – 43°88'910" с. ш.; 43°44'530" – 42°08'068" в. д.. Он охватывает предгорья эльбрусского варианта поясности, а именно: пояс луговых степей (от 400-500 до 700-800 м над ур. м.), пояс остепненных лугов (от 600-700 до 1500 м над ур. м.) и нижнюю границу субальпийского пояса (до 1700 м над ур. м) (Горобцова и др., 2018). При проведении настоящего исследования использовали картографические материалы (СевКавНИИгипрозем, 1984; Молчанов и др., 1990), с помощью которых выделили и описали в районе исследования три подтипа горных чернозёмов (Luvic Chernozems Pachic, WRB, 2022): обыкновенные, типичные и выщелоченные.

Рельеф Кабардино-Балкарии чрезвычайно сложный и разнообразный, поэтому на территории Республики выделяют равнинную, предгорную, горную и высокогорную части (Фиапшев, 1975). Наклонная аллювиально-аккумулятивная Кабардинская равнина, повышаясь к западу и юго-западу, постепенно переходит в предгорья, которые неширокой полосой тянутся в том же направлении, что и горы.

Климатические условия, при которых функционируют горные чернозёмы (данные по с. Каменноостское, 821 м над ур. м.), характеризуются среднегодовой температурой воздуха +7,80С. Осадков выпадает в среднем 560-700 мм/год, испаряемость 707 мм/год, продолжительность безморозного периода- с марта по ноябрь. Сумма среднесуточных температур (более +100С) за период активной вегетации (174-177 дней) составляет около 30000 (<https://ru.climate-data.org/>).

ГЛАВА 3. Материалы и методы исследований

Объектом исследования являются описанные выше различные подтипы горных чернозёмов (Luvic Chernozems Pachic, WRB, 2022) и горно-луговых чернозёмовидных почв (Mollic Leptosols Eutric, WRB, 2022), расположенных в поясе луговых степей (от 400–500 до 700-800 м над ур. м.) и остепнённых лугов (от 600-700 до 1500 м над ур. м.) эльбрусского варианта поясности.

Горные чернозёмы, локализованные на платообразных возвышенных формах рельефа, как правило, обладают полноценно сформированным профилем с выраженной морфогенетической дифференциацией горизонтов. Выровненные участки, а также слабонаклонные поверхности преимущественно находятся под сельскохозяйственным использованием, что обуславливает их интенсивную трансформацию. На склонах различной крутизны горные чернозёмы нередко демонстрируют укороченную,

эрозионно трансформированную структуру профиля, что в наибольшей степени проявляется в зонах интенсивной пахоты. Воздействие эрозионных процессов особенно значимо для обработанных горных чернозёмов, что неоднократно отмечалось в исследованиях по почвенной деградации (Каштанов и др., 2004; Темботов, 2024).

Горно-луговые чернозёмовидные почвы расположены на склонах различной крутизны в нижней части субальпийского пояса, нередко в комплексах с горными чернозёмами. В ареале распространения горных чернозёмов они чаще всего занимают отрицательные формы рельефа и функционируют в более влажных условиях, промывного и периодически промывного водного режима ($KУ=1-3$) (Горобцова и др., 2023). Глубокое воздействие на процессы почвообразования описываемых почв оказывает карбонатность материнских пород: элювио-делювий известняков и известковистых песчаников (Зонн, 1940; Солдатов, 1956; Кисриев, Керимханов, 1967; СевКавНИИгипрозем, 1984; Фиапшев, 1996).

При изучении горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа применяли системный, профильно-генетический и сравнительно-географический подходы, единообразие методик и методов исследования. При оценке состояния исследуемых естественных и пахотных почв учитывали широкую пространственную вариабельность биологических показателей. Применяемые подходы и методы разработаны ведущими специалистами и доказали свою эффективность при экологической оценке состояния как естественных, так и антропогенно нарушенных почв (Вальков и др., 1999, 2002; Казеев и др., 2003, 2004; Колесников и др., 2006, 2010).

Аналитические методы исследования: важнейшие почвенные параметры – влажность и плотность почв, рН почвенной суспензии, содержание гумуса (% по методу Тюрина в модификации Никитина), активность почвенных ферментов (каталазы, дегидрогеназы, инвертазы, уреазы, фосфатазы) определяли общепринятыми методами (Аринушкина, 1962, Галстян, 1980). Скорость базального дыхания (БД), скорость субстрат-индуцированного дыхания (СИД), содержание углерода микробной биомассы (Смик) определяли в соответствии с разработками (Anderson, Domsch, 1978; Ананьева и др., 2011). Для определения общего уровня БА использовали методику расчета интегрального показателя эколого-биологического состояния почвы (ИПЭБСП, % отн.) (Казеев и др., 2003). Статистический и корреляционный анализ выполняли в программе Statistica 12.0. С помощью дисперсионного двухфакторного анализа (Factorial ANOVA) определяли силу влияния исследуемых факторов на изученные показатели. В исследованиях принят уровень значимости $\alpha = 0.05$.

Методологический подход к разработке ИКМ предусматривает использование двух информационных блоков (Пузаченко, 2009).

1 блок - «внешняя» информация, которая представляет собой совокупность данных дистанционного зондирования (ДДЗ), а именно:

- мультиспектральные снимки спутников Landsat;
- набор климатических данных из базы WorldClim;
- информация, полученная на основе данных цифровой модели рельефа, построенной с использованием SRTM (Shuttle radar topographic mission).

2 блок - обучающая выборка, представляющая собой весь комплекс фактических сведений о почвах, который сформировался в результате полевых и лабораторно-аналитических исследований.

ГЛАВА 4. Современное состояние и антропогенная динамика различных подтипов горных черноземов Центрального Кавказа

Изучение динамики почвенных показателей в профилях исследуемых почв позволяет получить целостное представление о функционировании почвенной системы, как в естественном состоянии, так и в условиях многолетнего пахотного воздействия. Горные чернозёмы Кабардино-Балкарии традиционно используются для выращивания пропашных культур (в основном подсолнечника и кукурузы), мощная корневая система которых проникает глубоко в почву и оказывает влияние на биохимические и микробиологические процессы большей части почвенного слоя. Регулярное механическое воздействие на почву при выращивании пропашных культур изменяет гидротермический режим и физико-химические свойства не только в пахотных горизонтах, но и в более глубоких слоях профиля (Белкин, Беседин, 2010). Таким образом, оценка степени изменения горных чернозёмов при пахотном воздействии не будет полной без анализа динамики контролируемых показателей во всём профиле естественных и агрогенных почв (рис. 1-10).

Как следует из представленных данных (рис. 1-10), формирование БА в профилях как естественных, так и агрогенных ГЧ - сложный и разнонаправленный процесс. Рассмотренные составляющие БА в профилях подтипов ГЧ проявляют различную динамику и неоднозначно реагируют на комплекс агроэкологических факторов. В большинстве случаев пахотные горизонты несут максимальную агрогенную нагрузку, существенно изменяются свойства и подпахотных горизонтов (20-40 см).

Как показал анализ приведённых выше данных, максимально активно биохимические и микробиологические процессы протекают в верхних горизонтах (0-20 см), где и произошли наиболее значимые изменения во всех подтипах агрогенных ГЧ. Согласно усреднённым данным (табл. 1), для всех подтипов ГЧ (в том числе и выщелоченных) в этой части профиля характерны слабощелочные условия. Между генетическими аналогами естественных и обрабатываемых почв статистически значимых различий по данному показателю не обнаружено ($t > 1,23$; $p < 0,92$).

Верхние горизонты целинных ГЧ обладают рыхлым сложением, что в сочетании с ореховато-зернистой структурой, формируемой корневой системой лугово-степной растительности, создаёт оптимальные условия для развития и функционирования почвенной биоты (Горобцова и др., 2018). Представленные средние значения свидетельствуют о некотором возрастании данного показателя, что типично в условиях обработки. Однако, полученные данные характеризуют плотность пахотных горизонтов как вполне удовлетворительную, а увеличение значений не является статистически достоверным ($t > 1,26$; $p < 0,84$).

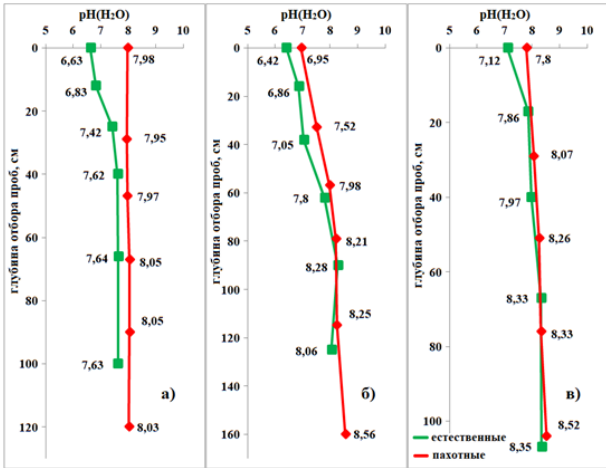


Рисунок 1 - Изменение значений pH(H₂O) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов

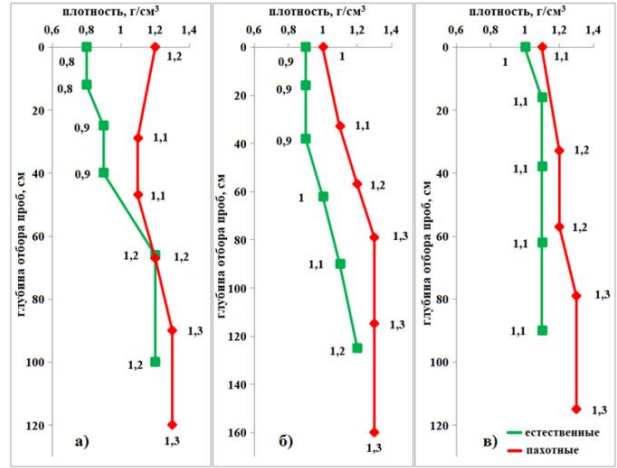


Рисунок 2 - Изменение значений плотности сложения (г/см³) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов

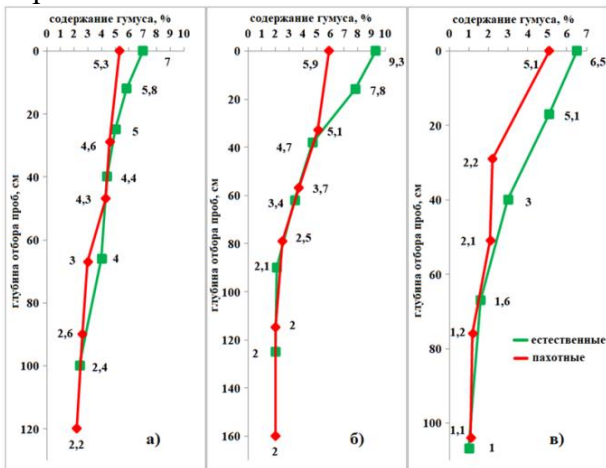


Рисунок 3 - Изменение содержания гумуса (%) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов

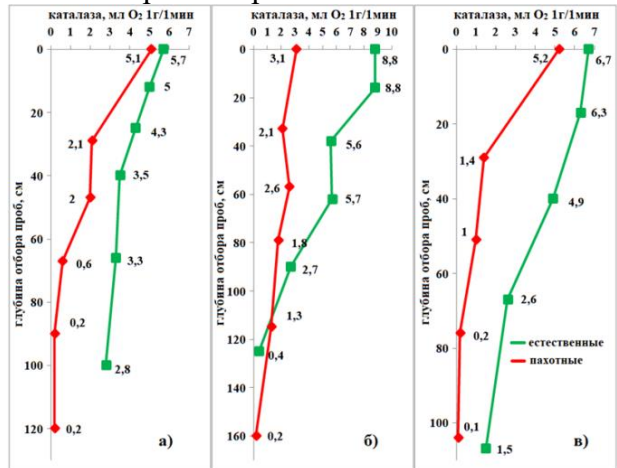


Рисунок 4 - Активность каталазы (мл O₂ / 1г / 1мин) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов

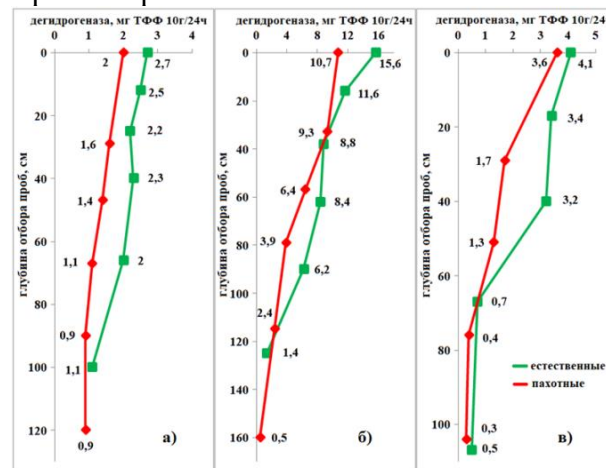


Рисунок 5 - Активность дегидрогеназы (мг ТФФ / 10г / 24ч) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов

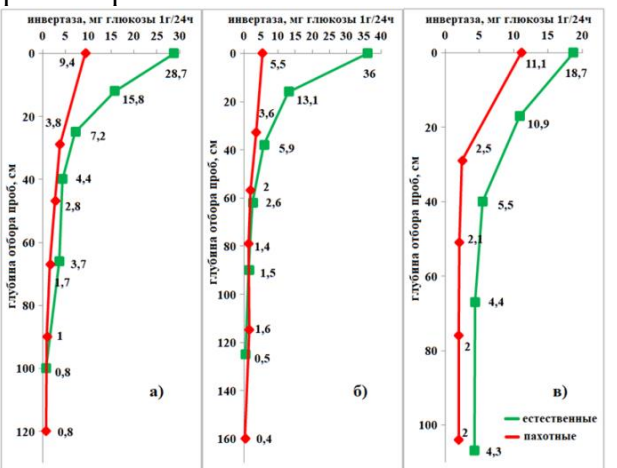


Рисунок 6 - Активность инвертазы (мг глюкозы / 1г / 24ч) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов

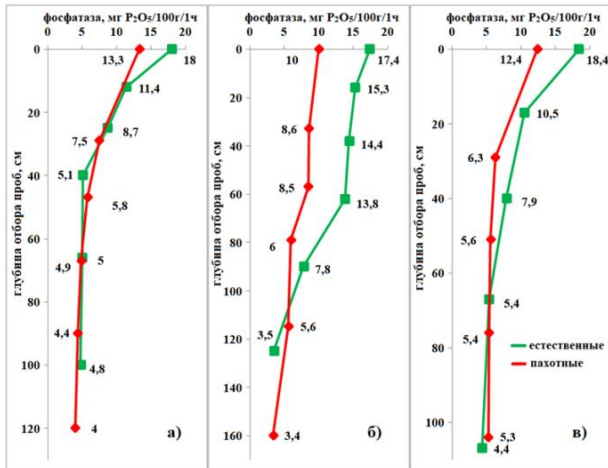


Рисунок 7 - Активность фосфатазы (мг P₂O₅/100г/24 ч) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов

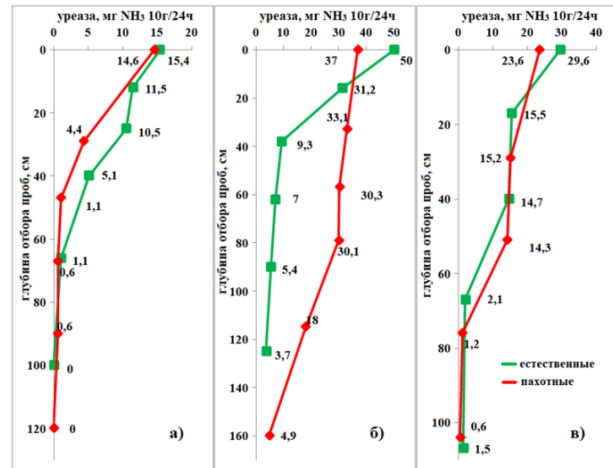


Рисунок 8 - Активность уреазы (мг NH₃ 10г / 24 ч) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов

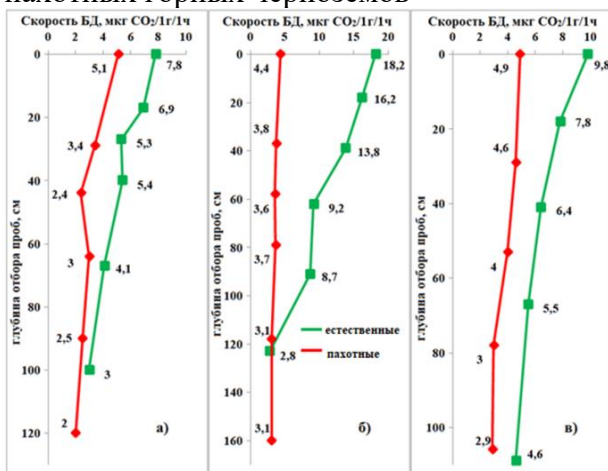


Рисунок 9 - Изменение скорости БД (мкг CO₂/1г/1ч) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов

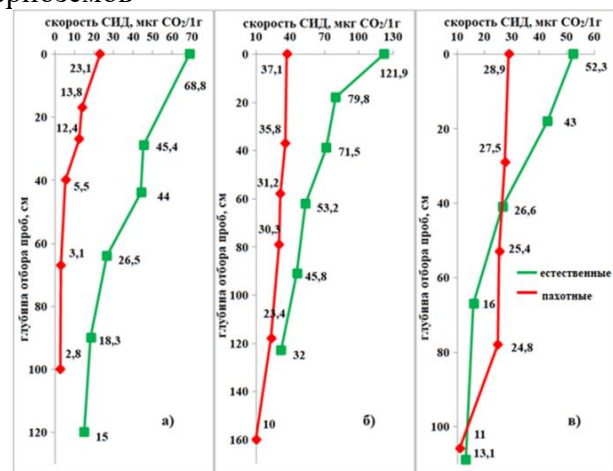


Рисунок 10 - Изменение скорости СИД (мкг CO₂/1г) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов

Примечание: а) ГЧ обыкновенные, б) ГЧ типичные, в) ГЧ выщелоченные

Высокое и очень высокое содержание гумуса в верхних горизонтах характерно для горных почв Центрального Кавказа и в том числе для ГЧ (Молчанов и др., 2017). Полученные средние показатели позволяют отнести типичные и выщелоченные ГЧ естественных биогеоценозов к тучным почвам (Классификация, 1977), обладающим высокими запасами гумуса в слое 0–20 см (в соответствии с Гришина, Орлов, 1978). Процессы дегумификации, происходящие в обрабатываемых почвах, привели к снижению содержания гумуса в пахотных горизонтах ГЧ (по сравнению с целинными аналогами) на 27–36% (Хакунова и др., 2018). Установленное изменение является статистически значимым для всех подтипов ГЧ ($t > 4,25$; $p < 0,0001$) (Хакунова и др., 2018). Уменьшение запасов гумуса проявляется в меньшей степени (на 16–22%), но статистически достоверно для пахотных горизонтов всех подтипов ГЧ ($t > 2,27$; $p < 0,04$). Причина менее выраженных различий между содержанием и запасами гумуса в естественных и пахотных аналогах – более высокие значения плотности в выборке, характеризующей свойства почв агроценозов.

Таблица 1 - Средние показатели БА естественных и пахотных ГЧ и естественные ГЛЧВ почв (0-20 см) исследуемых территорий

Физико-химические показатели				
рН (H ₂ O)	Плотность, г/см ³	Содержание гумуса, %		Запасы гумуса, т/га
Горные чернозёмы типичные (n=18/18)				
<u>7,9±0,13</u>	<u>1,16±0,03</u>	<u>6,8±0,34</u>		<u>157±6</u>
7,8±0,14	1,07±0,03	9,5±0,52		201±10
Горные чернозёмы выщелоченные (n=18/18)				
<u>7,9±0,11</u>	<u>1,21±0,03</u>	<u>6,5±0,53</u>		<u>155±11</u>
7,7±0,15	1,01±0,03	10,2±0,69		197±9
Горные чернозёмы обыкновенные (n=15/16)				
<u>8,2±0,07</u>	<u>1,25±0,05</u>	<u>5,9±0,37</u>		<u>147±10</u>
8,1±0,06	1,09±0,03	8,1±0,33		175±7
Горно-луговые чернозёмовидные типичные (n=16)				
7,4±0,1	0,74±0,02	22,5±0,9		318±18
Горно-луговые чернозёмовидные выщелоченные (n=16)				
6,9±0,1	0,93±0,06	12,2±1,4		195±15
Показатели ферментативной активности				
Дегидрогеназа, мг ТФФ10г/24ч	Каталаза, О ₂ /1г/1мин	Инвертаза, мг глюкозы/1г/24ч	Уреаза, мг NH ₃ 10г/24ч	Фосфатаза, мг P ₂ O ₅ /100г/1ч
Горные чернозёмы типичные (n=18/18)				
<u>4,8±0,6</u>	<u>4,7±0,3</u>	<u>5,9±0,6</u>	<u>17,4±3,3</u>	<u>11,8±0,6</u>
9,3±0,7	7,6±0,6	15,2±2,2	38,7±5,6	25,1±1,6
Горные чернозёмы выщелоченные (n=18/18)				
<u>7,3±1,3</u>	<u>4,8±0,4</u>	<u>8,3±1,1</u>	<u>16,5±2,0</u>	<u>11,4±0,6</u>
10,6±0,9	6,3±0,3	23,4±3,7	55,2±8,8	26,5±1,7
Горные чернозёмы обыкновенные (n=15/16)				
<u>7,0±0,7</u>	<u>3,9±0,4</u>	<u>5,8±0,5</u>	<u>17,8±1,5</u>	<u>10,5±0,5</u>
12,7±1,4	6,3±0,5	18,6±3,3	47,9±4,2	22,4±0,9
Горно-луговые чернозёмовидные типичные (n=16)				
6,2±0,5	6,6±0,5	42,9±2,5	99,4±12,6	37,0±3,1
Горно-луговые чернозёмовидные выщелоченные (n=16)				
4,0±0,3	4,5±0,5	24,4±4,3	45,9±6,1	36,0±3,0
Микробиологические показатели				
Скорость БД, мкг СО ₂ /1г/ч	Скорость СИД, мкг СО ₂ /1г/ч	С _{мик} , мкг С/г	Запас С _{мик} , г/м ²	
Горные чернозёмы типичные (n=18/18)				
<u>7,0±0,6</u>	<u>55,2±3,3</u>	<u>1222±73</u>	<u>295±18</u>	
17,3±1,9	86,8±7,3	1920±162	414±40	
Горные чернозёмы выщелоченные (n=18/18)				
<u>7,1±0,6</u>	<u>58,3±4,4</u>	<u>1289±98</u>	<u>309±22</u>	
16,5±2,1	93,2±6,7	1998±152	390±28	
Горные чернозёмы обыкновенные (n=15/16)				
<u>8,5±0,9</u>	<u>54,8±2,8</u>	<u>1213±63</u>	<u>305±22</u>	
16,1±1,5	99,6±9,1	2203±201	484±45	
Горно-луговые чернозёмовидные типичные (n=16)				
23,9±3,0	200,6±18,3	4437±464	618±54	
Горно-луговые чернозёмовидные выщелоченные (n=16)				
19,1±2,4	119,1±15,5	2635±342	492±51	

Примечание: над чертой показатели пахотных почв, под чертой – естественных; n- выборка

Анализ деятельности почвенных ферментов указывает, что определённое снижение интенсивности биохимических процессов в пахотных горизонтах наблюдается для всех сравниваемых значений. Ккаталаза и дегидрогеназа проявляют в основном среднюю активность в верхних горизонтах всех подтипов естественных и пахотных ГЧ (в соответствии со шкалой Гапонюк, Малахов, 1985). Оставаясь в границах градации «средняя», каталаза, под воздействием пахотной обработки, тем не менее достоверно снижает свою активность на 24-38% ($t>3,6$; $p<0,0001$). Изменение деятельности дегидрогеназы более существенно на – 31-48% ($t>2,6$; $p<0,04$).

Деятельность всех рассматриваемых гидролитических ферментов также значительно изменяется в результате сельскохозяйственного использования горных чернозёмов. Активность инвертазы снижается от средней до слабой (на 61% - 69%), уреазы - от высокой - до средней (на 55% - 70%), фосфатазы - от средней - до слабой (на 53% - 57%) (Хакунова и др., 2018). Выявленные различия статистически значимы для всех гидролитических ферментов ($t>2,08$; $p<0,01$).

Установлено, что в результате пахотного использования ГЧ происходит снижение всех представленных микробных характеристик. Выявлено ослабление интенсивности БД на 47-60% (Хакунова и др., 2018), которое является статистически значимым для всех изученных подтипов ГЧ ($t>4,33$; $p<0,0001$). Это свидетельствует о том, что происходит ухудшение состояния почвенных микробных сообществ и снижение численности микроорганизмов в агрогенных почвах (Margesin et al., 2009).

Показатели скорости СИД, характеризующие физиологический потенциал микробной биомассы, а также рассчитанные на их основе величины содержания Смик уменьшаются в пахотных почвах на 35% - 45% (Хакунова и др., 2018). Обнаруженные различия статистически значимы для всех подтипов горных чернозёмов ($t>4,44$; $p<0,00007$). Снижение содержания Смик подтверждает сокращение численности микроорганизмов в обрабатываемых почвах (Papa et al., 2010). Несмотря на установленные различия, содержание Смик в пахотных горизонтах остаётся высоким (>1001 мкг С/г), благодаря природному потенциалу горных чернозёмов.

ГЛАВА 5. Современное состояние горно-луговых черноземовидных почв Центрального Кавказа по данным анализа физико-химических и биологических показателей

ГЛЧВ почвы практически не используются под пашню, из-за морфогенетических особенностей (каменистость и укороченность профиля) и сложного рельефа тех участков, на которых они сформировались и (или) образовали комплексы с ГЧ. Поэтому при описании ГЛЧВ почв речь идёт о естественных (слабоповреждённых) биогеоценозах, где хозяйственное использование отсутствует или минимально воздействует на почвенный покров (например, сенокосы). Особенности обоих подтипов ГЛЧВ почв являются небольшая мощность профиля (25-45 см), плотная хорошо развитая дернина, отсутствие переходных гор. (В) и гор. (ВС). Как показывает исследование динамики контролируемых показателей (табл. 2), биологические процессы в профилях ГЛЧВ почв, протекают при слабощелочной и нейтральной реакции.

Таблица 2 - Значения показателей БА в профилях естественных горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии)

Физико-химические показатели						
Глубина отбора проб, см	Содержание гумуса, %	Запасы гумуса, т/га	Плотность, г/см ³	рН (Н ₂ О)		
Горно-луговая чернозёмовидная типичная						
Ад	0-10	17,0	221	0,65	7,48	
А	10-30	15,6	302	0,97	7,70	
В	30-43	10,8	183	0,85	8,28	
Горно-луговая чернозёмовидная выщелоченная						
Ад	0-8	12,3	187	0,76	6,87	
А	8-25	9,7	206	1,06	6,99	
Показатели ферментативной активности						
Глубина отбора проб, см	Дегидрогеназа, мг ТФФ/10г/24ч	Каталаза, О ₂ /1г/1ми	Инвертаза, мг глюкоз./1г/24ч	Уреаза, мг NH ₃ /10г/24ч	Фосфатаза, мг P ₂ O ₅ /100г/1ч	
Горно-луговая чернозёмовидная типичная						
А	0-10	7,1	5,6	34,8	131,5	23,6
А	10-30	4,0	3,6	34,3	63,8	21,3
В	30-43	2,1	2,1	31,3	40,3	10,5
Горно-луговая чернозёмовидная выщелоченная						
Ад	0-8	4,0	4,3	24,4	123,6	30,7
А	8-25	2,3	3,8	14,9	16,7	15,8
Микробиологические показатели						
Глубина отбора проб, см	Скорость БД, мкг СО ₂ /1г/час	Скорость СИД, мкг СО ₂ /1г	Смик, мкг С/1г	Запас Смик, г/м ²		
Горно-луговая чернозёмовидная типичная						
Ад	0-10	26,6	98,1	2171	282	
А	10-30	14,2	71,5	1582	307	
АВ	30-43	9,4	35,8	792	135	
Горно-луговая чернозёмовидная выщелоченная						
Ад	0-8	18,3	68,8	1522	231	
А	8-25	6,4	41,3	914	194	

Обилие органических остатков богатой разнотравно-злаковой растительности способствует рыхлому сложению, очень высокому содержанию и запасов гумуса в профилях ГЛЧВ почв. Данные скорости БД и СИД, а также содержания и запасов Смик подтверждают активную деятельность и стабильное функционирование почвенных микробоценозов. Представленные данные о деятельности контролируемых ферментов вновь подтверждают тезис о том, что формирование их активности всегда сложный и

неоднозначный процесс, а динамика полученных показателей может существенно отличаться даже в близких по генезису естественных почвах. Тем не менее, абсолютные значения активности дегидрогеназы, каталазы, инвертазы сопоставимы с данными, характеризующими ГЧ. Деятельность фосфатазы в дерновых горизонтах ГЛЧВ почв заметно выше, по сравнению с показателями, характеризующими верхние горизонты естественных ГЧ.

Для сопоставления общего уровня БА в ГЧ и ГЛЧВ почвах использовали определение ИПЭБСП (% отн.), описанных выше профилей. Полученные значения образуют следующий ряд профильной БА (по убыванию): ГЛЧТ – 100% > ГЛЧВВ – 80% > ГЧТ – 77% > ГЧВ – 46% > ГЧО – 45%. Среди ГЧ выделяется профиль типичного чернозёма, свойства которого принято считать эталонными. ГЛЧВ почвы обладают более высоким уровнем БА, в сравнении с ГЧ, несмотря на то что имеют существенно меньшую мощность почвенного слоя (что учитывается и влияет на результат при расчёте ИПЭБСП (% отн.). Таким образом, ГЛЧВ почвы превосходят по напряжённости биохимических и микробиологических процессов, даже типичный чернозём, обладающий эталонными показателями.

Установить общий уровень изменения БА верхних горизонтов горных чернозёмов позволяет применение ИПЭБСП (% отн.). Получен следующий ряд, характеризующий изученные почвы в порядке убывания БА: ГЧТбио - 100% > ГЧВбио - 94% > ГЧОбио - 91% > ГЧОагро - 62% > ГЧВагро - 59% > ГЧТагро - 56%. Наблюдаемый спад общего уровня биологической активности в пахотных ГЧ в среднем на 36%, по мнению ряда авторов (Колесников и др., 2002; Яковлев, Евдокимова, 2011) является свидетельством того, что под действием комплекса агрогенных факторов произошло нарушение важнейших свойств, режимов и биоэнергетических функций ГЧ, а также снижении порога устойчивости всей почвенной системы. ГЛЧВ почв обладают рядом особенностей, благодаря которым сформировались и характерные черты верхних горизонтов, отличающие их от естественных ГЧ. Для ГЛЧВ почв установлены очень высокие средние показатели содержания и запасов гумуса, а также максимальные значения параметров микробной активности (табл. 2). Сравнение контролируемых показателей на уровне типа показало, что скорость БД и СИД, а также содержание гумуса и Смик в ГЛЧВ почвах, по сравнению с ГЧ, существенно выше ($t > 5,85$; $p < 0,00$). Деятельность почвенных ферментов в ГЛЧВ почвах также заметно отличается от таковой в ГЧ. Данные свидетельствуют, что в более влажных и прохладных условиях окислительно-восстановительные процессы, катализируемые каталазой и дегидрогеназой, протекают с меньшей интенсивностью (различия статистически значимы $t > 2,5$; $p < 0,02$). Гидролитические ферменты, напротив, проявляют значительно более высокую активность в ГЛЧВ почвах ($t > 7,2$; $p < 0,000$). Активность инвертазы выше в среднем на 43%, уреазы – на 26%, фосфатазы – на 28%.

Совокупность всех полученных материалов позволяет не только составить представление об особенностях формирования биологических свойств почв предгорий Центрального Кавказа, но и является основой формируемой базы данных. Для того, чтобы актуализировать все собранные сведения и отобразить пространственное варьирование контролируемых показателей и общего уровня БА в естественных и

пахотных почвах исследуемых территорий, была сформирована представленная ниже ИКМ.

ГЛАВА 6. Пространственное моделирование физико-химических и биологических показателей состояния горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа

Картографическое моделирование служит эффективным инструментом для всесторонней оценки экологического состояния почвенного покрова как естественных, так и антропогенно изменённых биогеоценозов (Хакунова и др., 2018). В ходе создания моделей осуществляется систематизация и визуализация обширного массива данных, полученных в результате полевых и лабораторных исследований. Выполненное исследование интегрирует эмпирические данные с комплексом «внешних» переменных, обработанных посредством методов дискриминантного анализа. К числу этих переменных отнесены 102 показателя, охватывающие мультиспектральные отражательные характеристики геосистем (23 параметра), морфометрические параметры рельефа, выделенные на различных иерархических уровнях (60 параметров), а также климатические индексы (19 параметров).

Разработанная многослойная (9 слоёв) ИКМ отражает пространственную структуру и свойства почвенного покрова предгорий Центрального Кавказа в пределах Кабардино-Балкарии. Каждый слой данной модели содержит информацию о вариабельности одного из ключевых почвенных параметров, характеризующих физико-химические и биологические характеристики верхнего почвенного горизонта (0–20 см), учитывая влияние пахотного использования и принадлежность почв к определённым классификационным категориям.

Слои ИКМ отображают следующие показатели: $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$, содержание гумуса, скорость БД почвенной микробной биомассы, содержание Смик, активность четырех почвенных ферментов (каталазы, уреазы, фосфатазы и инвертазы). Завершающим является слой, отражающий изменение ИПЭБСП (% отн.), который суммирует все изученные биологические параметры и отражает пространственное изменение общего уровня БА почв исследуемых территорий.

Статистический анализ совокупных дискриминантных моделей подтвердил, что условия почвообразования в естественных и агрогенных системах существенно различаются (табл. 3) (Хакунова, 2022). Этот факт отражают внешние переменные, количество и содержание которых для естественных и агрогенных биогеоценозов не совпадают. Активное использование ГЧ в районе исследования привело к тому, что естественные (малоповреждённые) биогеоценозы сохранились только в местах со сложном рельефом, неудобных для хозяйственного использования (Хакунова, 2022). Искусственно выровненные пахотные угодья расположены на выположенных элементах рельефа обладают более однородными свойствами, в сравнении с участками естественных горных степей, что и отразил проведённый дискриминантный анализ. Указанные особенности исследуемых территорий подтверждаются характером внешних переменных, которые вносят наибольший вклад в описание каждого показателя.

Таблица 3 - Внешние переменные, вносящие наибольший вклад в описание изученных почвенных показателей в дискриминантных моделях

Показатель	Переменные, характеризующие агроценозы	Переменные, характеризующие биогеоценозы
pH (H ₂ O)	MAXC_11 (SRTM)	SR_S_5 (SRTM)
Содержание гумуса, %	LAP_5 (SRTM)	SR_S_21 (SRTM)
БД, мкг CO ₂ /1г/1ч	PRC_5 (SRTM)	MINC_11 (SRTM)
Смик, мкг CO ₂ /1г/1ч	SL_5 (SRTM)	SR_S_31 (SRTM)
Каталаза, мг O ₂ /1г/1 мин	VI (LANDSAT)	MAXC_11 (SRTM)
Фосфатаза, мг P ₂ O ₅ /100г/1 час	SL_5 (SRTM)	SL_11 (SRTM)
Инвертаза, мг глюкозы 1г/24 часа	VEGI (LANDSAT)	LAP_11 (SRTM)
Уреаза, мг NH ₃ /10г/24 часа	SAVI (LANDSAT)	CSC_11 (SRTM)

В условиях естественных биогеоценозов максимальное влияние на варьирование моделируемых почвенных параметров вносят внешние данные, описывающие рельеф исследуемой территории (SRTM). В искусственных агро системах, помимо данных SRTM, в процесс моделирования существенный вклад вносит информация, полученная на основе многоканальных сканерных снимков (LANDSAT). Большую часть этой информации несут так называемые «вегетационные индексы» (Хакунова, 2022). Они описывают влияние различных факторов, связанных с особенностями растительного покрова, такими как тип растительности, продуктивность биомассы, активность транспирации и др.

Итак, влияние «внешних факторов» на пространственное варьирование почвенных показателей в условиях естественных и агрогенных систем существенно различается, что требует отдельного моделирования, учитывающего особенности условий в агро- и биогеоценозах. Поэтому для каждого изученного почвенного показателя построили по две гипотетические модели. Первая группа моделей отображает изменчивость каждого параметра, которая возникает согласно закономерностям, характерным для агроценозов. Вторая группа моделей демонстрирует изменение рассматриваемых показателей в условиях естественных биогеоценозов (рис. 11). Сравнение и анализ гипотетических моделей даёт возможность проследить, насколько повсеместное пахотное воздействие может изменить состояние почвенного покрова, а также увидеть, какими могли бы быть свойства исследуемых почв при полном отсутствии деятельности человека.

Следующим шагом в создании модели, адекватно описывающей свойства почвенного покрова, является агрегация гипотетических моделей КМ АГРО и КМ БИО в объединенную картографическую модель (ОКМ). Представленная ОКМ отражает реальную картину пространственного изменения почвенных показателей на всей исследуемой территории, в которой учтены: контуры распространения различных типов и подтипов почв (в соответствии с Классификация, 1977), границы пахотных угодий и естественных биогеоценозов, связанные с этим особенности растительного покрова, а также рельефа и климатических характеристик района исследований.

Для оценки степени влияния пахотного воздействия на общий уровень БА изученных почв применили количественный показатель (ИПЭБСП, % отн.) (Казеев, 1998, Вальков и др., 1999). Как свидетельствуют представленные данные, в условиях агроценозов (КМ АГРО) все почвы исследуемых территорий обладали бы низким уровнем БА (табл. 4). В естественных условиях почвы исследуемых территорий могут обладать как низким, так и очень высоким уровнем БА. Причём площади почв, с низкой (30%), средней (32%) и высокой (27%) БА занимают сопоставимые по размеру площади. Участки почв с различным уровнем БА располагаются на различных элементах рельефа, а почва с низкими значениями ИПЭБСП расположены небольшими участками по всей моделируемой территории (рис. 11). Модель, характеризующая вариабельность значений ИПЭБСП в реальных условиях (ОКМ) существенно отличается от описанных выше. Несколько возрастает площадь, занимаемая почвами с низкой БА, которая составляет около 37% исследуемой территории и располагается преимущественно в пограничных с равнинными территориями районах, максимально используемыми под пашню.

Таблица 4 - Площадь, занимаемая исследуемыми почвами с различным уровнем биологической активности в естественных (КМ БИО), агрогенных условиях (КМ АГРО) и при их сочетании (ОКМ)

Градация ИПЭБСП	Площадь, тыс. га		
	КМ АГРО	КМ БИО	ОКМ
Низкий (21–40%)	178,4	53,11	66,63
Средний (41–60%)	-	57,77	45,53
Высокий (61–80%)	-	48,24	47,17
Очень высокий (81–100%)	-	19,28	19,07

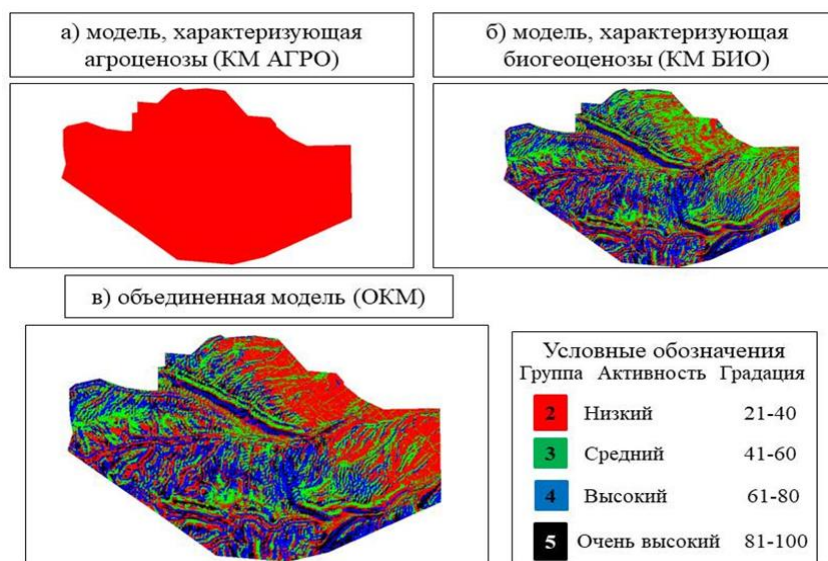


Рисунок 11 - Картографические модели, отражающие пространственное варьирование уровня биологической активности, в верхних горизонтах почв исследуемых территорий, выраженного через интегральный показатель эколого-биологического состояния почв (ИПЭБСП, % отн.)

Это увеличение происходит за счёт почв со средним уровнем БА, так как площади почв с высокой и очень высокой БА практически не меняются. Как показано на рис. 6 эти почвы распространены приблизительно на тех же участках, ближе к горам, где расположены малонарушенные биогеоценозы и формируются ГЛЧВ почвы, обладающие очень высоким уровнем БА, даже в сравнении с естественными ГЧ.

Верификация картографических моделей

Верификация – проверка качества и адекватности полученной модели – является завершающим этапом проделанной работы, позволяющим установить, насколько фактические данные совпадают с предсказанными в созданной модели (https://economic_mathematics.academic.ru/1004/Верификация_модели). Сущность проведённой верификации заключалась в том, что полученные в результате полевых и лабораторно-аналитических работ данные, характеризующие верхние горизонты почв на территории 20 точек (пикселей) не включили в состав обучающей выборки, а использовали для проверки адекватности модели. Результаты совпадения фактических данных с предсказанными в моделях составляют 65–80% (табл. 5).

Принято считать (Козлов, 2009), модель может рассматриваться как достоверная при достижении точности не менее 60%. Результаты, приведённые в таблице 5, свидетельствуют о достаточно высокой точности моделирования пространственного распределения всех исследованных показателей.

Таблица 5 - Результаты верификации моделирования пространственного варьирования изученных показателей в верхних горизонтах (0-20 см) почв исследуемых территорий

Почвенный показатель	Количество точек для проверки	Количество верно предсказанных точек	Количество неверно предсказанных точек	Точность модели, %
рН(H ₂ O)	20	13	7	65
Гумус	20	13	7	65
Инвертаза	20	13	7	65
Фосфатаза	20	15	5	75
Уреаза	20	13	7	65
Каталаза	20	16	4	80
БД	20	13	7	65
Смик	20	14	6	70
ИПЭБСП	20	13	7	65

На высокое качество полученной модели указывает то, что высокой точностью моделирования характеризуются не только стабильные показатели (например, содержание гумуса), но и такие параметры, как активность почвенных ферментов, которые, как отмечают различные авторы (Даденко, 2004; Колесников и др., 2009) обладают высокой изменчивостью. Моделирование изменения общего уровня БА в

исследуемых почвах, проведённое на основе данных ИПЭБСП (% отн.), также обладает высоким уровнем точности. Показатели ИПЭБСП (% отн.) суммируют в своих значениях все полученные данные и, следовательно, интегрируют все возможные ошибки и неточности. Тем не менее, точность модели данного показателя оказалась достаточно высокой и данный слой ОКМ адекватно отражает изменение общего уровня БА в почвах исследуемых территорий.

В ходе проведённого исследования был собран значительный объём фактических данных, на основании которых разработаны рабочие модели пространственного распределения показателей, отражающих биологическую активность почв. Разработанные модели, созданные с применением апробированной методики, демонстрируют высокую степень точности и позволяют отразить пространственную дифференциацию целого комплекса параметров, включая интегральную оценку уровня биологической активности, на площади 1785 км². Существенным преимуществом предложенного подхода является его гибкость и возможность последующей адаптации: модели могут быть дополнены новыми параметрами и усовершенствованы за счёт повышения точности. Повышение достоверности результатов возможно при увеличении объёма обучающей выборки, а также за счёт систематического проведения мониторинговых исследований, обеспечивающих своевременное обновление и верификацию накопленных данных.

Интерактивная картографическая модель почвенного покрова предгорной части Центрального Кавказа

ИКМ – представляет собой совокупность векторно-растровой информации. Она выполнена в единой проекционной системе координат и имеет единую географическую привязку. Созданная ИКМ вмещает в себя 9 растровых слоев, характеризующих динамику почвенных показателей и векторную карту, состоящую из пикселей – квадратов со сторонами 90 м. Кроме этого, ИКМ несет сведения о географических координатах, классификационной принадлежности почвы (Классификация и диагностика почв СССР, 1977), а также показывает: обрабатывается почва на данном участке под пашню или нет. Представленный оригинальный информационный продукт позволяет накапливать, систематизировать, визуализировать информацию, характеризующую почвенный покров исследуемых территорий. Методика формирования модели даёт возможность дополнять, уточнять и расширять представленную ИКМ новыми сведения о почвах и других компонентах естественных и агрогенных биогеоценозов.

ИКМ является новым информационным ресурсом, необходимым для административно-хозяйственных целей и может быть использована при кадастровой и рыночной оценке земель различного назначения; землеустроительных и мелиоративных работах; планировании агротехнических мероприятий; внедрении новых технологий, направленных на повышение качества обработки почвы и урожайности сельскохозяйственных культур. При решении научно-практических задач представленная ИКМ востребована как инструмент мониторинга, оценки и контроля за состоянием почвенного покрова предгорий Центрального Кавказа и база данных, содержащая сведения о естественных (слабоповреждённых) почвах, которые могут

служить эталоном при разработке стандартов для нормирования и контроля уровня антропогенного воздействия на почвенный покров в условиях горных ландшафтов.

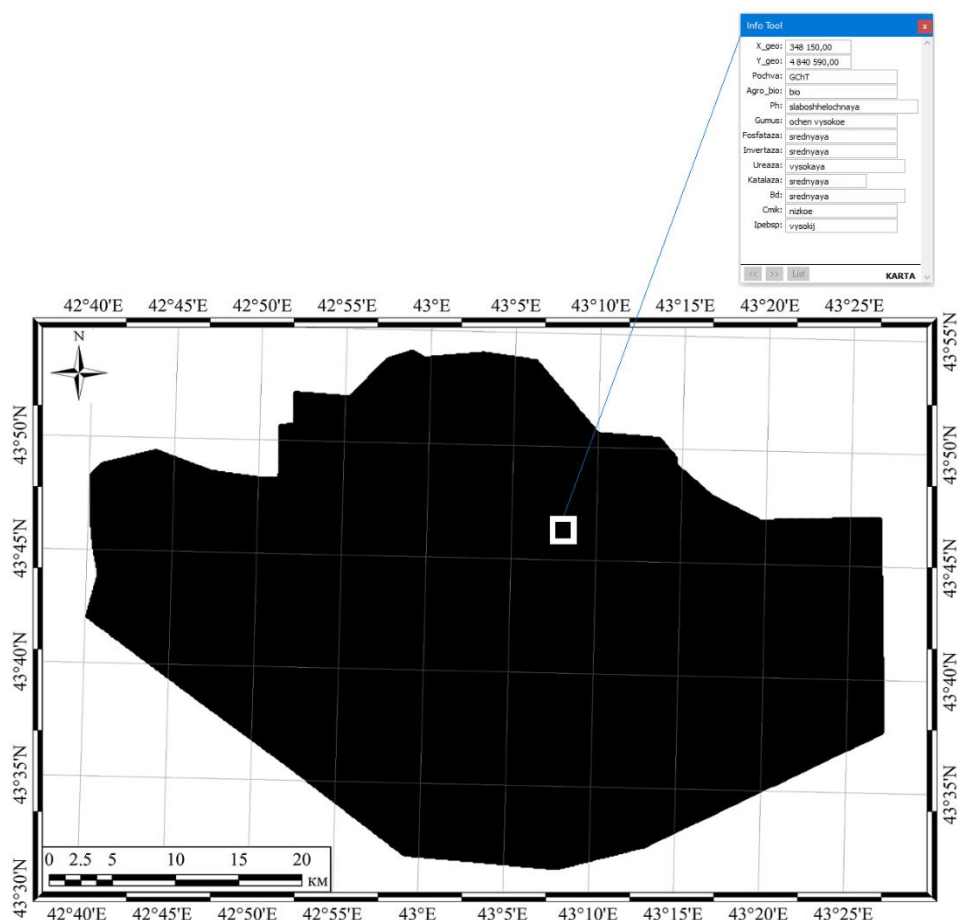


Рисунок 12 - ИКМ, характеризующая типовую принадлежность, наличие обработки, физико-химические, биологические показатели и общий уровень биологической активности почв предгорной частей Кабардино-Балкарии

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в профилях различных подтипов обрабатываемых горных чернозёмов Центрального Кавказа изученные параметры биологической активности проявляют различную динамику и неоднозначно реагируют на комплекс агроэкологических факторов. Максимальную агрогенную нагрузку несут пахотные (0–20 см) и подпахотные (20–40 см) горизонты. В естественных биогеоценозах горно-луговые чернозёмовидные почвы обладают более высокой биологической активностью, даже в сравнении горными чернозёмами.
2. Сельскохозяйственное воздействие является причиной статистически значимого ($t > 4,25$; $p < 0,0001$) снижения содержания гумуса в среднем на 31% и его запасов на 20% в пахотных горизонтах (0–20 см) горных чернозёмов Центрального Кавказа. Вследствие падения содержания углерода микробной биомассы на 39%, скорость базального и субстрат-индуцированного дыхания почвенной микробиоты уменьшается на 56% и 40% соответственно. Активность всех контролируемых ферментов снижается, образуя

следующий ряд: инвертаза на 65% > уреазы на 64% > фосфатаза на 55% > дегидрогеназа на 41% > каталаза на 33%. В результате ИПЭБСП (% отн.), отражающий общий уровень биологической активности пахотных горных черноземов, стал ниже в среднем на 36%.

3. Различия, существующие в природных и агрогенных системах, требуют отдельного моделирования пространственного варьирования почвенных показателей, т.к. в естественных и искусственных условиях наибольший вклад в описание изменчивости почвенных параметров принадлежит данным из различных внешних источников: в биогеоценозах – сведениям о рельефе; в агроценозах – данным многоканальных сканерных снимков. Объединённая картографическая модель формируется на основе совмещения отдельных гипотетических моделей и отражает реальную картину, характеризующую свойства почвенного покрова исследуемых территорий.

4. Разработанная в ходе проведённого исследования многослойная картографическая модель представляет собой инструмент комплексной экологической оценки состояния почвенного покрова. Она содержит информацию о классификационной принадлежности почвы, характере их сельскохозяйственного использования, географическом положении, а также отражает пространственное распределение и вариации девяти почвенных показателей, включая интегральную оценку уровня биологической активности. Модель охватывает территорию площадью 1785 км² и обеспечивает пространственное разрешение на уровне пикселя размером 90 × 90 м, при этом точность воспроизведения значений оцениваемых показателей варьирует в пределах 65–85%.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ,

ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Всего по теме диссертационной работы опубликовано 31 научная работа. Ниже представлены основные работы.

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК, RSCI

1. Влияние сельскохозяйственного использования на биохимические свойства полугидроморфных почв равнинной части Кабардино-Балкарии / О. Н. Горобцова, Т. С. Улигова, Р. Х. Темботов, **Е. М. Хакунова** // Известия Уфимского научного центра РАН. – 2016. – № 3. – С. 74-81.

2. Биологическая активность почв в поясе широколиственных лесов Центрального Кавказа / О. Н. Горобцова, Т. С. Улигова, Ф. В. Гедгафова, **Е. М. Хакунова** // Лесоведение. – 2021. – № 1. – С. 78-92. – DOI 10.31857/S0024114821010046.

3. Оценка изменения биологической активности горных серых лесных почв Центрального Кавказа (терский вариант поясности в пределах Кабардино-Балкарии) в результате агроиспользования / Ф. В. Гедгафова, О. Н. Горобцова, Т. С. Улигова, Р. Х. Темботов, **Е. М. Хакунова** // Агрохимия. – 2019. – №4. – С. 23-30. – DOI 10.1134/S0002188119040069.

4. Изменение биологической активности горных черноземов Центрального Кавказа при сельскохозяйственном использовании (в границах эльбрусского варианта поясности Кабардино-Балкарии) / **Е. М. Хакунова**, О. Н. Горобцова, Ф. В. Гедгафова, Т. С. Улигова, Р. Х. Темботов // Агрохимия. – 2018. – № 3. – С. 12-18. – DOI 10.7868/S000218811803002X.

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science

5. Assessment of biological activity in agrogenic and natural chernozems of Kabardino-Balkaria / O. N. Gorobtsova, T. S. Uligova, R. K. Tembotov, **E. M. Khakunova** // Eurasian Soil Science. – 2017. – Vol. 50, No. 5. – P. 589-596. – DOI 10.1134/S1064229317030048.

6. Луговые биогеоценозы субальпийского пояса Кабардино-Балкарского Государственного высокогорного заповедника (Центральный Кавказ) / Т. С. Улигова, Ф. В. Гедгафова, О. Н. Горобцова, Н. Л. Цепкова, И. Б. Рапопорт, Р. Х. Темботов, **E. М. Хакунова** // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – 2019. – Т. 4, № 2. – С. 29-47. – DOI 10.24189/ncr.2019.012.

7. Изменение биологических свойств дерново-карбонатных почв особо охраняемых территорий Западного Кавказа, вызванное усыханием *Vixus Sempervirens* L. / О. Н. Горобцова, Н. Л. Цепкова, Т. С. Улигова, Ф. В. Гедгафова, Р. Х. Темботов, **E. М. Хакунова** // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. – 2020. – Т. 162, № 1. – С. 162-179. – DOI 10.26907/2542-064X.2020.1.162-179.

8. Assessment of Changes in the Biological Activity of Mountainous Meadow-Steppe Soils under Pastures of Different Degradation Stages in the Central Caucasus / F. V. Gedgafova, O. N. Gorobtsova, T. S. Uligova, **E. M. Khakunova** // Eurasian Soil Science. – 2023. – Vol. 56, No. 6. – P. 830-839. – DOI 10.1134/s1064229323600306.

9. Dynamics of forest ecosystem components at the Black Sea coast of the Caucasus after the destruction of boxwood forests caused by the invasion of *Cydalima perspectalis* Walker (Lepidoptera, Crambidae) / I. B. Rapoport, O. N. Gorobtsova, V. A. Chadaeva, R. Kh. Tembotov, F. V. Gedgafova, T. S. Uligova, **E. M. Khakunova** // Russian Journal of Biological Invasions. – 2023. – Vol. 14, No. 1. – P. 32-44. – DOI 10.1134/S2075111723010095.

10. Применение дистанционной информации и ГИС-технологий для создания цифровых почвенных карт (на примере равнинно-предгорной части Кабардино-Балкарии) / Р. Х. Темботов, О. Н. Горобцова, Ф. В. Гедгафова, Т. С. Улигова, **E. М. Хакунова** // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19, № 4. – С. 128-137. – DOI 10.21046/2070-7401-2022-19-4-128-137.

11. Закономерности пастбищной деградации семиаридных горных экосистем Центрального Кавказа / Ф. А. Темботова, В. А. Чадаева, О. Н. Горобцова, Р. Х. Пшегусов, Н. Л. Цепкова, Р. Х. Темботов, З. М. Ханов, Ф. В. Гедгафова, А. Ж. Жашуев, Т. С. Улигова, **E. М. Хакунова** // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 7. – С. 1097-1112. – DOI 10.31857/S2587556623070142.

12. Biological Activity of Mountain and Plain Chernozems in the Central Caucasus (within Kabardino-Balkaria) / O. N. Gorobtsova, T. M. Minkina, T. S. Uligova, R. Kh. Tembotov, **E. M. Khakunova** // Biology Bulletin. – 2019. – V. 46, No. 10. – P. 1282-1288. – DOI 10.1134/S106235901910011X.

13. Stages of grassland degradation in subalpine ecosystems of the Central Caucasus, Russia / V. Chadaeva, O. Gorobtsova, R. Pshegusov, N. Tsepkova, R. Tembotov, Z. Khanov, F. Gedgafova, A. Zhashuev, T. Uligova, **E. Khakunova**, E. Stepanyan // Chilean Journal of Agricultural Research. – 2021. – Vol. 81, No. 4. – P. 630-642. – DOI 10.4067/S0718-58392021000400630.

14. Assessment of biological activity in mountain chernozems and mountain-meadow chernozemic soils of natural biogeocenoses in the Central Caucasus, Russia / F. V. Gedgafova,

O. N. Gorobtsova, T. S. Uligova, N. L. Tsepko, R. Kh. Tembotov, **E. M. Khakunova** // Eurasian Journal of Soil Science. – 2022. – V. 11, No. 1. – P. 77-85. – DOI 10.18393/EJSS.996603.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БА – биологическая активность

БД – базальное дыхание

ГЛЧВ – горно-луговые черноземовидные почвы

ГЧ – горные черноземы

ДДЗ – данные дистанционного зондирования

ИКМ – интерактивная картографическая модель

ИПЭБСП – интегральный показатель эколого-биологического состояния почв

КМ АГРО – картографическая модель отражающая пространственное варьирование значений показателя характерных для агроценозов

КМ БИО – картографическая модель отражающая пространственное варьирование значений показателя характерных для биогеоценозов

ОКМ – объединенная картографическая модель

СИД – субстрат-индуцированное дыхание

Смик – углерод микробной биомассы