

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова Российской академии наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук

На правах рукописи



ХАКУНОВА  
ЕЛЕНА МУХАДИНОВНА

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ И АГРОГЕННЫХ ГОРНЫХ  
ЧЕРНОЗЁМОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА

1.5.15. Экология (биологические науки)

Диссертация  
на соискание учёной степени  
**кандидата** биологических наук

Научный руководитель:  
кандидат биологических наук,  
доцент  
Горобцова Ольга Николаевна

Нальчик – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Литературный обзор.....	11
1.1 Экологические функции почвы как центрального компонента биосферы.....	11
1.2 Биологическая активность почв, факторы формирования, влияние антропогенеза .....	14
1.3 Влияние условий горного почвообразования на формирование почв Центрального Кавказа .....	23
1.4 Исторические аспекты изучения генезиса и свойств горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа.....	26
1.5 Цифровое почвенное картографирование как инструмент экологического мониторинга.....	29
ГЛАВА 2. Природно-климатические условия почвообразования и почвы района исследований.....	33
2.1 Условия почвообразования предгорий Центрального Кавказа.....	33
2.2 Влияние высотно-поясной структуры горных территорий на условия почвообразования.....	39
2.3 Почвы района исследования .....	42
ГЛАВА 3. Материалы и методы исследований.....	52
3.1 Объекты исследований.....	52
3.2 Методы исследований.....	53
3.2.1 Методы полевых исследований.....	53
3.2.2 Методы лабораторных исследований.....	56
3.2.3 Основные подходы и методы анализа отображения пространственно-сопряженной информации при создании интерактивной картографической модели.....	59
ГЛАВА 4. Современное состояние и антропогенная динамика различных подтипов горных чернозёмов Центрального Кавказа.....	69

4.1 Динамика физико-химических, биохимических и микробиологических показателей в профилях естественных и агрогенных горных черноземов....	69
4.2 Оценка влияния пахотного использования почв на физико-химические, биологические параметры и общее экологическое состояние горных черноземов.....	85
ГЛАВА 5. Современное состояние горно-луговых черноземовидных почв Центрального Кавказа по данным анализа физико-химических и биологических показателей.....	94
5.1 Динамика физико-химических и биологических параметров в профилях различных подтипов естественных горно-луговых черноземовидных почв.....	94
5.2 Экологическая оценка состояние горно-луговых черноземовидных почв.....	97
ГЛАВА 6. Пространственное моделирование физико-химических и биологических показателей состояния горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа.....	104
6.1 Модели пространственной изменчивости физико-химических и биологических параметров естественных и агрогенных почв.....	105
6.1.1 Кислотно-щелочные условия.....	108
6.1.2 Содержание гумуса.....	110
6.1.3 Скорость базального дыхания.....	113
6.1.4 Содержание углерода микробной биомассы.....	115
6.1.5 Активность почвенных ферментов.....	117
6.1.6 Общий уровень биологической активности.....	122
6.2 Верификация картографических моделей.....	125
6.3 Интерактивная картографическая модель почвенного покрова предгорной части Центрального Кавказа.....	127
ВЫВОДЫ.....	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	131

## ВВЕДЕНИЕ

**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 км<sup>2</sup> 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 км<sup>2</sup>.

**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 км<sup>2</sup> 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 опубликовано 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.

**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. Горобцовой; 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.

## ГЛАВА 1. Литературный обзор

### 1.1 Экологические функции почвы как центрального компонента биосферы

Почва - важнейший компонент биосферы, обеспечивающий направленность глобальных природных процессов и функционирование наземных биогеоценозов. По мнению В.А. Ковды (1985), почва служит центральным звеном, связывающим атмосферу, гидросферу, литосферу и во многом определяет возможность существования биосферы. Она является открытой, гетерогенной, многокомпонентной системой, в которой протекают сложные биогеохимические реакции, осуществляется круговорот веществ, создаются условия, необходимые для поддержания жизни. Как отмечает Г.В. Добровольский, многообразие экологических функций определяет биологическое разнообразие и основную роль почвы в биосфере (Добровольский, 1999).

Современные представления об экологической роли и функциях почвы, как природного тела, базируются на работах Г.В. Добровольского, Е.Д. Никитина, В.А. Ковды, С.В. Зонна, Л.О. Карпачевского (Зонн, 1940; Добровольский, Никитин, 1986; Карпачевский, 1987; Добровольский, 1999) в которых сформулирован ряд экологических функций почвы, носящих как *глобальный (биосферный), так и биогеоценотический (экосистемный) характер.*

В категорию *глобальных входят функции*, реализуемые почвенным покровом при его взаимодействии с литосферой, гидросферой, атмосферой, биосферой. К ним относятся:

1. *Биогеохимическая функция.* Почва представляет собой фундаментальный компонент биосферы, выполняющий роль геобиологического посредника в глобальных круговоротах вещества и энергии. Она одновременно участвует как в крупномасштабном геохимическом круговороте (суша ↔ океан), так и в малом биологическом круговороте (почва ↔ растения ↔ животные). Через почвенный покров осуществляется аккумуляция и перераспределение биофильных элементов, необходимых для функционирования живых систем. Установлено, что

суммарная масса зольных элементов, заключённых в живом веществе суши, во много раз превышает их годовой ионный сток с речным стоком в океан. Особенно устойчиво вовлечены в биотический круговорот макро- и микроэлементы, что подчёркивает регуляторную функцию почвы в поддержании биогеохимического равновесия (Добровольский, 2003).

2. *Гидрологическая и климаторегулирующая функция* заключается в поглощении и отражении солнечной радиации почвой, которая определяет энергетический баланс и состав нижних слоёв атмосферы. Почва в немалой степени регулирует газовый режим и состав атмосферы, содержание в ней углекислого и других парниковых газов. Почвой контролируются влагооборот, а также механизмы образования грунтовых вод (Куликова, 2007), поскольку все атмосферные осадки фильтруются через почвенный покров (Добровольский, Никитин, 1986).

3. *Биосферная функция* осуществляется почвой в процессе формирования биологической продуктивности в природных экосистемах и плодородия - в агроэкосистемах. Несмотря на то, что почвенный покров представляет собой крайне тонкий слой на поверхности суши, существенно уступающий по массе и объёму Мировому океану, именно суша демонстрирует значительно более высокую биологическую продуктивность по сравнению с океаническими экосистемами. На долю наземной части биосферы (леса, степи, сельскохозяйственные угодья, пастбища, торфяники, органическое вещество почв) приходится около 99,8% общей биомассы планеты (Базилевич и др., 1970). При этом более 90% всей массы пищевых ресурсов, потребляемых человеком, производится на суше за счёт использования потенциала почвенного плодородия. Эти данные подчёркивают исключительную значимость почвенного покрова в глобальной биосферной регуляции и в обеспечении устойчивого функционирования как природных, так и аграрных экосистем.

4. *Буферная и фильтрационная функция* позволяют почве задерживать, накапливать и (в определённой степени) нейтрализовать загрязняющие вещества, предотвращая их попадание в грунтовые и поверхностные воды. Процессы

накопления в почве различных поллютантов обусловлены её высокой поглотительной способностью, поэтому преодолеть токсическое загрязнение почв значительно сложнее, нежели воды и воздуха (Соколов и др., 2010).

Многочисленные *экосистемные (биогеоценологические) функции* почвы подразделяются на физические, химические и физико-химические, биологические и информационные и тесно взаимосвязаны с глобальными функциями. Почва представляет собой уникальную среду обитания, выполняя функции механической опоры, убежища, резервуара диаспор (семян, спор и др.), а также пространственного субстрата для жизни. С ней тесно связано существование большинства высших растений: корневая система составляет от 20–30% до 90% фитомассы (Куликова, 2007). Около 90% насекомых — наиболее многочисленной группы животных - проводят часть жизненного цикла в почве (Гиляров, 1949).

Почва служит идеальной средой для микроорганизмов, отличающейся высокой плотностью и разнообразием. В 1 г почвы может содержаться до нескольких миллиардов бактерий, а их биомасса достигает 10 т/га. Совокупная биомасса микроорганизмов может составлять десятки тонн на гектар (Куликова, 2007). По выражению Г. В. Добровольского, почва — это «банк генофонда микромира» (Добровольский, 1999).

Микроорганизмы играют ключевую роль в обеспечении растений азотом, основной механизм которого заключается в фиксации атмосферного молекулярного азота прокариотами. Г.В. Добровольский (1999) подчеркивает, что этот процесс имеет планетарное значение, сравнимое лишь с фотосинтезом. Уникальная способность микроорганизмов фиксировать атмосферный азот становится особенно важной в условиях усиленного антропогенного воздействия, и проблема накопления биологически доступного азота стала одной из центральных в современном почвоведении, агрохимии, агроэкологии и земледелии (Куликова, 2007).

Особое значение в функционировании почвы имеет её роль как депо энергии. В гумусовом слое аккумулируется значительное количество солнечной энергии, связанной в органическом веществе. Накопление тепловой энергии и

колебания температуры почвы служат не только сигналом начала и завершения сезонных биологических циклов, но и оказывают влияние на протекание различных физиологических процессов (Куликова, 2007).

Функция трансформации вещества и энергии обеспечивает масштабный процесс почвообразования - преобразование бедных горных пород верхнего литосферного слоя в плодородный субстрат, пригодный для жизни.

Плодородие почвы выступает ключевой биогеоценотической функцией, поскольку наряду с климатическими условиями оно определяет продуктивность как природных, так и антропогенных экосистем, являясь фундаментом существования человека и его социальной эволюции (Куликова, 2007).

Однако стремительное развитие человеческой цивилизации привело к необратимым изменениям в экосистемах, ухудшению качества окружающей среды и сокращению биоразнообразия. А параметры биологической активности (БА) почв чутко реагируют на весь комплекс факторов и способны отражать разнообразные аспекты биологических процессов в почве (Даденко и др. 2013).

## **1.2 Биологическая активность почв, факторы формирования, влияние антропогенеза**

Изучение биологических свойств и определение уровня БА почвы – важнейшая часть исследования почвенной системы. Анализу динамики различных параметров БА уделяется самое пристальное внимание, так как они более чувствительны, по сравнению с физико-химическими характеристиками, к внешним (природным и антропогенным) воздействиям. Исследование комплекса биологических показателей (в том числе микробиологических и биохимических) позволяет учесть все разнообразие условий, определяющих экологический статус почвы и дать оценку степени изменения её биологических свойств, при различных видах антропогенного воздействия (Алехин и др., 1998; Казеев, Колесников, 1998; Казеев и др., 2003; Даденко, 2004; Девятова, 2005; Звягинцев и

др., 2005; Владыченский и др., 2013; Горбов, Безуглова, 2013; Никулина и др., 2020).

Биологическая активность (БА) почвенного покрова представляет собой важнейшую характеристику, определяющую его экологические функции, устойчивость и способность поддерживать плодородие в природных и аграрных системах. В современных исследованиях она рассматривается как интегральный показатель, отражающий сложный комплекс микробиологических и биохимических процессов, протекающих в почвенной среде (Орлов и др., 1991; Казеев и др., 2018).

В зависимости от задач исследования различают показатели фактической (актуальной) и потенциальной биологической активности. Следует отметить, что показатели актуальной БА обладают высокой чувствительностью к внешним условиям и варьируют в зависимости от времени года, суток, температуры и влажности. Это делает их малопригодными для межрегиональных сопоставлений и долгосрочного мониторинга без строгой стандартизации условий (Звягинцев и др., 2005).

По этой причине всё большее значение приобретают параметры потенциальной биологической активности, определяемые в лабораторных условиях при строго контролируемых температурном и влажностном режимах. Среди них - активность гидролаз, оксидоредуктаз и других ферментов (Галстян, 1974), интенсивность базального и субстрат-индуцированного дыхания (Ананьева, 2003, Казеев и др., 2003; Никитин и др., 2022).

Оценка потенциальной БА позволяет выявить адаптивные возможности почвенной микробиоты, диагностировать степень деградации почвы и оценить её биологический потенциал. Особенно важна такая оценка при анализе состояния почв, подвергшихся длительному антропогенному воздействию. В ряде работ предложены интегральные подходы к оценке БА, предполагающие использование совокупности параметров, обладающих высокой информативностью и воспроизводимостью. К ним, как правило, относят содержание органического вещества, дыхательную активность гетеротрофных микроорганизмов, а также

ферментативную активность (Вальков и др., 1999, 2002; Казеев и др., 2003, 2004; Колесников и др., 2009, 2012).

#### Гумусовое состояние как показатель биологической активности почвы

Гумусное состояние почвы представляет собой совокупность количественных характеристик, позволяющих оценить уровень её плодородия. Содержание и запасы гумуса интегрируют в себе информацию о широком спектре свойств почвенного профиля и являются репрезентативными характеристиками биологической активности почв (Гришина, Орлов, 1978; Казеев и др., 2004). В ряде исследований отмечается, что почвы с высоким уровнем органического вещества обычно демонстрируют высокий уровень БА (Дубовенко, Уласевич, 1968).

Однако, в работах ряда авторов прослеживается и другой подход к данному вопросу (Казеев и др., 2004; Горбов, Безуглова, 2013). При низкой скорости биохимических процессов или коротком периоде их активации происходит накопление переработанных растительных остатков (торф, подстилка, ветошь), что может свидетельствовать о невысоком уровне БА почвы, например, в условиях высокогорий или болотных биогеоценозов.

Содержание гумуса в почве представляет собой стабильный биохимический показатель, который отражает комплексное воздействие эколого-генетических факторов на процессы формирования и функционирования почвенного покрова. Вместе с тем, гумус обладает динамичным характером, поскольку его уровень изменяется под влиянием взаимодействия различных элементов почвенной биоты. Биологическая активность почвы, рассматриваемая далее, непосредственно связана с её гумусным состоянием (Темботов, 2017).

#### Респираторная активность почвенной микробной биомассы и характеризующие её показатели

Общепризнана ключевая роль почвенных микроорганизмов в циклах круговорота питательных элементов (Martens, 1995; Dilly, 2003; Anderson, Domsch, 2010) и регуляции газового состава атмосферы (Звягинцев и др., 1992; Conrad, 1996; Умаров, 2003; Заварзин, 2006; Кудеяров и др., 2009; Chang et al.,

2016). При этом установлено, что почвенное микробное сообщество остро реагирует на разнообразные внешние воздействия, и прежде всего на различные антропогенные факторы (Han et al., 2011).

Индикатором состояния почвенных микробоценозов могут служить респираторные показатели жизнедеятельности гетеротрофных микроорганизмов (Martens, 1995; Ананьева, 2003; Anderson, 2003; Collof et al., 2008; Li et al., 2009; Macdonald et al., 2009; Schloter et al., 2018; Ivashchenko et al., 2021).

Наиболее точными и воспроизводимыми методами оценки респираторной активности гетеротрофных микроорганизмов почвы считаются измерения скорости базального дыхания (БД) и субстрат-индуцированного дыхания (СИД) (Темботов, 2017).

В России и в мировой практике, методы определения скорости БД и СИД находят применение для контроля уровня антропогенной нагрузки, при проведении экологического мониторинга и оценке устойчивости экосистемы в целом и др. задач (Звягинцев и др., 1976; Кожевин и др., 1979; Wardle, Giller, 1996; Ohtonen et al., 1997; Ананьева, 2003; Иващенко, 2014; Ананьева и др., 2020, 2021).

Описываемые показатели состояния почвенных микробоценозов применяют также при сравнительных исследованиях, прогнозных расчётах и моделировании состояния почвенного покрова (Сусьян и др., 2005; Ананьева и др., 2008, 2011; Creamer et al., 2014). Во многих странах респираторные микробиологические показатели служат индикаторами «качества» и «здоровья» почвы и применимы для объяснения экосистемных процессов, поскольку они играют значительную роль в формировании биогеоценологических функций почвы.

В ряде зарубежных стран скорость СИД является одним из стандартных показателей, используемых при оценке качества почвы (Sikora et al., 1994; Yakovchenko et al., 1996; Bouma et al., 1997; Sims et al., 1997; Nielsen, Winding, 2002; Anderson, 2003; Nogueira et al., 2006; Murugan et al., 2014).

Относительно простая методика определения скорости БД и СИД, высокая чувствительность этих показателей к пахотному использованию и другим

антропогенным нарушениям делает их использование удобным для практических исследований. Эффективность показателей микробного дыхания, подтверждается большим количеством научных работ, опубликованных в международных изданиях (Brookes, 1995; Doran, Zeiss, 2000; Nielsen, Winding, 2002; Anderson, 2003; Nogueira et al., 2006; Murugan et al., 2014).

*Скорость базального дыхания* (БД, мкг  $\text{CO}_2\text{-C}/\text{г}$  почвы/час) позволяет установить базовую (фоновую) скорость продуцирования  $\text{CO}_2$  почвенными микроорганизмами без учета деятельности корневой системы и внесения питательных субстратов. Это одна из минерализационных характеристик почвы, которая позволяет учесть количество углерода доступного для микроорганизмов (Ananyeva et al., 2008, 2020; Горобцова и др., 2021).

Потенциальную активность гетеротрофных микроорганизмов в процессах минерализации органических остатков позволяет оценить метод определения скорости субстрат-индуцированного дыхания (СИД). Физиологический подход к оценке скорости субстрат-индуцированного дыхания почвы (мкг  $\text{CO}_2\text{-C}$  на грамм сухой массы в час) опирается на фундаментальные положения биокинетики, согласно которым интенсивность метаболической активности микроорганизмов определяется как функцией концентрации вводимого субстрата, так и численностью активной микробной биомассы в системе (Мирчинк, Паников, 1985). Данный метод основан на определении отклика почвенных микроорганизмов на внесении питательного субстрата, в качестве которого чаще всего применяется глюкоза.

Усвоение глюкозы микроорганизмами почвы *in situ* за тот период времени, когда не размножаются и не растут клетки, положено в основу определения содержания микробного углерода в почве (Anderson, Domsch, 1978; Ананьева, 2003). Поэтому важный аспект метода СИД связан с устойчивым количественным определением в почве *содержания углерода микробной биомассы* (Смик, мкг  $\text{C}/\text{г}$  почвы) (Anderson, Domsch, 1978; Ананьева и др., 2008). Один из постулатов микробиологии утверждает, что дыхательный отклик микроорганизмов (образование  $\text{CO}_2$ ) прямо пропорционален их биомассе. При обеспечении среды

субстратом в количествах, превышающих порог насыщения, метаболическая активность достигает своего предельного значения, величина которого определяется количеством активной микробной биомассы (Ананьева и др., 1993; Стольникова, 2010). Полученное соотношение справедливо для условий инкубации почвенного образца при 22°C (Anderson, Domsch, 2010; Сушко и др., 2016, Иващенко, 2017).

Метод СИД достаточно точно, с относительной погрешностью, не превышающей 5-15%, позволяет определить именно активную, способную потреблять глюкозу часть микробной биомассы почвы, (Beare et al., 1990, 1992; Nassink, 1993; Wardle, Ghaini, 1995). Снижение содержания Смик следует интерпретировать как один из ранних признаков деградации почвенного качества и начального этапа утраты её плодородного потенциала под влиянием различных антропогенных факторов (Jenkinson, Ladd, 1981; Powlson et al., 1981, 1987; Полянская, Звягинцев, 2005; Сорокин, Афанасова, 2011; Жуланова, 2013).

В ряде стран уровень содержания Смик приобрел статус стандартного параметра (DIN ISO 14240-1, 1997) и характеристики устойчивости к разнообразным внешним воздействиями, поэтому он включён в перечень показателей качества почвы в различных международных программах мониторинга (Doran, Parkin, 1996; DIN ISO 14240-1, 1997; Benedetti, Dilly, 2006; Горобцова и др., 2018).

Таким образом, микробная биомасса представляет собой наиболее значимый, активно функционирующий и при это весьма лабильный компонент почвенного органического вещества (Jenkinson, Ladd, 1981; Ананьева, 2003; Полянская, Звягинцев, 2005; Сусьян, 2005).

В содержании общего органического углерода почвы (Сорг) метаболически активная микробная биомасса (Смик) составляет по различным данным Смик/Сорг до 5% (Ананьева, 2003), а по мнению некоторых авторов, - до 10% (Сусьян, 2005; Vlagodatskaya, Kuzyakov, 2013; Vlagodatskaya et al., 2016).

Содержание микробной биомассы почвы (Смик) находится под влиянием климатических факторов, формирующих гидротермический режим, а также

свойств растительного покрова и физико-химических характеристик почвы, включая уровень кислотности, наличие питательных элементов и токсичных загрязнителей (Nogueira et al., 2006).

Поэтому при определении общего уровня БА почвы, особенно в случае оценки влияния какого-либо вида антропогенного воздействия, следует учитывать различные аспекты проявления БА и использовать как стабильные (такие как содержание гумуса), так и описанные выше динамичные микробные показатели.

*Почвенные ферменты, роль в биохимических процессах и факторы, влияющие на их активность*

Уровень биологической активности почвенной среды во многом определяется каталитической ролью ферментных белков, продуцируемых почвенными микроорганизмами. Ферменты, вырабатываемые микробной биотой в процессе жизнедеятельности, после гибели клеток и их разрушения аккумулируются в почве, закрепляясь посредством адсорбции на поверхности минеральных частиц твердой фазы (Купревич, 1951; Галстян, 1974).

Почва представляет собой сложную биохимическую систему, обладающую наибольшим разнообразием и запасом ферментативных компонентов (Купревич, 1974). Более 900 различных биокатализаторов участвуют в ускорении преобразований органических остатков, поступающих в почвенный профиль (Ковриго и др., 2000). Эти ферменты играют ключевую роль в окислительно-восстановительных процессах (Xu et al., 2015; Ge et al., 2017; Margalef et al., 2017), обеспечивают гидролиз органических веществ и трансформацию питательных элементов в формы, доступные для усвоения растениями и микробными сообществами (Хазиев, 2005; Темботов, 2017).

Каталаза и дегидрогеназа занимают центральное место среди оксидоредуктаз, участвующих в окислительно-восстановительных реакциях и формировании гумусовых веществ. Каталаза обеспечивает катализ разложения перекиси водорода - вещества, образующегося в ходе многих биохимических процессов - с образованием воды и кислорода. Согласно исследованиям Галстяна (1974) и Звягинцева (1980), микроорганизмы используют энергию, выделяемую

при этом процессе, для синтеза органических соединений. Благодаря своим специфическим свойствам каталаза широко применяется как маркер функциональной активности почвенной микробиоты и её устойчивости к неблагоприятным воздействиям (Щербакова, 1983). Дегидрогеназа является основным ферментом, участвующим в дыхательных процессах микроорганизмов почвы, ускоряя реакции переноса водорода в молекулах спиртов, аминокислот, фенолов, липидов, гумусовых веществ и других органических соединений (Валова и др., 2012).

Гидролазы играют фундаментальную роль в обеспечении почвы питательными веществами, катализируя расщепление высокомолекулярных органических соединений, что способствует высвобождению элементов, необходимых для жизнедеятельности микроорганизмов и растений. В экологических исследованиях и при оценке антропогенного воздействия - включая техногенные загрязнения, интенсивное сельское хозяйство и изменение земельных угодий - особое внимание уделяется активности таких ферментов, как инвертаза, фосфатаза и уреазы (Звягинцев, 1980; Казеев и др., 2003; Темботов, 2017).

Инвертаза отвечает за гидролиз сахарозы с образованием глюкозы и фруктозы - ключевых источников энергии и углерода для почвенных микроорганизмов и растений. Эта ферментативная активность напрямую влияет на процессы минерализации и доступности питательных веществ, а по данным А. Ш. Галстяна, уровень активности инвертазы тесно связан с урожайностью сельскохозяйственных культур, что позволяет использовать его в качестве надежного маркера плодородия почвы (Галстян, 1974).

Уреазы, широко распространённый фермент во всех типах почв, является важным компонентом азотного цикла. Она катализирует гидролитическое расщепление мочевины на аммиак и углекислый газ, обеспечивая тем самым доступность азота для растений и почвенной микробиоты. Уреазы продуцируются уробактериями и поступает в почву с органическими остатками растительного

происхождения, играя ключевую роль в регуляции азотного баланса в экосистемах (Дробник, 1957).

Значительная часть общего фосфора в почвенном слое представлена фосфорорганическими соединениями, недоступными для растений в исходном виде. Их минерализация и последующее превращение осуществляются почвенными микроорганизмами, которые продуцируют ферменты фосфатазы. Эти ферменты обеспечивают гидролиз различных субстратов, включая фосфолипиды, нуклеиновые кислоты, фитин и специфические гумусовые вещества (Красильников, Котелев, 1957, 1959; Котелев, 1964; Чимитдоржиева и др., 2001). Деятельность фосфатаз способствует трансформации органического фосфора в формы, доступные для усвоения растениями, что является важным процессом для поддержания плодородия почв.

В данном контексте следует особое внимание уделить анализу воздействия почвенно-климатических условий на формирование и проявление ФА почв. Гидротермический режим определяет условия жизнедеятельности почвенной биоты, развитие растений, обилие корневых выделений, метаболизм почвенных микроорганизмов и мезофауны и, в итоге влияет, на интенсивность образования и выделения ферментов, оказывая, таким образом, косвенное воздействие на ФА почв (Nottingham et al., 2016).

Исследования, посвященные анализу воздействия плотности сложения на уровень ФА свидетельствуют, что в рыхлых почвах ( $1,0-1,1 \text{ г/см}^3$ ), где условия для жизнедеятельности живых организмов оптимальны, наблюдается и более высокая активность ферментов. Это объясняется усилением физиологической активности почвенной биоты, являющейся в свою очередь источником ферментов (Сапожников, 1961; Ландина, 1986).

Хорошо выраженная, водопрочная структура почвы способствует формированию порового пространства, усилению аэрации, присутствию доступной влаги и её свободной циркуляции доступной влаги в почвенном слое. В оструктуренных почвах формируются более благоприятные гидротермические условия, что (как показано выше) оказывает прямое и косвенное воздействие на

проявление ФА. Влияние оструктуренности почвы на формирование высокого уровня ФА подтверждается работами Д.Г. Звягинцева. По его данным ферменты в почве локализованы в изолированных микроочагах, которые приурочены к почвенным агрегатам (Звягинцев, 1973, 1978).

На формирование ФА почвы решающее воздействие оказывают её химические свойства и прежде всего кислотно-щелочные условия. Они определяют направление почвенных процессов, включая биохимические, поэтому изучению различных аспектов влияния реакции почвенного раствора на активность ферментов посвящено немало научных трудов (Чундерова, 1970; Хазиев, 1972, 1976; Щербакова, 1983).

Существует целый ряд ферментов которые способны проявлять активность только в узком диапазоне значений рН. Кроме того, кислотно-щелочные условия влияют на видовой состав и разнообразие растительных сообществ и почвенных микробоценозов, являющихся основным источником почвенных ферментов (Чундерова, 1970; Моисеева, 1975).

Таким образом, почвенные ферменты определяют напряжённость протекающих в почве биохимических процессов и чутко реагируют на изменения почвенных свойств, в том числе и при различных видах антропогенного воздействия. Сведения об активности почвенных ферментов, принадлежащих к различным классам, содержат в себе комплекс информации, необходимой для определения и оценки изменения общего уровня БА естественных и антропогенно изменённых почв.

### **1.3 Влияние условий горного почвообразования на формирование почв Центрального Кавказа**

Все чернозёмы южно-европейской фации формируются в условиях теневого эффекта гор Кавказа (Вальков, 2001). Положение о теневом эффекте Кавказский гор высказал профессор Н.Н. Рогозов в 70-е годы на научном семинаре кафедры почвоведения Ростовского Государственного университета. Сущность этого

эффекта заключается в особой зональности на равнинах, не входящих в систему горной поясности и не подчиняющихся закономерностям широтной зональности (Акименко и др., 2019). Наличие горных систем обуславливает усиленную конденсацию атмосферной влаги или, напротив, ее подавление, вызванное перегревом воздушных масс, которое может происходить при их перемещении между горными и равнинными территориями. Таким образом, совокупность целого ряда орографических и климатических факторов формирует почвенные зоны теневого эффекта в условиях предгорий. Образование на предгорных равнинах оригинальной южно-европейской фации чернозёмов обязано теневому эффекту гор Кавказа, без которого на этих пространствах простирались бы сухие степи и полупустыни (Вальков, 2001).

Горные чернозёмы Кабардино-Балкарии – почвы расположенные на границе предгорий и горных территорий Центрального Кавказа (800-1200 м над ур. м.) (Кумахов, 2007) возникли и функционируют в уникальных природных условиях.

Горные чернозёмы представляют собой компонент более широкого географического понятия, известного как "горные почвы". Следует отметить, что термин "горные почвы" является скорее географической, а не классификационной категорией, которая включает различные типы почв формирующихся в горах (Фриндланд, 1966). В условиях горных территорий могут встречаться разнообразные почвенные типы, аналогичные тем, что функционируют на равнинах.

Тем не менее, в горах можно выделить и уникальные типы почв, характерные только для горных территорий. Например, такие как горно-луговые почвы (характеризующиеся кислой реакцией и содержанием до 20-30% гумуса в верхнем дерновом горизонте); горно-лугово-степные почвы (отличающиеся от предыдущего типа более нейтральной реакцией и сниженной гумусностью); горные подбуры (высококислые, с богатыми верхними горизонтами, обогащенными потёчным гумусом).

По мнению ряда авторов (Ковалев, 1973; Ромашкевич, 1988; Владыченский, 1998; Вальков, 2001; Молчанов, 2010; Ананко и др. 2018) горные почвы нельзя

считать тождественными равнинным. Оригинальные черты горных почв обусловлены тем, что условия почвообразования в горных областях весьма специфичны и многообразны, что связано, прежде всего, со сложным рельефом горных территорий. Наиболее характерной чертой горного рельефа является его значительная фрагментация и разнообразие геоморфологических форм, а склоны различной формы, крутизны и экспозиции - основные элементы рельефа.

Склоновый рельеф - основная причина процессов денудации и возникновения активных геохимических перемещений, как на поверхности почвы, так и в почвенном профиле, и в подпочвенных слоях. В результате процессов денудации происходит непрерывное удаление частиц мелкозёма и породы, образованных в результате выветривания и процессов почвообразования. Это приводит к формированию профиля с нечётко выраженным строением и малой мощностью, особенно на крутых склонах (Bardelli et al., 2017). Таким образом, горные почвы постоянно подвергаются процессу обогащения продуктами выветривания и почвообразования (с одной стороны), но, в то же время, они постоянно теряют их и обедняются, в результате интенсивного геохимического оттока (Богатырев и др., 1988).

Почвообразующими породами для горных почв являются разнообразные продукты выветривания, преимущественно элювиального, реже аккумулятивного характера. В горных регионах широко распространены остатки меловых и третичных осадочных отложений, таких как известняки, песчаники и сланцы. Кроме того, нередки породы магматического (граниты, базальты) и метаморфического (кварциты, гнейсы) происхождения, что указывает на разнообразие материнских пород, формирующих горные почвы (Ромашкевич, 1988). Элювий горных пород обуславливает высокую щебнистость горных почв и обилие в их составе первичных минералов.

Распределение различных типов горных почв в основном подчинено вертикальной (высотной) поясности, что связано с изменениями ряда климатических факторов, таких как температура воздуха и количество осадков, а также увеличением высоты над уровнем моря. С возрастанием абсолютной

высоты происходит постепенное понижение средней температуры воздуха, примерно на  $0,5^{\circ}\text{C}$  на каждые 100 метров. В горных районах отмечается возрастание количества атмосферных осадков, относительной влажности воздуха и интенсивности солнечной радиации. Суточные и сезонные климатические колебания в этих условиях выражены значительно сильнее, чем в равнинных регионах. Лесные и луговые экосистемы гор характеризуются относительно высокой влажностью, при этом максимум осадков приходится на позднюю весну и начало лета (СевКавНИИгипрозем, 1984).

Описанные специфические условия горного почвообразования придают своеобразие формирующимся в горах почвам и отличают их от равнинных аналогов. Примером таких почв могут служить горные чернозёмы Центрального Кавказа, которые обладают всеми свойствами, характерными для данного типа и при этом обладают оригинальностью и особыми, присущими только им чертами (Горобцова и др., 2018).

#### **1.4 Исторические аспекты изучения генезиса и свойств горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа**

Изучение горных чернозёмов и, залегающих в комплексах с ними горно-луговых чернозёмовидных почв, связано с началом систематического изучения почв Кавказа основоположником генетического почвоведения профессором В.В. Докучаевым, который первым составил почвенную карту Кавказа.

В. В. Докучаев посетил Северный Кавказ в 1878г. В докладе Закавказскому статистическому комитету он писал: "Кавказ является классической страной для изучения тех закономерных соотношений, какие существуют между живой и мертвой природой, между землей, водой и воздухом, с одной стороны, растительным и животным миром, с другой".

На основах материалов собранных на Кавказе, В.В. Докучаев разработал учение о вертикальных почвенных зонах, которое легло в основу последующих представлений о географии почв горных территорий (Молчанов, 2008). К этому

времени относятся и новые сведения о горно-луговых чернозёмовидных почвах Кавказа, которые В.В. Докучаев описывал под названием «рендзины».

Ученики и последователи В. В. Докучаева: С.А. Захаров, К.Д. Глинка, С.Л. Яковлев, Л.Я. Прасолов, С. И. Тюремнов, Н. А. Буш, Б. Б. Польшов, Е. С. Блажний, В. А. Ковда, К. С. Кириченко, С. В. Зонн, Ф. Я. Гаврилюк, П.А. Садименко, В.Ф. Вальков и др. продолжили почвенные исследования на Северном Кавказе. Особые заслуги в разработке вопросов генезиса и географии почв этого региона принадлежат С. А. Захарову, где он активно работал в период с 1913г. по 1949г.

Особое внимание в исследовании горно-луговых почв Кавказа уделено монографии С.А. Захарова (Захаров, 1914), которая является фундаментальным трудом в данной области. В работе подробно описаны условия почвообразования горно-луговых почв, их морфологические особенности и основные физико-химические характеристики. Кроме того, в монографии приведена первая классификация горно-луговых почв, которая впоследствии стала базовой для всех последующих исследований высокогорных почв. Профессор. В.М. Фридланд (Фридланд, 1966) писал: «Книгу С.А. Захарова можно рассматривать как вторую после «Русского чернозёма» монографию в русской и мировой литературе, посвященную одному генетическому типу почв». В этой работе С.А. Захаров пришел к выводу о том, что «...в виду оригинальности морфологических признаков, особенностей почвообразования и своеобразности почвообразователей, горно-луговые почвы, как наиболее характерные из высокогорных образований, заслуживают выделения в отдельный почвенный тип».

В 1923-1924гг. С. А. Захаровым (Захаров, 1923) и К. Д. Глинкой (Глинка, 1924) произведены работы по почвенному районированию Северного Кавказа, в результате которых они впервые изложили принципы составления почвенных карт. С 1937г. под руководством С.А. Захарова продолжены исследования предгорий и горной части Кабардино-Балкарии (Захаров, 1937, 1948). При изучении почв Большой Кабарды, Панков А.М. дал подробное описание горно-

луговых чернозёмовидных почв (Панков, 1926). В.М. Фридланд предложил выделить горно-луговые чернозёмовидные почвы, развивающиеся в зонах горно-луговых и горных лугово-степных почв на карбонатных почвообразующих породах, в отдельный тип (Фридланд, 1966, Молчанов, 2008).

Термин «горно-луговые чернозёмовидные почвы» впервые применил Богословский Н.А., который описал под этим названием горно-луговые почвы Крыма, сформировавшиеся на известняках (Богословский, 1897). Изучением горно-луговых чернозёмовидных почв (Молчанов, 2008) горных областей Крыма, Кавказа, и Средней Азии, занимались многие видные учёные (Неуструев, 1908; Прасолов, 1909; Антипов-Каратаев, 1932; Зонн, 1940; Ливеровский, 1945, 1974).

С.А. Захаров, еще в своих дореволюционных исследованиях, подчёркивал оригинальность чернозёмов Северного Кавказа и попытался объяснить происхождение этих почв, обращая особое внимание на особенности условий почвообразования (Захаров, 1914).

Особые черты кавказских горных чернозёмов привлекали внимание многих авторов (Михайловская, 1936; Маслюгин, Дубошина, 1952; Керефов, Фиапшев, 1966, 1977; Фиапшев, Федорова, 1971). Согласно Фиапшеву Б.Х. (Фиапшев и др., 1985), горные чернозёмы представлены двумя подтипами - выщелоченными и типичными, а подтип горные чернозёмы обыкновенные им не выделяется. С 1964 по 1997гг. специалистами Северо-Кавказского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института по землеустройству, при участии Э.Н. Молчанова, проводились исследования горных почв Северного Кавказа. В работах СевКавНИИгипрозем (1984) горные чернозёмы Кабардино-Балкарии разделялись на три подтипа - выщелоченные, обыкновенные и типичные. На основе многолетних исследований Э.Н. Молчановым был опубликован ряд работ, посвящённых горным почвам (Молчанов, 1971, 1972, 1973, 1988, 1989, 1989, 1991, 2003, 2008, 2010; Молчанов и др., 1990, 2017) и дана сравнительная характеристика основных типов почв высокогорий Северного Кавказа.

В 1978г. на Северном Кавказе работала экспедиция по изучению чернозёмов под руководством профессора Почвенного института им. В. В. Докучаева - В. М.

Фридланда. Исследовательские работы участников этого проекта охватывали все чернозёмные районы СССР. По результатам работ в свет вышла серия монографий под общим названием "Чернозёмы СССР" (Фиापшев и др., 1985).

Результаты дальнейших исследований, полученные в ходе обширных работ на Северном Кавказе, внесли значительный вклад в накопление данных, характеризующих почвы в данном регионе. Была опубликована информация о фракционно-групповом составе гумуса горных почв Кабардино-Балкарии, а также результаты научных исследований, направленных на изучение генезиса высокогорных почв Северного Кавказа (Владыченский, Розанов, 1986; Владыченский, 1998; Владыченский и др., 2013). Б.Х. Фиапшев с соавторами представили подробные описания условий и процессов почвообразования, генетических характеристик, физико-химических свойств почв Кабардино-Балкарии, в том числе горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв, а также уделили внимание вопросам классификации и систематики (Фиапшев и др., 1985).

## **1.5 Цифровое почвенное картографирование как инструмент экологического мониторинга**

Основы создания традиционных почвенных карт были заложены еще в трудах В.В. Докучаева и, в процессе становления и развития классического почвоведения, работы осуществлялись по двум основным направлениям:

1. Картографическое отображение структуры почвенного покрова, т.е. нанесение на карту ареалов распространения неких классификационных выделов почв, в соответствии с используемой классификацией;
2. Картографирование пространственного варьирования отдельных почвенных параметров, как правило, характеризующих свойства верхних горизонтов.

Со временем почвенное картографирование эволюционировало. Наиболее существенные изменения в подходах к созданию почвенных карт произошли с появлением данных дистанционного зондирования, а в последние десятилетия - с

внедрением методов математического и геостатистического моделирования (Савин и др., 2019).

Современная почвенная карта аккумулирует целый комплекс информации о географии почв региона и является основой для решения многих практических и научных задач. Почвенная карта стала обязательным инструментом, который позволяет эффективно осуществлять полевые исследования, мониторинговые программы, оценку почвенных и земельных ресурсов при изменении характера землепользования, контроль за состоянием почвенного покрова в условиях наблюдаемых климатических изменений или увеличения антропогенной нагрузки, а также моделирование и оценку рисков в экологии и природопользовании (Lagacherie et al., 2006; Савин и др., 2015, 2019).

Анализ литературных данных показал (Темботов, 2023), что в настоящее время технологии почвенного картографирования развиваются в следующих направлениях:

1. Инвентаризация разных уровней природно-ресурсной информации с использованием различных методов ГИС (Рожков, 1991; Савин, 2004, 2022);
2. Дистанционное зондирование различных видов ландшафтов и их компонентов (Симакова, Савин, 1998; Кравцова, 2005; Boettinger et al., 2010);
3. Цифровая тематическая картография (ЦТК), которая осуществляет производство карт с использованием цифровых технологий на всех этапах исследования (Берлянд, 1997; Greve, 1999; Adhikari et al., 2014; Кириллова и др., 2014).

Используя достижения двух других направлений в области подготовки и создания цифровых данных, ЦТК делает акцент на формализации методов картографии, используемых в традиционных экспертных эмпирических моделях. Задача ЦТК - на основе ограниченного количества почвенных данных и предварительных знаний о почвенно-ландшафтных связях обеспечить точное отображение пространственного распределения почвенных разностей и характеризующих их показателей.

Современные исследования подчёркивают возрастание важности получения точных данных о пространственной вариабельности почвенных свойств, как в естественных, так и в антропогенно трансформированных почвенных экосистемах. Важно разрабатывать информационные продукты, обеспечивающие эффективное использование таких данных.

При этом стоит подчеркнуть, что создание карт пространственного распределения почвенных параметров требует значительного объёма полевых данных, сбор которых представляет собой длительный, затратный и трудоемкий процесс (Темботов, 2023). Значительное сокращение времени и трудозатрат при формировании картографических моделей стало возможным благодаря внедрению статистических методов и использованию данных дистанционного зондирования.

В России задача картографирования и оценки почвенных параметров, в том числе содержания органического углерода (Сорг), является предметом исследований ряда отечественных учёных (Бирюкова, Бирюков, 2011; Щепаченко и др., 2013; Rozhkov et al., 1996; Stolbovoi, 2002). Анализ научных источников показывает (Темботов, 2023), что в традиционной практике при составлении почвенных карт основой выступают контурные части мелкомасштабных почвенных карт, в рамках которых каждому полигону присваивается усреднённое значение содержания органического углерода (Сорг) для всех почвенных типов, входящих в данный полигон. Вместе с тем, известно, что уровень Сорг характеризуется значительной пространственной неоднородностью и зависит от множества факторов, что приводит к изменению его значений даже внутри одного полигона. Вследствие этого при использовании усреднённых данных возникает накопление ошибок, что снижает точность и надёжность подобных картографических продуктов.

В настоящее время большинство исследователей рассматривают наиболее перспективным мультифункциональный подход, предполагающий анализ множества пространственных взаимосвязей в виде функциональных зависимостей между характеристиками геосистемы, отражённой солнечной радиацией и

рельефом (Пузаченко и др., 2002, 2006; Hartemnik, 2013; Arrouays et al., 2014). Применение данного подхода позволяет создавать карты с более высокой точностью и оперативностью, что способствует снижению стоимости и улучшению качества картографирования территории (Brevik, 2013; Савин, 2015, 2022; Minasny, 2017; Elbeih, 2021; Темботов, 2023).

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

Район исследования охватывает предгорную часть Кабардино-Балкарской Республики, которая находится в центральной части Большого Кавказа. На севере Республика граничит со Ставропольским краем; на востоке и северо-востоке - с Республикой Северная Осетия-Алания; на юге, по Главному Кавказскому хребту, проходит государственная граница с Грузией протяженностью 130,7 км; на западе – с Карачаево-Черкесией. Общая площадь Республики составляет 12,5 тыс. км<sup>2</sup>. Для Кабардино-Балкарии характерно исключительное разнообразие природно-климатических условий, которое обуславливает формирование различных ландшафтов (от сухих степей равнины до высокогорных ледников нивального пояса) и сложного почвенного покрова, состоящего из 29 типов горных и равнинных почв, почвогрунтов и более 1500 их разновидностей (Молчанов и др., 1990). Причиной многообразия ландшафтов и соответствующих им почв, согласно концепции А.К. Темботова (Соколов, Темботов, 1989), является принадлежность территории Республики к двум вариантам поясности - эльбрусскому и терскому.

Район исследования занимает площадь 1785 км<sup>2</sup> 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).

### **2.1 Условия почвообразования предгорий Центрального Кавказа**

Рельеф Кабардино-Балкарской республики отличается высокой сложностью и разнообразием, что обуславливает выделение на её территории нескольких

основных геоморфологических зон: равнинной, предгорной, горной и высокогорной (Фиапшев, 1975). Аллювиально-аккумулятивная Кабардинская равнина, с уклоном в западном и юго-западном направлениях, плавно переходит в узкую полосу предгорий, вытянутую параллельно горным хребтам. Территория исследования охватывает предгорья, представляющие собой платообразную возвышенность, прорезанную долинами рек, среди которых наиболее значимы реки Баксан и Малка, а также балками и лощинами.

Климатические условия предгорий Центрального Кавказа в осенне-зимний период формируются под влиянием области повышенного атмосферного давления, связанной с отрогом сибирского антициклона, и зоны пониженного давления, расположенной над Черным морем. В начале осени атмосферный воздух характеризуется низкой влажностью, что способствует установлению сухой и ясной погоды с выраженными суточными колебаниями температуры. Со второй половины октября и до ноября отмечается усиление проникновения влажных атлантических воздушных масс, что приводит к увеличению облачности и выпадению осадков.

В зимний период регион характеризуется частыми длительными фазами сухой погоды с отрицательными значениями температуры воздуха. Весной и летом восточные и северо-восточные ветры обуславливают длительные засушливые периоды на равнинных и предгорных участках. Дополнительно отмечаются вторжения сухих и теплых воздушных масс из Средней Азии, вызывающих повышение летних температур. Вместе с тем, близость Кавказских гор способствует значительному увлажнению территории и увеличению суммы осадков (Разумов и др., 2003; Ашабоков и др., 2005).

Климатические условия, при которых функционируют *горные чернозёмы* (данные по с. Каменноостское, 821 м над ур. м.), характеризуются среднегодовой температурой воздуха  $+7,8^{\circ}\text{C}$ . Осадков выпадает в среднем 560-700 мм/год, испаряемость 707 мм/год, продолжительность безморозного периода - с марта по ноябрь. Сумма среднесуточных температур (более  $+10^{\circ}\text{C}$ ) за период активной вегетации (174-177 дней) составляет около 3000<sup>0</sup> (<https://ru.climate->

data.org/). Формирующийся при таких условиях гидротермический режим горных чернозёмов благоприятен для жизнедеятельности почвенной биоты, а также возделывания сельскохозяйственных культур и многолетних плодовых насаждений.

Наиболее крупные массивы *горно-луговых чернозёмовидных почв* расположены на южных склонах Скалистого хребта и склонах разной экспозиции Джинальского хребта. Климат, при котором сформировались и функционируют горно-луговые чернозёмовидные почвы, близок к описанному выше, характерному для района распространения горных чернозёмов.

Однако, особенности рельефа и постепенное повышение высоты над ур. м. (от 900 м над ур. м. до 1700 м над ур. м.) в местах их расположения и наибольшего распространения приносят изменения и в климатические характеристики. Среднегодовая температура воздуха  $+6^{\circ}\text{C}$ , осадков выпадает в среднем 1191 мм/год (данные по с. Кичмалка, 1090м над ур. м.). Наибольшее количество осадков выпадает в июне (около 161 мм), а минимальное - в январе или декабре (около 45 мм) (<https://ru.climate-data.org/>).

При сопоставлении климатических характеристик районов, где преобладают горные чернозёмы и горно-луговые чернозёмовидные почвы, наблюдаются значительные изменения гидротермического режима (Темботов, 2024). По мере увеличения высоты над уровнем моря отмечается снижение среднегодовой температуры воздуха и одновременный рост суммы атмосферных осадков (Молчанов, 2008; <https://ru.climate-data.org/>).

Морфогенетические и биологические свойства исследуемых почв в значительной степени обусловлены структурно-функциональными особенностями *растительных сообществ*, которые распространены в поясе луговых степей и остепнённых лугов эльбрусского варианта поясности.

Луговые степи, преимущественно расположенные на возвышенных участках рельефа, проявляют сходные морфологические характеристики, видовой состав и продуктивность травяных сообществ с остепнёнными лугами, однако

существенно отличаются по доминантным видам растительности (Титлянова, Вишнякова, 2022).

Для луговых степей типичны разнотравно-ковыльные, типчаковые, разнотравно-бородачевые, типчаково-полынные, низкоосоково-полынные растительные сообщества (Темботов, 2024).

В остепненных лугах распространены разнотравно-свинойные, разнотравно-костровые с *Bromus riparius*, луговоовсяницевые и др. сообщества. Растительность луговых степей, в которых распространены *горные чернозёмы*, в естественных (слабоповреждённых) биогеоценозах нередко представлена олигодоминантными сообществами (рис. 1).



Рис. 1. Примеры растительных сообществ естественных (слабоповреждённых) биогеоценозов в местах распространения различных подтипов горных чернозёмов: (а) обыкновенных, (б) типичных, (в) выщелоченных.

Они характеризуются общим проективным покрытием (ОПП) 90% - 100%, средней высотой травостоя – 35-40 см, высоким видовым разнообразием (около 40 видов на мониторинговую площадку (МП), площадью 100 м<sup>2</sup>). Содоминанты растительного покрова – ксерофитные виды злаков: овсяница валлисская (*Festuca*

*valesiaca*), бородач кровоостанавливающий (*Bothriochloa ischaemum*), костер переменчивый (*Bromus commutatus*), овсяница красная (*Festuca rubra*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), кострец пестрый (*Bromopsis variegata*), мятлик луговой (*Poa pratensis*) и др..

Из разнотравья распространены: подмаренник настоящий (*Galium verum*), репешок обыкновенный (*Agrimonia eupatoria*), погребок малый (*Rhinanthus minor*), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*), вязель пестрый (*Coronilla varia*), бородавник обыкновенный (*Lapsana communis*), клевер луговой (*Trifolium pratense*), шалфей степной (*Salvia nemorosa*), чабрец пастбищный (*Thymus pastoralis*), молочай степной (*Euphorbia stepposa*).

Так как горные чернозёмы являются высокоплодородными почвами, то большая их часть (кроме тех участков, которые невозможно использовать из-за сложного рельефа или доступности расположения) используются под пашню или многолетние садовые насаждения. Основными возделываемыми культурами являются кукуруза, подсолнечник, озимая пшеница (рис. 2).



Рис. 2. Примеры агроценозов и наиболее распространённых в районах исследования сельскохозяйственных культур (кукуруза, подсолнечник, озимая пшеница, многолетние плодовые насаждения).

*Горно-луговые чернозёмовидные почвы* сформировались и функционируют под остепненными лугами и горными луговыми степями с разнотравно-

бородачевыми, разнотравно-костровыми (*Bromus riparius*) и разнотравно-типчачковыми растительными сообществами. В естественных (слабоповреждённых) биогеоценозах ОПП составляет 95% - 100%, средняя высота травостоя – 25-30 см, видовое богатство – 25-35 видов на МП.

Содоминанты растительного покрова – ксерофитные и мезоксерофитные виды злаки: овсяница луговая (*Festuca pratensis*), тонконог крупноцветковый (*Koeleria macrantha*), тимофеевка степная (*Phleum phleoides*). Из разнотравья распространены кровохлебка лекарственная (*Sanguisorba officinalis*), лабазник обыкновенный (*Filipendula vulgaris*), подмаренник настоящий (*Galium verum*), эспарцет Биберштейна (*Onobrychis biebersteinii*) и др.

Особенности рельефа, расположения и морфогенетические свойства описываемых почв (небольшая мощность и высокая каменистость почвенного профиля) являются причиной использования их не под пашню, а под сенокосы и пастбища. Активный выпас нередко приводит к изменению растительного покрова пастбищ, исчезновению ценных кормовых и внедрению неподаемых и сорных видов (манжетка обыкновенная (*Alchemilla xanthochlora*), молочай грузинский (*Euphorbia iberica*) и др.) (рис. 3).



Рис. 3. Примеры растительных сообществ на пастбищах района исследований.

## 2.2 Влияние высотно-поясной структуры горных территорий на условия почвообразования

Исследование почвенного покрова в ареалах распространения горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв на территории Кабардино-Балкарии было выполнено с опорой на теоретические положения, сформулированные А.К. Темботовым, касающиеся биологической значимости высотно-поясной организации горных экосистем и вариативного влияния элементов высотной поясности на морфологическое и генетическое разнообразие почв (Темботов, 1972; Темботов и др., 1997).

Предложенная А.К. Темботовым система типизации поясных спектров (Темботов, 1972; Соколов, Темботов, 1989; Темботов, Темботова, 2001) включает пять иерархических уровней: когорта поясности, тип, подтип, вариант и пояс в пределах конкретного варианта. Такой подход обеспечивает детальную стратификацию почв по признакам, отражающим комплексное воздействие высотной дифференциации и биоклиматических факторов. В соответствии с указанной концепцией, центральная часть Северного Кавказа относится к восточно-северокавказскому типу, континентальному подтипу поясности, который в пределах Республики объединяет эльбрусский и терский варианты.

Эльбрусский вариант поясности охватывает район Пятигорье – Эльбрус. Северная граница варианта проходит по линии Тебердино-Даутский водораздел – западный край Ставропольской возвышенности, а юго-восточная граница с терским вариантом поясности проходит по линии гор Дыхтау – Каракая – нижнее течение реки Баксан (рис. 4).

Терский вариант поясности включает бассейны рек Терек и Аргун, на юго-востоке простирается до гребня Андийского хребта. На высоте более 1500 м над ур. м. оба варианта обладают одинаковым поясным спектром (нивальный, субнивальный, альпийский и субальпийский). Ниже указанной высоты наблюдаются различия в поясной структуре терского и эльбрусского вариантов (табл. 1). Сплошной пояс широколиственных лесов в эльбрусском варианте

отсутствует, а лесные биоценозы занимают лишь отдельные участки на склонах северной и северо-западной экспозиции, тогда как в терском варианте пояс широколиственных лесов хорошо развит и чётко выражен (Горобцова и др., 2015, Темботов, 2017).

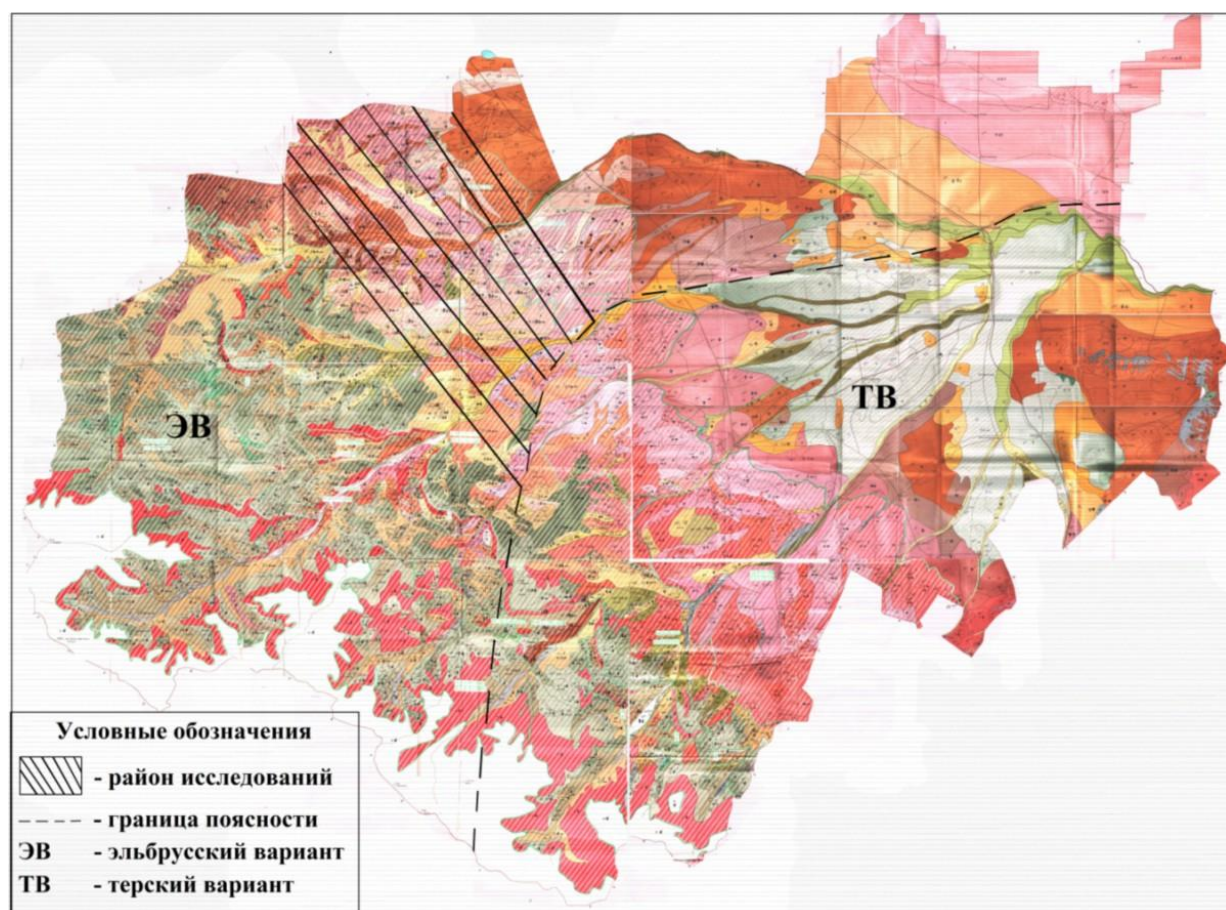


Рис. 4. Граница терского и эльбрусского вариантов поясности и район исследования горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв в поясе луговых степей и остепнённых лугов эльбрусского варианта поясности Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии).

Причиной указанных различий являются орографические особенности исследуемых территорий, наличие и расположение горных хребтов, которые регулируют распространение сухих и влажных воздушных потоков и формируют характерные для каждого варианта поясности климатические условия. Терскому варианту поясности соответствует более мягкий и влажный климат, эльбрусскому - более сухой и континентальный. Экосистемы всех высотных поясов эльбрусского варианта характеризуются заметной ксерофитизацией ландшафтов, причиной которой служит пологость склонов, ширина речных долин

и свободная циркуляция сухих ветров из Прикаспия (Горобцова и др., 2016). Поэтому эльбрусский вариант имеет черты сухого континентального подтипа полупустынного типа поясности.

Таблица 1 – Высотно-поясная структура эльбрусского и терского вариантов поясности (А. К. Темботов, 1972)

Эльбрусский вариант поясности	Терский вариант поясности
Степная зона (пояс) (от 170 до 400 м над ур. м.)	Степная зона (пояс) (от 170 до 400 м над ур. м.)
Пояс луговых степей (от 400-500 до 700-800 м над ур. м.)	Лесостепной пояс (от 400 до 500-700 м над ур. м.)
Пояс остепнённых лугов (от 600-700 до 1500 м над ур. м.)	Пояс широколиственных лесов (от 500 до 1600-1700 м над ур.м.)

Горные чернозёмы и горно-луговые чернозёмовидные почвы Кабардино-Балкарии расположены 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.) на территории эльбрусского варианта поясности и занимают площадь около 1650 км<sup>2</sup> (рис. 1). Условия почвообразования эльбрусского варианта способствовали формированию горных чернозёмов под богатой травянистой лугово-степной растительностью предгорий.

В более влажных и тёплых условиях терского варианта поясности горных чернозёмов нет. На аналогичной высоте здесь сформировался лесостепной пояс (от 400 до 500-700 м над ур. м.) и пояс широколиственных лесов (от 500 до 1600-1700 м над ур. м.), где под лесными сообществами распространены серые и бурые горные лесные почвы, а под послелесной травянистой растительностью - горные дерново-карбонатные (Хакунова и др., 2018).

Таким образом, рельеф и связанные с ним природно-климатические условия предгорий Центрального Кавказа формируют расположение и чередование высотных поясов и соответствующую структуру растительного и почвенного покрова района исследований.

### 2.3 Почвы района исследования

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*. Именно в таком порядке сменяют друг друга ареалы указанных подтипов по мере увеличения высоты их залегания от 500 м над ур. м. до 1000 м над ур. м., а также под влиянием сочетания различных почвообразующих факторов.

Для изучения морфогенетических свойств исследуемых почв закладывали полнопрофильные разрезы на участках, не подверженных склоновым эрозийным процессам, с сохранившейся естественной растительностью, обладающих характерными морфогенетическими свойствами и полноразвитым профилем.

Так как горные чернозёмы активно используются под пахотные угодья, удобные для земледелия участки практически полностью распаханы. Склоны и расположенные вдали от дорог участки используются для выпасов и сенокосов. Места, выделенные под сенокосы, нередко ограждены и испытывают минимальное антропогенное воздействие. На них сохраняются разнотравно-злаковые лугово-степные растительные сообщества и почвы, на которых они функционируют, мы в некоторых случаях (при отсутствии участков естественных биогеоценозов) рассматривали как слабоповреждённые, а их свойства использовали для сравнения с пахотными аналогами.

Участки естественных биогеоценозов сохранились только в труднодоступных из-за отсутствия дорог и или сложного рельефа местах, и были изучены в процессе полевых исследований.

*Горные чернозёмы обыкновенные*, занимающие площадь около 263 км<sup>2</sup> (СевКавНИИгипрозем, 1984), распространены в Зольском районе на отрогах Лесистого хребта и на южных склонах Скалистого хребта. Большой массив расположен в долине р. Малка и ее притоков, охватывает окрестности с. Хабаз, с.

Кичмалка, с. Каменноостское, с. Сармаково. Узкая полоса описываемых почв расположена по левому берегу р. Баксан в окрестностях с. Кёнденен, с. Заюково и с. Исламей (Молчанов и др., 1971).

Карбонатные почвообразующие породы (глины, суглинки и элювио-делювий осадочных карбонатных пород) обуславливают карбонатность почвенной массы и вскипание мелкозема (при взаимодействии с 10% HCl) с поверхности и по всему профилю. Рассмотренные ниже почвенные разрезы естественных (малоповреждённых) и пахотных горных чернозёмов расположены на участках, не подверженных эрозионным процессам, и обладают типичными морфогенетическими, физико-химическими и биологическими свойствами, характерными для данного подтипа.

*Естественный горный чернозём обыкновенный* ( $\frac{Ad}{0-5} + \frac{A}{5-18} + \frac{AB}{18-33} + \frac{B1}{33-47} + \frac{Bca}{47-84} + \frac{BC}{84-110}$ ) (рис. 5) обладает тёмно-серым цветом верхних горизонтов (Ad+A), плотной дерниной, с обилием корней и червороин, слегка влажный, уплотнённый, комковато-зернистая структура хорошо выражена, гранулометрический состав среднесуглинистый.

Бурые тона, неоднородность окраски, затёки и пятна появляются на глубине ниже 30см (гор. AB). Приблизительно на этой же глубине увеличивается диаметр структурных агрегатов. В гор. (B1) структура призматическая, возрастает плотность сложения. Вскипание отмечено с поверхности, усиливается на глубине 22см, выцветы CaCO<sub>3</sub> - с 50см, пятна белоглазки - с 68см. В профиле естественного горного чернозёма обыкновенного, начиная с гор. (A), наблюдаются многочисленные включения гальки (диаметром 1-5см), количество которой увеличивается с глубиной. Переходы между горизонтами постепенные, заметны по окраске, структуре, наличию новообразований.



Рис. 5. Разрез естественного чернозёма обыкновенного карбонатного маломощного среднегумусного среднесуглинистого на жёлто-бурых карбонатных суглинках. Зольский район, окр. с. Камлюково (43°76'755''с.ш.; 43°21'130''в.д.; высота – 752 м над ур.м.).

*Горный агрочернозём обыкновенный* ( $\frac{Апах}{0-20} + \frac{А}{20-37} + \frac{АВ}{37-57} + \frac{В1}{57-76} + \frac{Вса}{76-104} + \frac{ВС}{104-140}$ ) описали на поле под посевами кукурузы. Координаты местоположения разреза: 43°75'012''с.ш.; 43°02'609''в.д.; высота 871 м над ур.м. Верхние горизонты горного агрочернозёма обыкновенного также имеют однородную тёмно-серую окраску, приобретающую бурый оттенок к нижней границе гор. (АВ). Структура гор. (Апах) комковато-пылеватая, непрочная, после дождя заплывает, образуя корку на поверхности почвы. Гранулометрический состав тяжелосуглинистый, почва вскипает с поверхности.

С глубиной возрастает плотность сложения, агрегаты укрупняются. В гор. (АВ) структура крупнокомковатая, в гор. (В1) - комковато-глыбистая. Ниже по профилю усиливается неоднородность окраски, гор. (Вса) плотный, грубопризматический, с затёками гумуса, белыми выцветами, налётами, плесенью карбонатов, многочисленными вкраплениями белой и серой гальки, активно взаимодействующей с 10% HCl.

Гор. (BC) плотный, бесструктурный, жёлто-бурый, с чёрными пятнами гумуса, белыми примазками  $\text{CaCO}_3$  и вкраплениями гальки, глинистый, бурно вскипает. Количество корней и следов проявления жизнедеятельности почвенной мезофауны в агрогенной почве заметно меньше. Профиль слабодифференцирован на горизонты, переходы постепенные.

Естественные *горные чернозёмы типичные* распространены в районе исследования на площади 102 км<sup>2</sup> (СевКавНИИгипрозем, 1984), на высотах 700-800 м над ур. м., на границе поясов луговых степей и остепнённых лугов, занимая переходные от низкогорий к предгорьям участки. Описываемые почвы не образуют обширных массивов, рельеф в пределах их ареала сильно расчленен глубокими ущельями небольших рек и обширными балками на систему небольших по площади водоразделов. Они образуют узкую полосу севернее горных чернозёмов обыкновенных по левобережью р. Кичмалка и далее по левобережью р. Малка до с. Сармаково. Другой массив расположен в междуречье Малка - Куркужин севернее с. В. Куркужин (Молчанов, 1989). Почвообразующими породами для них являются продукты выветривания карбонатных пород: элювио-делювий известняков и карбонатные глины.

Приведённое ниже описание профиля *типичного горного чернозёма* ( $\frac{\text{Ад}}{0-6} + \frac{\text{А}}{6-26} + \frac{\text{АВ}}{26-50} + \frac{\text{В1}}{50-73} + \frac{\text{В2}}{73-110} + \frac{\text{ВС}}{110-140}$ ), функционирующего в естественном биогеоценозе (рис. 6) подтверждает, что данный подтип обладает наиболее характерными признаками, формирующимися при дерновом процессе: интенсивным накоплением гумуса, неглубоким вымыванием карбонатов (вскипание от 10% соляной кислоты в гор. (В1)), отсутствием накопления илистой фракции в средней части профиля.

Мощный разнотравно-злаковый растительный покров обуславливает наличие плотной дернины, состоящей преимущественно из корней злаков. Почвенные бусы, многочисленные ходы дождевых червей, зернистая структура, практически черная окраска гумусово-аккумулятивных горизонтов (Ад+А+АВ). В гор. (АВ) проявляются бурые тона, возрастает размер почвенных агрегатов (структура

комковато-ореховатая), появляются включения мелкой гальки, однако сохраняется обилие корней и червороины, почва довольно рыхлая, переход в гор. (B1) и (B2) постепенный, заметен по усилению неоднородности окраски, крупнокомковато-глыбистой структуре, увеличению количества и размера (диаметром до 10 см) каменистых включений, которые бурно реагируют с 10% HCl, при этом почвенная масса в верхней половине разреза не вскипает.

Нижняя половина профиля описываемой почвы (гор. (B2) и ниже) имеет весьма неоднородную окраску: жёлтые пятна глины, белые включения гальки, тёмные затёки и пятна гумуса. Почва реагирует с 10% HCl – на глубине 70 см, видимых скоплений карбонатов не обнаружено. Гранулометрический состав среднесуглинистый по всему профилю (рис. 6).



Рис. 6. Разрез естественного чернозёма типичного среднемощного среднегумусного среднесуглинистого на жёлто-бурых карбонатных глинистых породах с примесью гальки. Баксанский район, окр. с. Верх. Куркужин, 43°69'415'' с. ш.; 43°24'991'' в. д.; высота – 856 м над ур.м.

Профиль *агрочернозёма типичного* (координаты - 43°72'743'' с. ш.; 43°35'462'' в. д.; высота – 699 м над ур.м.) по строению схож с целинным аналогом  $\left(\frac{A_{пах}}{0-20} + \frac{A}{20-46} + \frac{AB}{46-67} + \frac{B1}{67-90} + \frac{Bca}{90-140} + \frac{BC}{140-180}\right)$ . Отличия заключаются в

более тяжелом гранулометрическом составе (тяжелосуглинистом), менее выраженной мелкокомковатой и комковатой структуре пахотного и подпахотного горизонтов, более рыхлом сложении, слабо выраженных границах горизонтов, и наличием в нижней части профиля карбонатного мицелия (выделен гор. (Вса)). Однородная тёмно-серая окраска нарушается бурыми тонами в гор. (В1), вниз по профилю пестрота усиливается, особенно в гор. (Вса). Почва вскипает с 80 см, карбонатный мицелий отмечен на метровой глубине. Каменистых включений не обнаружено, единичные корни различного диаметра, в основном тонкие (1-3 мм), ходы червей распространены до 70-80 см.

*Горные чернозёмы выщелоченные* занимают площадь около 538 км<sup>2</sup> (СевКавНИИгипрозем, 1984) и распространены в интервале абсолютных высот 700-1200 м над ур. м., в поясе остепнённых лугов, в условиях периодически промывного водного режима на элювио-делювии известняков, известковистых песчаников, карбонатных суглинков и глин.

Эти почвы функционируют на возвышенных аккумулятивно-денудационных крупногрядовых равнинах, их большие массивы расположены в верховьях рек Южная Золка и Мокрая Золка (окрестности с. Белокаменское, с. Джинал) и в междуречье р. Куркужин и р. Баксан к востоку и северо-востоку от с. Верхний Куркужин. Узкая полоса выщелоченных чернозёмов залегает вдоль правого берега р. Баксан от с. Заюково до с. Исламей (Пхитиков, 2011). При сочетании с горными чернозёмами типичными эти почвы тяготеют к возвышенным элементам рельефа и пологим склонам северной экспозиции (Молчанов, 1989).

Примером морфогенетических свойств *естественного горного чернозёма выщелоченного* является приведённое ниже описание разреза  $\left(\frac{Ad}{0-5} + \frac{A}{5-30} + \frac{AB}{30-50} + \frac{B}{50-84} + \frac{BC}{84-130}\right)$  (рис. 7). Дерновый гор. (Ad) тёмноокрашенный, зернистый (почвенные бусы), среднесуглинистый, с обилием червороин, постепенно переходит в гор. (A) - слегка влажный, тёмно-серый, довольно рыхлый, комковато-зернистый, среднесуглинистый, множественные корни, ходы дождевых червей, частицы SiO<sub>2</sub>, единичные включения мелкой гальки. Более

светлая окраска, бурые оттенки и крупнокомковатая структура отмечены в гор. (АВ). Плотность сложения профиля увеличивается с глубиной. В глыбистом гор. (В) и ниже по профилю обнаружены многочисленные карбонатные включения гальки и щебня. Вскипание почвы наблюдается с 50см, реакция почвенного раствора ниже этой границы – слабощелочная (рис. 12, стр. 69). В гор. (ВС) отмечен карбонатный мицелий, что, вероятно, связано с высокой карбонатностью почвообразующей породы, которая бурно реагирует при взаимодействии с кислотой. Гор. (ВС) представляет собой скопления карбонатных глинистых пород, обломки щебня, гальку и смешанную с ними почвенную массу (рис. 7).

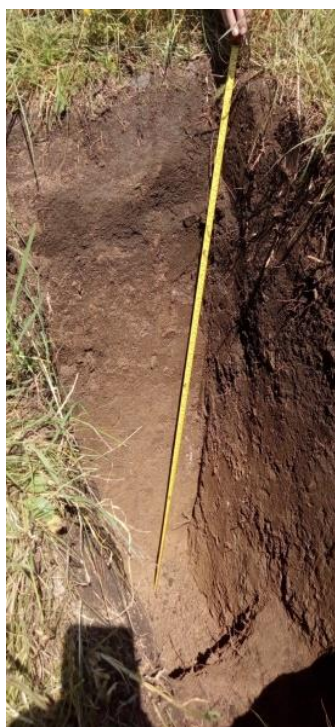


Рис. 7. Разрез естественного чернозёма выщелоченного среднемощного малогумусного среднесуглинистого на жёлто-бурых карбонатных отложениях карбонатных глин, крупнозернистого грубого песка и щебня. Баксанский район, окр. с. Исламей, 43°67'876''с. ш.; 43°44'508''в. д.; высота - 561 м над ур. м.

Пахотный *горный чернозём выщелоченный* ( $\frac{A_{\text{пах}}}{0-20} + \frac{A}{20-38} + \frac{AB}{38-64} + \frac{B}{64-88} + \frac{BC}{88-120}$ ) (координаты - 43°76'624''с. ш.; 43°37'968''в. д.; высота – 574 м над ур. м.)

с поверхности серого цвета, пылевато-мелкокомковатый, структурные отдельности непрочные, при увлажнении образуется корка, среднесуглинистый,

рыхлый, но вниз по профилю плотность заметно возрастает уже с глубины 30 см. Переход вгор. (АВ) заметен по более светлой окраске, появлению бурого оттенка, укрупнению структурных отдельностей. Корни и ходы дождевых червей распространяются на глубину 50 см, но большая их часть сосредоточена в гор. (А). Вскипание почвенной массы наблюдается в гор. (В), где происходит увеличение каменистых включений, активно реагирующих с кислотой. Преобладает бурая окраска, на фоне которой выделяются тёмные затёки гумуса, белая и серая мелкая галька. В гор. (ВС) вскипание усиливается, появляются куски щебня (размером до 5 см), количество гальки и её размеры увеличиваются.

*Горно-луговые чернозёмовидные почвы (Mollic Leptosols Eutric, WRB, 2022),* общая площадь которых в районе исследования составляет 733 км<sup>2</sup> (СевКавНИИгипрозем, 1984) распространены в поясе луговых степей и на нижней границе субальпийского пояса (от 700 м над ур. м. до 1700 м над ур. м.). Эти почвы нередко залегают в сочетаниях с типичными и выщелоченными горными чернозёмами, под покровом остепненной субальпийской луговой растительности (Горобцова и др., 2018, Темботов, 2024).

Сформированные на продуктах выветривания карбонатных пород (элювио-делювий известняков и известковистых песчаников) и в более влажных по сравнению с горными чернозёмами условиях, они нередко занимают пониженные элементы рельефа и обладают полноразвитым профилем, мощностью 40-50 см (Темботов, 2024). На крутых склонах чаще встречаются смытые почвы с маломощным профилем (около 12-18 см).

Горно-луговые чернозёмовидные почвы обладают высоким потенциальным плодородием, однако из-за сложности рельефа не используются в земледелии, а являются высокопродуктивными сенокосами и пастбищами. Для исследования выбраны участки, не повреждённые активным выпасом, с хорошо развитым растительным покровом с типичными для пояса остепнённых лугов разнотравно-злаковыми растительными сообществами. Почвы на таких участках сохраняют характерные для данного типа свойства и рассматривались нами как

естественные. В районе исследования выделили и описали два подтипа горно-луговых чернозёмовидных почв: типичные, выщелоченные.

Примером строения профиля *горно-луговых чернозёмовидных типичных почв* может служить описание разреза (Зольский район, окрестности с. Каменноостское, 43°78'297'' с. ш.; 43°04'415'' в. д.; высота - 1261 м над ур. м.) (рис 8, а). Общая мощность почвенного слоя 43-45 см ( $\frac{Ad}{0-10} + \frac{A}{10-30} + \frac{AB}{30-43}$ ).

Окраска хорошо развитого дернового гор. (Ad) тёмно-серая с коричневатобурым оттенком, рыхлый, слегка влажный, с комковато-зернистой структурой, тяжелосуглинистый. Между корнями травянистых растений мелкие щебнистые включения, копролиты, переход в нижележащий горизонт постепенный. В гор. (A) усиливаются коричневые тона, увеличивается количество каменистых включений, он более плотный, комковатый, тяжелосуглинистый, пронизан корнями травянистых растений, червороинами, переход постепенный (Горобцова и др., 2021).

Гор. (AB) слегка влажный, коричневатобурый, рыхлый, тяжелосуглинистый, комковатый, в нижней части слабо вскипает при взаимодействии с 10% HCl, наблюдается обилие каменистых включений, корни, червороины. Далее следует резкий переход к материнской породе, которая представляет собой светло-серую плиту щебнистого карбонатного сланца.

*Горно-луговая чернозёмовидная выщелоченная почва* (Зольский район, окрестности с. Хабаз, 43°72'291'' с. ш.; 42°87'610'' в. д.; высота - 1131 м над ур. м.) (рис. 8, б) обладает меньшей мощностью, почвенный слой около 25 см ( $\frac{Ad}{0-8} + \frac{A}{8-25}$ ). Дерновый гор. (Ad) слегка влажный, тёмно-серый, почти чёрный, рыхлый, зернистый, среднесуглинистый, на корнях злаковых трав почвенные бусы, дернина плотная, корни травянистых растений составляют более 50 % объёма. Ниже (гор. A), более плотный, структура мелкокомковатая, среднесуглинистый, многочисленные корни, червороины, осколки щебня.

Переходные горизонты отсутствуют, почвенная масса располагается на щебнистом элювио-делювии карбонатной материнской породы. Вскипание

почвенной массы отсутствует, однако каменистые включения и почвообразующая порода бурно взаимодействует с кислотой (рис. 8, б).



Рис. 8. Разрезы естественных горно-луговых чернозёмовидных почв района исследования:  
а) типичная; б) выщелоченная.

## ГЛАВА 3. Материалы и методы исследований

### 3.1 Объекты 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).

Почвообразующими породами для горных чернозёмов являются продукты выветривания карбонатных плотных осадочных пород (Хакунова и др., 2018) – элювио-делювий известняков, песчаников, известняков и мергелей, карбонатные глины и суглинки (СевКавНИИгипрозем, 1984; Вальков, 2001). Щебенчато-каменистые включения карбонатных материнских пород нередко встречаются с поверхности и по всему профилю горных чернозёмов (Горобцова и др., 2023).

*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).

### **3.2 Методы исследований**

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).

#### **3.2.1 Методы полевых исследований**

При изучении биологических свойств почв предгорий Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии) провели исследование структуры почвенного покрова и морфогенетических свойств различных подтипов естественных и агрогенных почв. Работы осуществляли в процессе полевых экспедиционных выездов 2016-2023 гг., ежегодно в первой декаде июля, так как биологические процессы подвержены сезонному влиянию.

В целях сведения к минимуму искажающего воздействия склонового смыва, отбор почвенных монолитов осуществлялся преимущественно на участках с выровненной или слабонаклонной морфологией, репрезентативных для ненарушенных биогеоценологических систем, где сохраняется естественный

растительный покров и морфологически полноценно сформированный почвенный профиль (см. рис. 9). Пробы для биохимического анализа динамики почвенных параметров в горных почвенных профилях собирали по генетическим горизонтам на всей глубине почвенного слоя. В данной работе представили описание и анализ динамики исследуемых почвенных показателей в 8 почвенных разрезах (рис. 9).

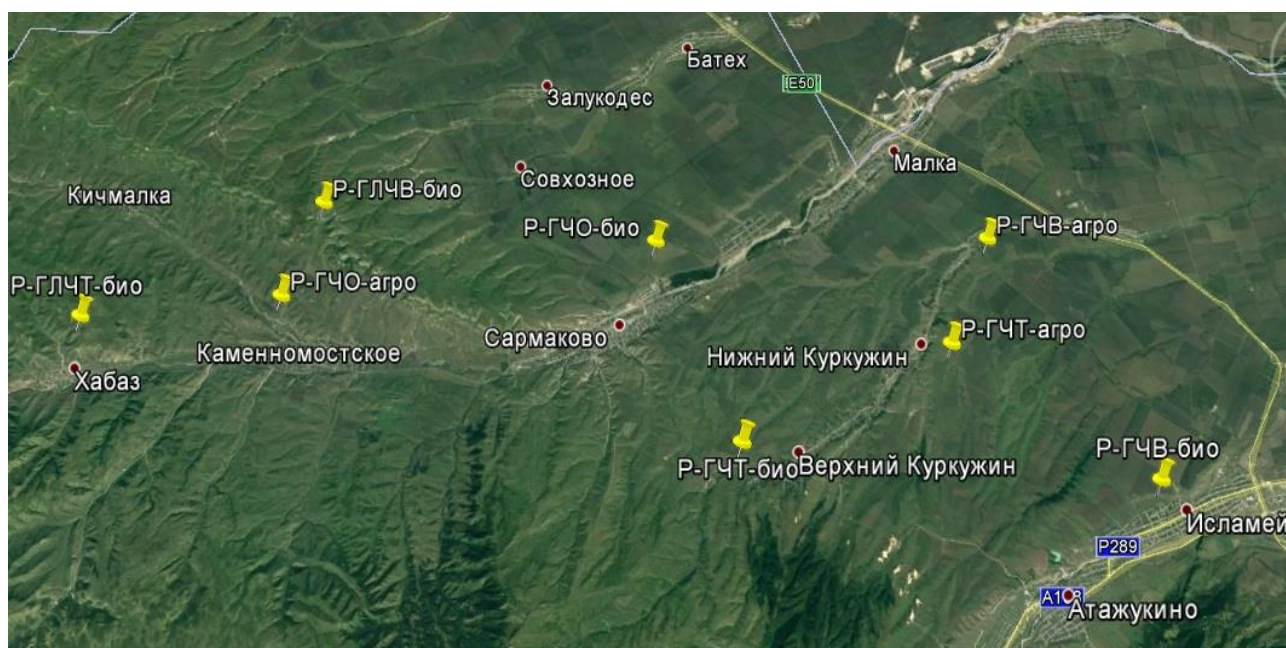


Рис. 9. Места заложения разрезов, характеризующих свойства различных подтипов горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв предгорий Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии).

Сбор и анализ почвенных образцов для изучения пространственной динамики и определения средних значений физико-химических и биологических показателей верхних горизонтов (0-20 см) естественных и пахотных почв осуществляли по общепринятым в экологии и почвоведении методам (Казеев и др., 2003). Для отбора образцов верхних горизонтов исследуемых почв и последующих мониторинговых исследований заложили сеть мониторинговых площадок (МП) размером 50×50 м (Темботов, 2023). На территории МП естественных биогеоценозов осуществляли ботаническое описание растительных сообществ. Отбор смешанных почвенных образцов верхних горизонтов (0-20 см) естественных и пахотных почв МП производили методом конверта. Агрогенные

аналоги различных подтипов горных чернозёмов исследовали под посевами кукурузы в стадии формирования початка (рис. 10).

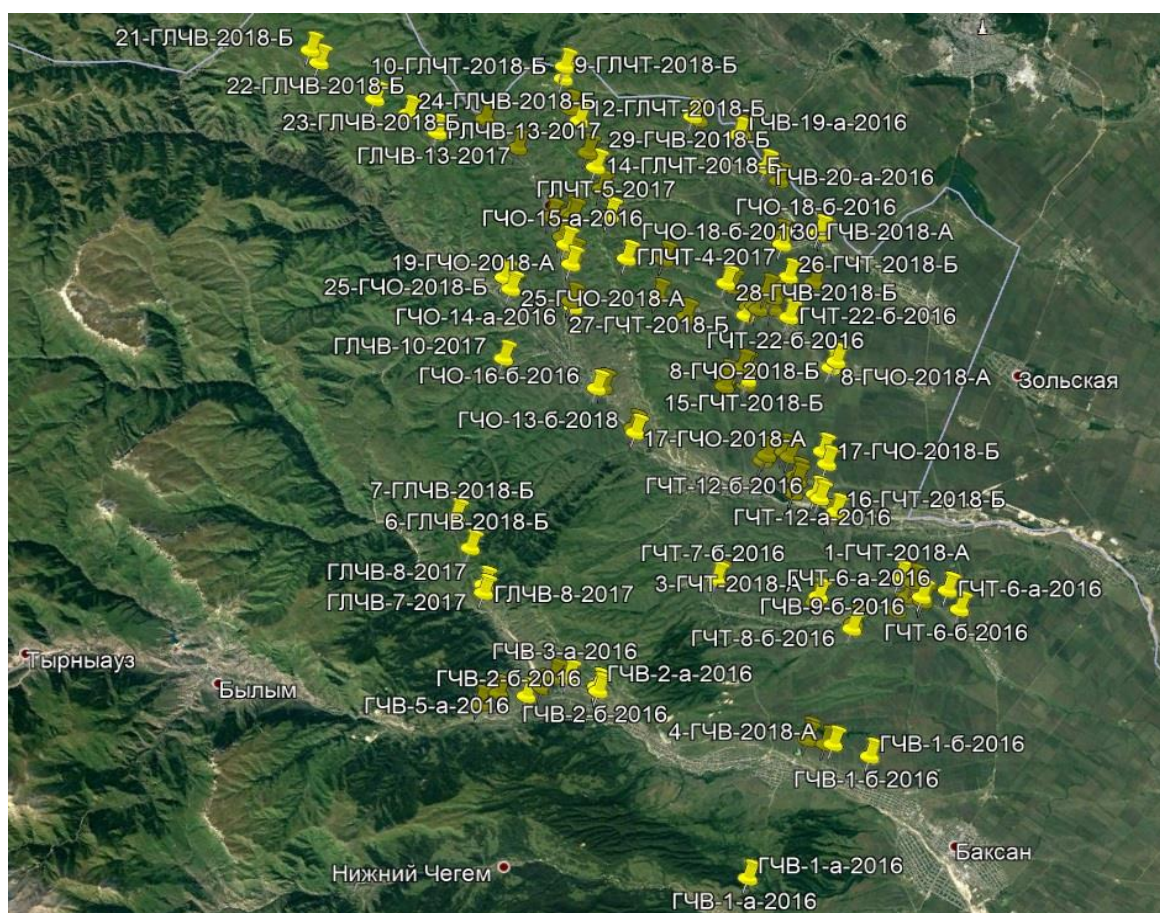


Рис. 10. Места отбора почвенных образцов, характеризующих свойства верхних горизонтов (0-20 см) естественных и пахотных почв предгорий Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии).

В верхних горизонтах исследуемых почв (0-20см) отобрали и проанализировали 135 шт. смешанных образцов (84 шт. характеризуют естественные и 51 шт. – пахотные почвы).

При определении мест отбора образцов использовали почвенную карту (Молчанов и др., 1990). Высоту над уровнем моря и географические координаты определяли по навигационной системе GPSMAP 60 СЕХ: высотные пределы района исследования от 515 до 1893 м над ур. м., координаты территории исследования находятся в границах 43°54'802" – 43°88'910" с. ш.; 43°44'530" – 42°08'068" в. д.. Классификационную диагностику исследуемых почв осуществляли в соответствии с генетической классификацией почв

(Классификация и диагностика почв, 1977). Международные названия почв даны в соответствии с Мировой реферативной базой почвенных ресурсов (WRB, 2022).

### 3.2.2 Методы лабораторных исследований

*Содержание гумуса* определяли по методу Тюрина в модификации Никитина (Аринушкина, 1962; Казеев и др., 2003).

*Скорость базального дыхания* (БД), отражающая устойчивую интенсивность метаболической активности гетеротрофной микробиоты в почвенной среде, определялось в соответствии с методическими указаниями, изложенными в работе Ананьевой с соавт. (2011). Методологический подход основывался на регистрации объёма диоксида углерода, продуцируемого в ходе микробиального дыхания при поддержании оптимального уровня влажности, соответствующего 60 % полной влагоёмкости почвы. Сформированный углекислый газ абсорбировался раствором гидроксида натрия (0,1 н.), остаточное количество которого фиксировалось титриметрически посредством соляной кислоты аналогичной концентрации. Количественная оценка дыхательной активности проводилась на основе разницы между введённым и неизрасходованным объёмом щёлочи по окончании 24-часовой инкубации при температуре 22 °С. Используемый метод, уступает современным (приборным) методам в скорости определения, однако имеет высокую воспроизводимость и позволяет решить поставленные в данном исследовании задачи (Горобцова и др., 2021).

*Определение скорости субстрат-индуцированного дыхания* (СИД) проводили в соответствии с методическими разработками Н.Д. Ананьевой (Ананьева и др., 2011). Скорость субстратно-индуцированного дыхания (СИД) рассматривается как информативный индикатор потенциальной метаболической активности микробного сообщества почв, отражающий интенсивность процессов минерализации органического вещества и позволяющий количественно характеризовать содержание микробной биомассы в исследуемых почвенных образцах (Ананьева, 2003; Благодатская и др., 1995, 2003; Ананьева и др., 2009,

2011; Горобцова и др., 2016). Преинкубацию образцов осуществляли при оптимальной влажности почв (60% ПВ) в течение 7 суток при температуре 22 °С в полиэтиленовых пакетах с воздухообменом. Скорость СИД оценивали по скорости дыхания микроорганизмов после обогащения почвы глюкозой (0,2 мл/г сухой почвы; титр 0,05 г глюкозы) и инкубирования в течение 4 часов при температуре 22 °С. Количественно выделившийся при дыхании CO<sub>2</sub> определяли титриметрически, как описано выше. Скорость СИД для расчётов содержания углерода микробной биомассы (Смик) выражали в мкг CO<sub>2</sub>/г почвы/час).

*Содержание углерода микробной биомассы (Смик)*, представляющего собой живую, активно метаболизирующую часть органического углерода почвы (Сорг), рассчитывали по формуле: Смик (мкг С/г почвы) = СИД (мкл CO<sub>2</sub>/г почвы/час) 40,04 + 0,37 (Anderson, Domsch, 1978). *Запас углерода микробной биомассы* в слое мощностью 20 см рассчитали с учётом плотности исследуемых почв (Горобцова и др., 2021).

Активность каталазы (мл O<sub>2</sub> 1г/1мин) определяли газометрическим методом, остальных ферментов (дегидрогеназа, мг ТФФ 10г/24ч, инвертаза, мг глюкозы 1г/24ч, уреазы, мг NH<sub>3</sub> 10г/24ч, фосфатаза, мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100г/1ч) – колориметрическим методом (Казеев и др., 2003). Контролем при определении активности ферментов служили стерилизованные почвы (180<sup>0</sup>С, 3 часа). Оценку уровня ферментативной активности осуществляли по шкале Гапонюк, Малахова (Гапонюк, Малахов, 1985).

*Полевую влажность почвы* определяли в соответствии с общепринятым весовым методом (Аринушкина, 1962). *Плотность почвы в естественном сложении и при естественной влажности* определяли буровым методом Н.А. Качинского (Вадюнина, Корчагина, 1961). Уровень кислотность почвенной суспензии (рН(H<sub>2</sub>O) (1:2,5)) – потенциометрически (Аринушкина, 1962). Расчет суммарной относительной ферментативной активности и суммарной относительной профильной ферментативной активности проводили по методикам, предложенным Д.Г. Звягинцевым (Звягинцев, 1978).

Для объединения различных данных в общую характеристику биологической активности использовали методику расчета *интегрального показателя эколого-биологического состояния почвы (ИПЭБСП)* (Вальков, и др., 1999; Казеев и др., 2003; Колесников и др., 2006). Для определения ИПЭБСП максимальное значение каждого из показателей в выборке принимали за 100% и по отношению к нему в процентах выражали значение этого же показателя в остальных образцах (Горобцова и др., 2021). При антропогенном воздействии за 100% принимали значение максимальных показателей (обычно, но необязательно, характерных для естественных почв).

$$B_1 = (B_x / B_{\max}) * 100 \% \quad (1),$$

где  $B_1$  – относительный балл показателя;

$B_x$  – фактическое значение показателя;

$B_{\max}$  – максимальное значение показателя.

После этого суммировали относительные значения нескольких показателей. В данном исследовании для расчёта ИПЭБСП использовали: запас гумуса (в слое 0-20 см), показатель, который позволяет учитывать плотность почвы; скорость базального дыхания (БД); скорость субстрат-индуцированного дыхания (СИД); запас углерода микробной биомассы (Смик); активность пяти почвенных ферментов (дегидрогеназы, каталазы, уреазы, фосфатазы, инвертазы).

Затем рассчитывали средний оценочный балл изученных показателей, характеризующий отдельный образец:

$$B_{\text{ср.}} = (B_1 + B_2 + B_3 \dots + B_n) / N \quad (2),$$

где  $B_{\text{ср.}}$  – средний оценочный балл показателей;

$N$  – число показателей.

Интегральный показатель эколого-биологического состояния почвы рассчитывают аналогично формуле (1):

$$\text{ИПЭБСП} = (B_{\text{ср.}} / B_{\text{ср. max}}) * 100\% \quad (3),$$

где  $B_{\text{ср.}}$  – средний оценочный балл всех показателей;

$B_{\text{ср. max}}$  – максимальный оценочный балл всех показателей.

При антропогенном воздействии на почвенный слой наблюдается тенденция к снижению средних значений большинства выбранных биологических показателей, хотя некоторые параметры биологической активности почвы могут демонстрировать повышение. Конечное снижение ИПЭБСП в значительной мере определяется степенью антропогенного воздействия, проявляя при этом чёткую корреляционную зависимость (Вальков и др., 1999).

При расчёте ИПЭБСП, характеризующего весь почвенный профиль, производили расчёт контролируемых показателей для каждого почвенного горизонта. Значения, установленные для конкретного почвенного горизонта, умножали на его мощность и плотность сложения. Полученные для отдельных горизонтов результаты суммировали (Казеев и др., 2004).

*Статистическая обработка.* Расчет статистических параметров (средние значения, стандартные отклонения, коэффициенты вариации, ошибки средних и др.), t-test для независимых выборок (t-test, independent by groups), 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  $\alpha = 0.05$  (Горобцова и др., 2017).

### **3.2.3 Основные подходы и методы анализа отображения пространственно-сопряженной информации при создании интерактивной картографической модели**

Методологический подход к созданию интерактивной картографической модели (ИКМ), которая отображает структуру и свойства почвенного покрова исследуемых территорий с учётом их хозяйственного использования (Темботов, 2014), основывали на технологии, разработанной в лаборатории биогеоценологии и исторической экологии им. В.Н. Сукачева группой под руководством Ю.Г. Пузаченко. Авторы применяли предлагаемый подход для изучения и картографирования различных элементов ландшафта (Пузаченко и др., 2002,

2006; Козлов, 2006; Пузаченко, 2004, 2009; Сандлерский, Пузаченко, 2009, Горобцова и др., 2018).

Созданные технологии показали свою эффективность при оценке состояния почвенного покрова наклонной Кабардинской равнины (Темботов, 2017) и создании ИКМ визуализирующей ареалы распространения, хозяйственное использование и свойства почв равнинных территорий Кабардино-Балкарии. В данной работе методы и технологии адаптировали для описания горных почв.

Согласно применяемой методике, при создании ИКМ необходимо учитывать разнообразие рельефа горных территорий и, связанные с ним, климатические особенности, а также неоднородность растительного покрова и хозяйственное использование предгорий Центрального Кавказа. Для учёта влияния особенностей ландшафта на почвенный покров использованные материалы структурированы на два информационных блока:

*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*) – международной миссии по сбору данных, на основе которых формируется цифровая модель рельефа территории Земли.

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

Основой ИКМ служит блок «внешней» информации, а его важнейшей частью являются многоканальные сканерные снимки, полученные со спутников Landsat ([www.landsat.org](http://www.landsat.org)). Выбор съёмочной системы Landsat объясняется её информативностью, масштабом исследований, временным охватом и свободным доступом к некоторым снимкам данных спутников (<http://glovis.usgs.gov/>, <http://earthexplorer.usgs.gov>). В исследовании применялись мультиспектральные

изображения Центрального Кавказа, полученные со спутника Landsat 8. Основные параметры используемых данных приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика используемой сцены спутниковой информации

Срок съемки	Съемочная система	Уникальный номер сцены (ID)	Координаты сцены (левый верхний угол)	Облака, %	Высота солнца (градусы)	Азимут солнца (градусы)
24.06.2017 г.	Landsat 8 OLI-TIRS	LC81710302017175L GN00	44.134451° с. ш. 41.594639° в. д.	6,85	64,33	134,07

Мультиспектральные сканеры спутника Landsat позволили оценить величину отраженной солнечной радиации в длине волн 450-2350 нм с пространственным разрешением 28,5 м на местности. Кроме того, спутник Landsat 8 обладает двумя дополнительными дальними инфракрасными каналами, которые отражают радиацию в длине волн от 10300 до 12500 нм с разрешением 100 м. Это позволяет охватить большую часть спектра солнечной радиации (Пузаченко и др., 2010). Наряду с прямыми значениями спектральной яркости каналов Landsat, использовали разнообразные индексы (табл. 3), которые отражают специфические соотношения между каналами съемки и имеют приблизительную физическую интерпретацию (Moreno, 1999; Кренке, Пузаченко, 2008; Сандлерский, Пузаченко, 2009; Желтухин и др., 2009).

Таблица 3 – Основные индексы для количественной характеристики природных систем исследуемых регионов и их функциональная интерпретация (Темботов, 2017)

Название, кодировка	Формула	Интерпретация
Красный к зеленому <b>B3_B2</b>	B3/B2	Разделяет различные типы растительности, водные объекты, заболоченные территории

Первый средний инфракрасный к зеленому <b>B5_B2</b>	$B5/B2$	Разделяет различные типы растительности, водные объекты, заболоченные территории
Индекс растительности <b>VI</b>	$(B7-B5)/(B7+B5)$	Выделяет различия в продуктивности биомассы и типах растительности
Нормализованный разностный индекс растительности <b>NDVI</b>	$(B4-B3)/(B4+B3)$	Выделяет различия в количестве влаги, пошедшей на транспирацию и создание биомассы
Относительный индекс растительности <b>IR_R</b>	$(B4/B3)$	Выделяет различия в продуктивности биомассы
Разностный вегетационный индекс <b>VEGI</b>	$B4-B3$	Выделяет различия в продуктивности биомассы
Трансформированный нормализованный разностный индекс растительности <b>TNDVI</b>	$((B4-B3)/(B4+B3))+0.5 \times 0.5$	Выделяет различия в интенсивности фотосинтеза, типах растительности и количестве влаги, пошедшей на транспирацию и создание биомассы
Зеленый нормализованный разностный индекс растительности <b>GNDVI</b>	$(B4-B2)/(B4+B2)$	Разделяет растительность по активности фотосинтеза
Нормализованный разностный индекс растительности скорректированный за влияние почвы <b>SAVI</b>	$((B4-B3)/(B4+B3)+0.5) \times 1.5$	Выделяет различия в количестве влаги, пошедшей на транспирацию и создание биомассы
Индекс содержания оксидов железа <b>B3_B1</b>	$B3/B1$	Выделяет почвы и горные породы с высоким содержанием оксида железа
Нормализованный разностный водный индекс <b>NDWI</b>	$(B5-B4)/(B5+B4)$	Различает содержание воды в зеленой биомассе и почве

Нормализованная разность зеленого и красного <b>NDGR</b>	$(B2-B3)/(B2+B3)$	Разделяет различные типы растительности, водные объекты, заболоченные территории
---	-------------------	--

При разработке ИКМ, кроме индексов, были использованы термодинамические переменные, расчёт которых выполняли по методике С. Ёргенсена и М. Свирежева (Jorgensen, Svirezhev, 2004), дополненной в последующих исследованиях Ю.Г. Пузаченко (Сандлерский, Пузаченко, 2009; Puzachenko, Sandler, 2011).

В процессе работы над ИКМ рассчитали следующие термодинамические характеристики:

$E^{in}$  – приходящая солнечная энергии, Вт/м<sup>2</sup>;

$E^{out}$  – отраженная солнечная энергия Вт/м<sup>2</sup>;

$R$  – поглощенная энергия, Вт/м<sup>2</sup>;

$K$  – приращение информации (энтропия Кульбака), бит;

$S_{out}$  – энтропия отраженной солнечной радиации, бит;

$TW$  – тепловой поток от деятельной поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;

$T$  – температура деятельной поверхности, °С;

$E_x$  – энергия солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;

$STW$  – связанная энергия, Вт/м<sup>2</sup>;

$DU$  – приращение внутренней энергии, Вт/м<sup>2</sup>.

*Данные о климате* – набор глобальных климатических показателей из базы системы WorldClim, который включает данные о минимальной, максимальной и средней температуре, об осадках, набор из 19 производных биоклиматических характеристик (BioClim) исследуемых территорий, а также сведения о климате прошлого и будущего (Темботов и др., 2022).

В качестве исходных материалов использовали и обобщили информацию глобальных климатических баз: Global Historical Climatology Network (GHCN), международной продовольственной организации (FAO), международной

метеорологической организации (WMO), международного центра тропического сельского хозяйства (CIAT), региональной сети гидрометеорологических показателей Южной, Центральной Америки и Карибского моря (R-HydroNet). Всего использовали данные об осадках 47 554 станций, о средней температуре – 22 542 станций, о минимальной и максимальной температурах – 14 835 станций, расположенных в различных точках планеты (<http://wiki.gis-lab.info/w/WorldClim>).

В данной работе использовали 19 биоклиматических характеристик (BioClim), которые являются производными от значений среднемесячных температур и осадков. Эти переменные чаще всего используются при моделировании. Они отражают годовые тренды (среднегодовая температура, среднегодовое количество осадков), сезонность (годовой диапазон температур и осадков), экстремальные или лимитирующие экологические факторы, такие как температура самого холодного и самого теплого месяцев, количество осадков, выпадающих на протяжении наиболее сухого и наиболее влажного кварталов (Темботов и др., 2023).

*Характеристики рельефа получены благодаря Shuttle radar topographic mission (SRTM), на основе которых формируется цифровая модель рельефа (ЦМР) территории Земли. Съёмки проводились международной миссией по сбору данных в феврале 2000г. с борта космического корабля многоразового использования "Шаттл" с помощью радарной интерферометрической камеры и двух радиолокационных сенсоров SIR-C и X-SAR, установленных на его борту.*

На основе данных SRTM создана цифровая трёхмерная модель рельефа исследуемой территории. Эта модель рельефа позволяет проследить общий характер изменений гидротермического режима исследуемых почв, которые могут быть оценены через уклон (градиент) и форму (средняя кривизна или лапласиан) и освещенность поверхности. Так как перераспределение влаги происходит на нескольких иерархических уровнях организации рельефа (микро-, мезо- и макрорельеф), то морфометрические показатели оценивали для каждого из них (Пузаченко и др., 2002; Козлов, 2006).

На исследуемой территории рельеф структурирован по шести основным иерархическим уровням. Для каждого из них были рассчитаны морфометрические характеристики, влияющие на распределение солнечной радиации, тепла и влаги (Темботов, 2017).

В результате объединения всех «внешних» переменных сформировали общую цифровую базу данных, где для каждой точки-пикселя территории в избранном масштабе получили отображение ее мультиспектральных, климатических и рельефных характеристик.

Всего в работе применили 102 внешние переменные. В связи с тем, что используемые данные WorldClim представлены с пространственным разрешением 90 м на местности, остальные переменные привели к этому масштабу. Сформированная цифровая база данных представляет собой таблицу, в которой описывается определенное количество пикселей с пространственным разрешением 90 метров на местности, каждый из которых имеет свои уникальные координаты и набор «внешних» характеристик (Темботов и др., 2022).

Второй информационный блок - «обучающая выборка» - представлен данными, собранными в ходе полевых исследований и лабораторного анализа в период с 2016 по 2023 годы. В состав обучающей выборки включены следующие почвенные параметры: значение рН (Н<sub>2</sub>О), содержание гумуса (%), показатели респираторной активности микробной биомассы почв (скорость базального дыхания и скорость сидероидного дыхания), а также активность четырёх ферментов почвы - инвертазы, фосфатазы, уреазы и каталазы - измеренные в почвенном горизонте 0-20 см. Пробы были отобраны в 135 географически точно привязанных точках, координаты которых определялись с помощью навигатора GARMIN на территории предгорной зоны Центрального Кавказа в пределах Кабардино-Балкарии.

Общая площадь территории, отражённой в модели составила 1785 км<sup>2</sup>. Созданная ИКМ дополнит и расширит имеющуюся модель, отображающую структуру и свойства почвенного покрова равнинных и граничащих с предгорьями территорий Республики. Площадь объединённой модели составит 7060 км<sup>2</sup>, и

позволит осуществлять мониторинг состояния почв на той части КБР, которая подвержена максимальному хозяйственному (пахотному) использованию (рис. 11).

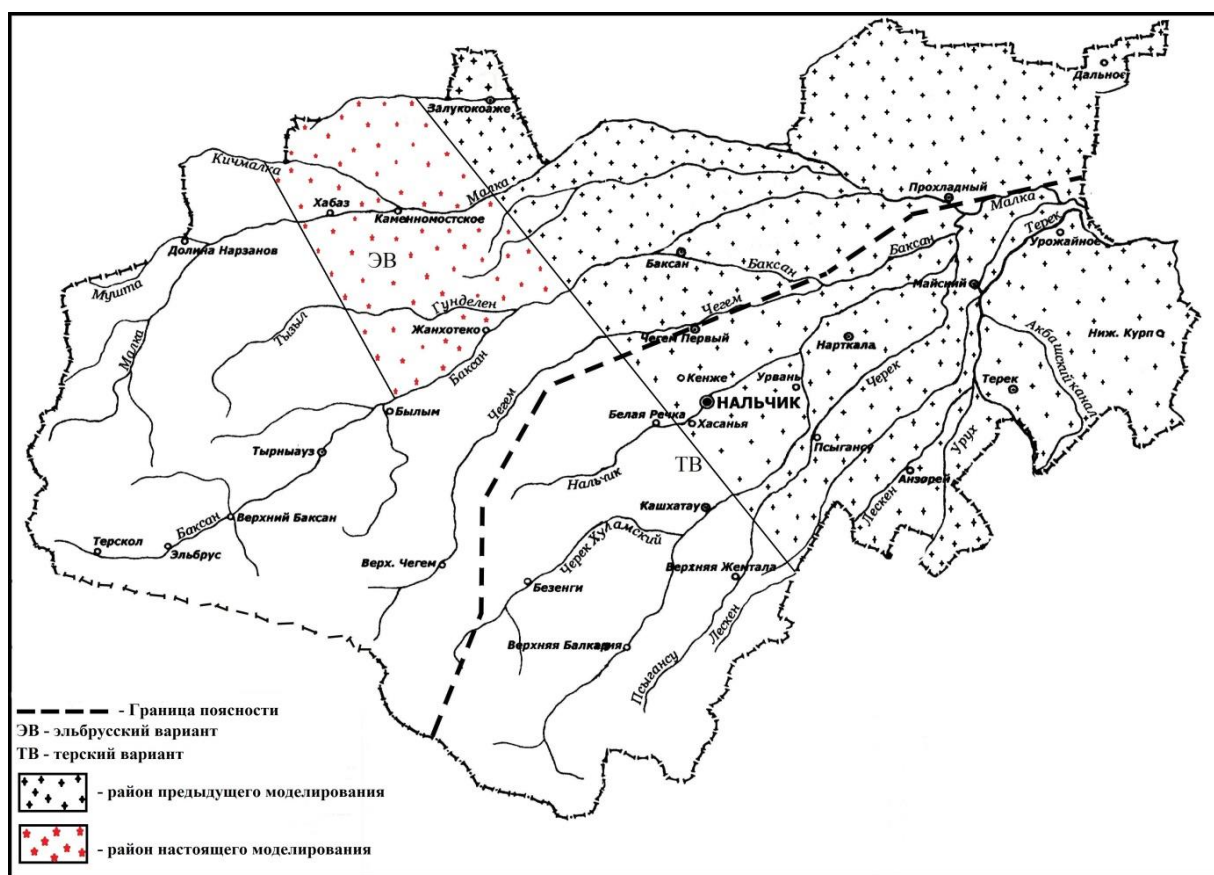


Рис. 11. Район моделирования пространственного изменения показателей и общего уровня БА почв в границах равнинной и предгорной частей Кабардино-Балкарии.

Для проверки достоверности разработанных моделей исходные фактические данные, характеризующие свойства исследованных почв, были разделены на две части. Основная часть данных использовалась в качестве обучающей выборки для построения дискриминантных моделей исследуемых почвенных показателей. Остальная часть, составляющая 15% от общего объёма, была выделена для валидации моделей путём сравнения прогнозируемых значений с экспериментальными (Жоголев, 2016). Процедура разделения данных осуществлялась методом рандомизации с применением функции Subset/Random Sampling программного пакета STATISTICA 12.0, что обеспечивало случайный отбор образцов из исходной таблицы данных (Горобцова и др., 2023).

В настоящем исследовании методы математической статистики применяются для многомерного пространственного анализа, основанного на выявлении корреляций между почвенными параметрами и «внешними» переменными, включающими мультиспектральные данные дистанционного зондирования, а также показатели рельефа и климатические характеристики. При условии, что изучаемый почвенный индикатор находится в прямой или косвенной зависимости от морфологических особенностей рельефа и климатических факторов, а также влияет на трансформацию отражённой солнечной радиации, возможно его высокоточное воспроизведение посредством многомерных статистических моделей с использованием указанных «внешних» параметров (Пузаченко, 2009).

В рамках используемого подхода рассматривали взаимное отображение параметров двух типов: измеренных в лабораторных условиях и полученных из независимых источников измерения. Эти так называемые «внешние» переменные дают основу для интерполяции фактических данных, полученных при лабораторно-аналитических исследованиях, на всю исследуемую территорию (Темботов и др., 2022).

Задачу интерполяции можно решать с помощью мультирегрессионного факторного, дискриминантного и нейросетевого анализов. В данной работе применили пошаговый дискриминантный анализ, эффективный при использовании большого числа внешних переменных и являющийся наиболее доступным и информативным методом (Айвазян и др., 1989; Кендалл, Стьюарт, 1976; Пузаченко и др., 2006; Темботов и др., 2022).

Дискриминантный анализ применяется как количественный метод для различения дискретных состояний изучаемого показателя, полученных в результате полевых или лабораторных исследований, в многомерном пространстве выбранных внешних переменных. Этот метод позволяет выявить конкретные внешние факторы, их степень вклада и механизмы, обеспечивающие дифференциацию исследуемых состояний (Пузаченко, 2004). Помимо установления функциональных взаимосвязей между целевым показателем и факторами окружающей среды, дискриминантный анализ обеспечивает

возможность интерполяции и картографического отображения пространственной изменчивости данного показателя по территории исследования.

Для построения предиктивных моделей, описывающих вариации почвенных характеристик, использовали программное обеспечение STATISTICA 12.0 с применением методов дискриминантного анализа. Полученные модели были интегрированы в программу Fracdim 1.9 для создания картографических слоев в растровом формате, отображающих пространственное распределение каждого из почвенных параметров.

Для удобства оценки значений моделируемых показателей почвенных свойств на картографических моделях, полученные данные разделили на группы (высокий, средний, низкий), каждая из которых соответствует определённому уровню значения. Разделение на группы основывали на общепринятых в почвоведении градациях: оценка содержания гумуса (%) (Гришина, Орлов, 1978), уровень рН(H<sub>2</sub>O) (Вальков и др., 1999), уровень активности ферментов (каталаза, инвертаза, уреазы, фосфатаза) (Гапонюк, Малахов, 1985). Группы почв с определёнными значениями исследуемого показателя отображаются на картографической модели с помощью различных цветовых кодировок, что позволяет проводить комплексную оценку состояния почвенного покрова по каждому параметру (Темботов, 2017).

## **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 профиля. 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.

### **4.1 Динамика физико-химических, биохимических и микробиологических показателей в профилях естественных и агрогенных горных черноземов**

#### **Физико-химические показатели**

Кислотно-щелочные условия в значительной мере определяют биологическую активность почвы. Они направляют особенности формирования и химические свойства гумуса, от уровня кислотности почв зависит видовой состав почвенной микробиоты. Известно, что ряд ферментов, проявляют высокую активность только в определённом диапазоне значений рН почвенной суспензии: фосфатаза, дегидрогеназа и каталаза наиболее активны в щелочной среде, инвертаза - в кислой, уреазы – в нейтральной (Балаян, 1993; Хазиев, 2018; Крамаренко, 2003; Никулина и др., 2020).

Сопоставление данных, характеризующих кислотно-щелочные условия в естественных и пахотных горных чернозёмах (рис. 12) свидетельствует, что значения  $pH(H_2O)$  соответствуют нейтральной и слабощелочной реакции почвенного раствора и находятся в границах генетически обусловленных параметров. Наблюдаемое с глубиной постепенное возрастание щёлочности рассматриваемых почв типично для горных чернозёмов всех подтипов и связано с миграцией карбонатов и содержанием их в почвообразующей породе (Фиапшев, 1996; Кумахов, 2007).

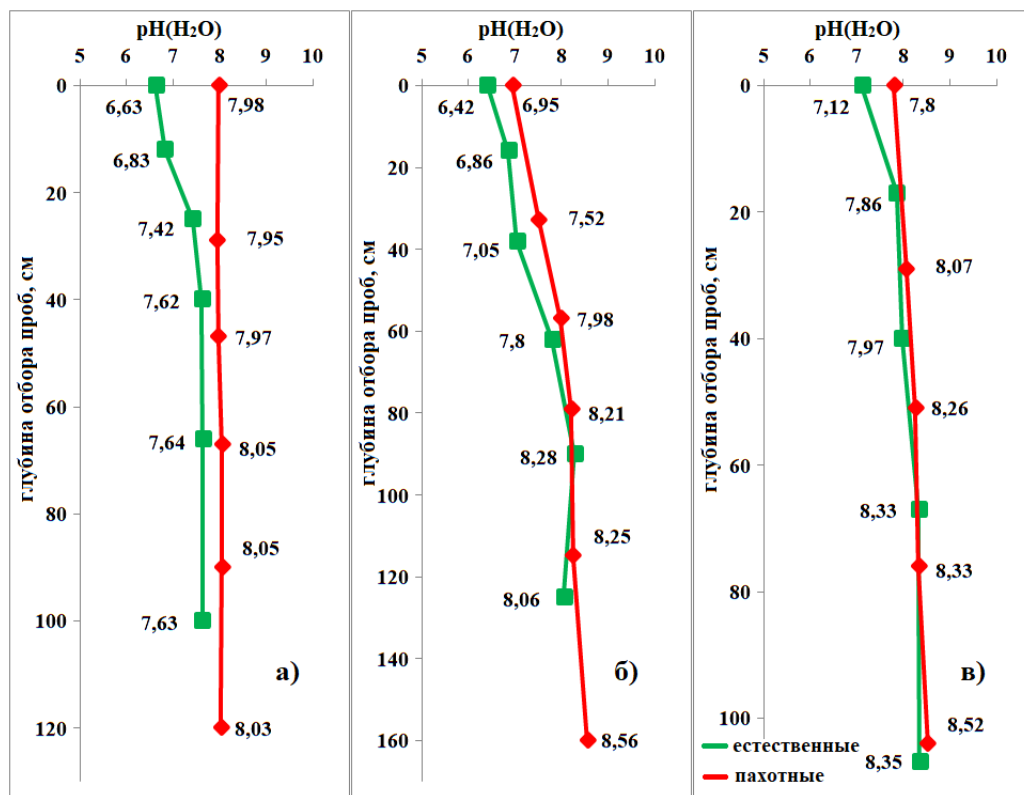


Рис. 12. Изменение значений  $pH(H_2O)$  в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

Как показано на приведённых диаграммах (рис. 13), уровень кислотности почвенной суспензии в пахотных горизонтах всех подтипов чернозёмов несколько сместился в сторону щелочных значений. Наиболее заметны изменения в пахотном горизонте чернозёма обыкновенного. Некоторое подщелачивание обрабатываемых почв может быть вызвано применением щелочных удобрений. В

подпахотных горизонтах значения рН почвенной суспензии сближаются, а в нижних частях профиля практически совпадают.

Показатели плотности почвы необходимо учитывать для исследования изменения биологической активности при агрогенном воздействии, так как они не только характеризуют гидротермический, воздушный и питательный режимы, но являются косвенными показателями условий метаболизма почвенной микробиоты (Хазиев, 1976).

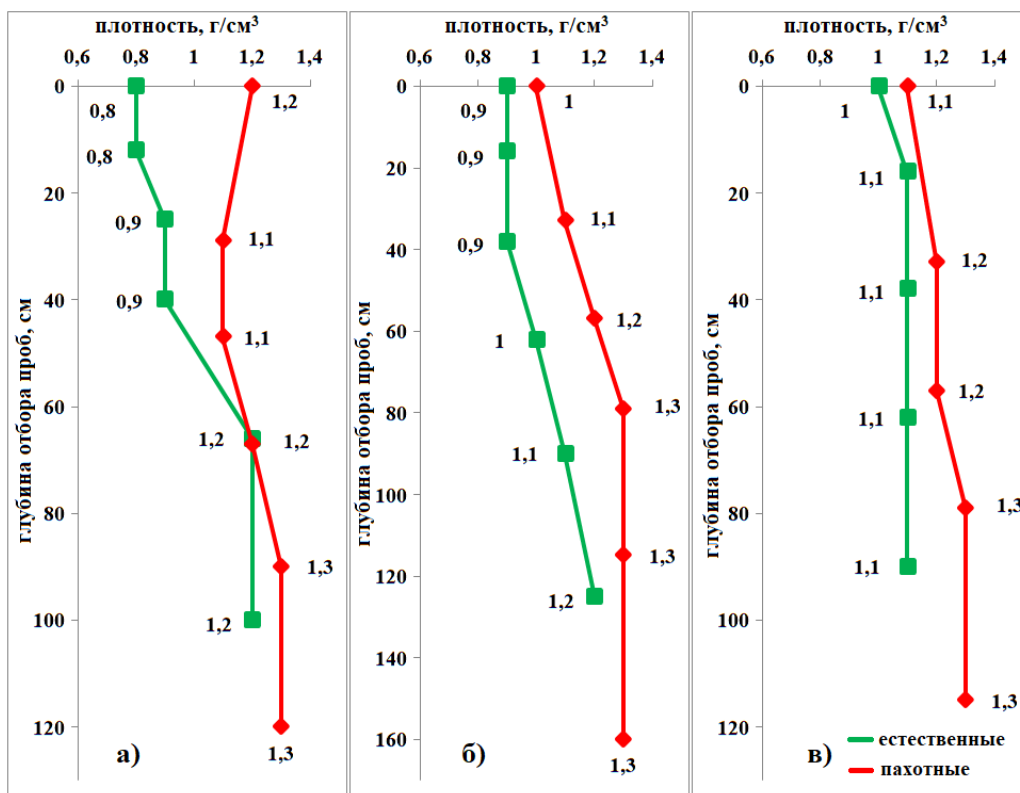


Рис. 13. Изменение значений плотности сложения ( $\text{г/см}^3$ ) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

*Плотность сложения* естественных горных чернозёмов ниже, чем обрабатываемых. В профилях чернозёмов обыкновенного и типичного даже в гор. (В1) значения плотности менее  $1 \text{ г/см}^3$ . Это, вероятно, связано с активностью дождевых червей и деятельностью других представителей почвенной мезофауны, а также обусловлено разрыхляющим действием мощной корневой системы травянистых растений.

По мнению исследователей данного вопроса (Вальков и др., 2002) в пахотных почвах, используемых для выращивания пропашных культур, значения плотности близкие  $1,2-1,3 \text{ г/см}^3$  можно считать оптимальными. С глубиной плотность обрабатываемых чернозёмов возрастает, но даже в нижних горизонтах не превышает  $1,32 \text{ г/см}^3$ , что свидетельствует об отсутствии переуплотнения и наличии благоприятных условий для обработки исследуемых горных чернозёмов и произрастания на них наиболее распространенных в районе исследования культур (кукурузы, подсолнечника, озимой пшеницы).

Динамика *содержания гумуса* в профилях естественных горных чернозёмов различных подтипов соответствует их морфогенетическим особенностям. Наиболее гумифицированы дерновые горизонты, по сравнению с ними содержание гумуса в гор. (А) ниже на 16% - 22% (рис. 14). В переходных горизонтах (АВ) типичных и выщелоченных естественных чернозёмов наблюдается более резкое снижение показателя (на 41% - 53%). В средней части профилей (гор. (В1) для типичного чернозёма и гор. (В) – для выщелоченного), описываемый показатель продолжает постепенно падать и при переходе к материнской породе составляет 1% - 2%.

В обыкновенном карбонатном чернозёме гумусовый профиль более растянут, наблюдается постепенное падение значений содержания гумуса по всему профилю.

Дегумификация пахотных почв – хорошо изученное и общепризнанное явление. В обрабатываемых равнинных чернозёмах Кабардино–Балкарии зафиксировано снижение содержания гумуса в среднем на 30% (Гедгафова и др., 2015; Горобцова и др., 2016, 2017; Хакунова и др., 2018). Наблюдаются процессы снижения содержания органического вещества и в верхних горизонтах сравниваемых профилей горных чернозёмов.

Чтобы более объективно оценить изменения, происходящие в обрабатываемых почвах, на наш взгляд, не вполне корректно сравнивать содержание гумуса в пахотном горизонте и дерновом, где обычно наблюдается

максимальное количество органического вещества. Сопоставление параметров гор. (Апах) и гумусово-аккумулятивного гор. (А) более оправдано.

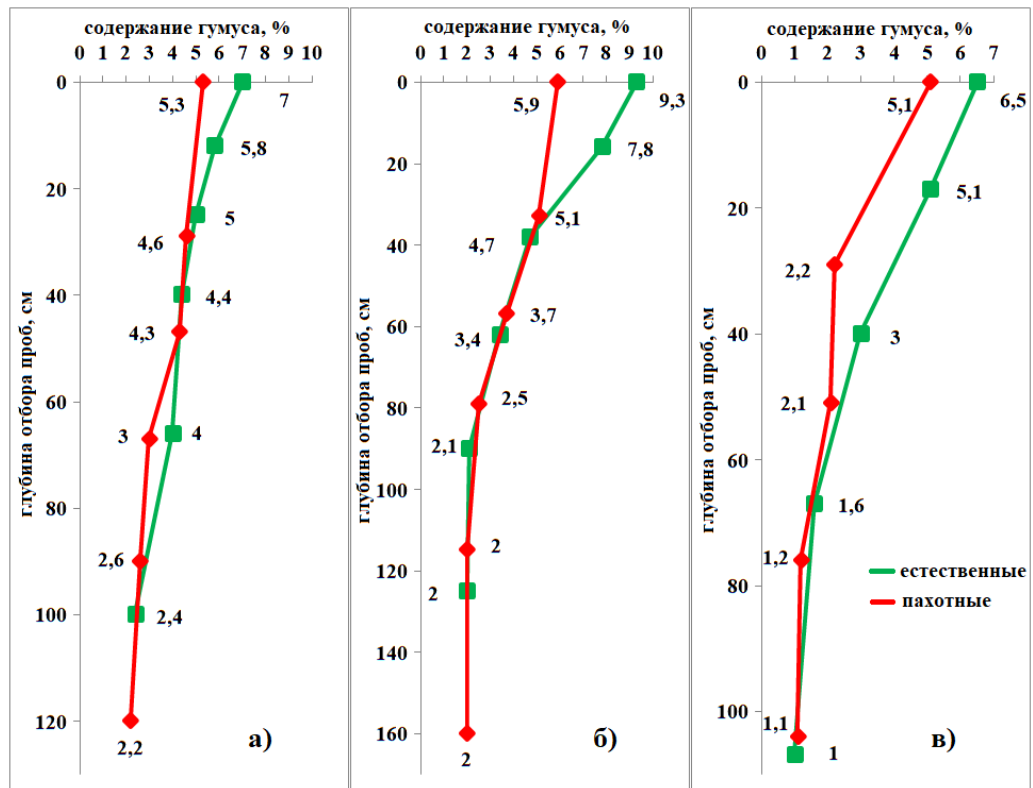


Рис. 14. Изменение содержания гумуса (%) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

Заметное различие в содержании гумуса между гор. (Апах) и гор. (А) установлено только для типичного чернозёма (снижение в пахотном горизонте составляет 24%). Для чернозёмов обыкновенных и выщелоченных в описываемых профилях обнаружены вполне сопоставимые данные. Как показывают приведённые ниже результаты сравнительного анализа содержания гумуса в верхних горизонтах естественных и пахотных горных чернозёмов, более распространённым является процесс снижения содержания гумуса, который показан в паре профилей естественного и агрогенного чернозёмов типичных.

Динамика гумусовых показателей, зафиксированная в профилях различных подтипов обрабатываемых чернозёмов, имеет как общие тенденции, так и некоторые различия. Резкое (более чем в 2 раза) снижение содержания гумуса происходит в подпахотном горизонте горного агрочернозёма выщелоченного.

Поэтому данные, характеризующие гумусовое состояние гор. (А) и гор. (АВ), практически совпадают. В профиле целинного выщелоченного чернозёма столь заметная разница в содержании гумуса между верхними горизонтами не наблюдается. Ниже гор. (АВ) различия в значениях данного показателя в целинной и пахотной почвах нивелируются и в гор. ВС составляют около 1%. Возможно, резкое уменьшение содержания гумуса в подпахотном горизонте этого подтипа чернозёма связано с его обработкой, а более влажные условия могут способствовать изменению распределения гумусовых веществ в профиле выщелоченного горного агрочернозёма.

В обыкновенных и типичных агрочернозёмах снижение содержания гумуса вниз по профилю происходит постепенно, и достаточное высокое его количество наблюдается даже при переходе к материнской породе. Это указывает на наличие органического субстрата и активность микробиологических и биохимических процессов, а также зоогенный перенос органического вещества вниз по профилю. Совокупность биологических процессов и механический перенос органического вещества формирует растянутый гумусовый профиль обыкновенных и типичных горных агрочернозёмов.

### **Показатели ферментативной активности**

Ведущая роль почвенных ферментов как катализаторов энергетического и вещественного обмена в почве, является причиной обязательного анализа их деятельности при исследованиях различных аспектов биологической активности почвы. С этой точки зрения представлен анализ динамики показателей деятельности ряда важнейших почвенных ферментов в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов исследуемых территорий. Полученные данные позволяют проследить процессы проявления биохимической активности в различных горизонтах исследуемых почв и изменение их интенсивности под воздействием обработки.

Проведённый анализ активности ферментов, принадлежащих к классам оксидоредуктаз и гидролаз в естественных и обрабатываемых горных чернозёмах свидетельствует, что деятельность *окислительно-восстановительных ферментов*

(каталазы и дегидрогеназы) изменяется в результате сельскохозяйственного воздействия в меньшей степени, чем гидролитических (инвертазы, уреазы, фосфатазы). Значения активности оксидоредуктаз в пахотных и естественных горных чернозёмах находятся преимущественно в границах одной категории активности, или снижаются под воздействием комплекса агрогенных факторов от средних – до слабых показателей или от слабых – до очень слабых (Гедгафова и др., 2019).

Ряд авторов, отметивших схожие тенденции, высказали предположение, что вызванная регулярной обработкой аэрация пахотных горизонтов может стать одной из причин, влияющей на условия функционирования оксидоредуктаз. Поэтому снижение активности окислительно-восстановительных ферментов проявляется в меньшей степени, по сравнению с представителями класса гидролаз (Абрамян, 1990, 1992; Крамаренко, 2003; Даденко, 2004; Лариков, 2010).

Приведённые на диаграмме (рис. 15) значения активности каталазы свидетельствуют о том, что в естественных горных чернозёмах они меняются вниз по профилю: от средних значений - в верхней части профиля, до слабых – в нижней.

При сравнении активности фермента в профилях целинных и обрабатываемых почв оказывается, что данные, характеризующие верхние горизонты находятся в границах одной категории активности (средняя). Максимальными различиями обладает с гор. (А) естественной почвы обладает пахотный горизонт чернозёма типичного (снижение на 65%). Ниже по профилю типичного агрочернозёма активность каталазы практически не меняется до глубины 80см. Ниже 100см различия между целинной и пахотной почвой нивелируются. В агрочернозёмах обыкновенном и типичном в подпахотных горизонтах происходит более заметное снижение показателей, они переходят из категории средней активности - в слабую, а ниже 50см в очень слабую. В то время как в целинных чернозёмах слабая каталазная активность сохраняется и на глубине более 100см.

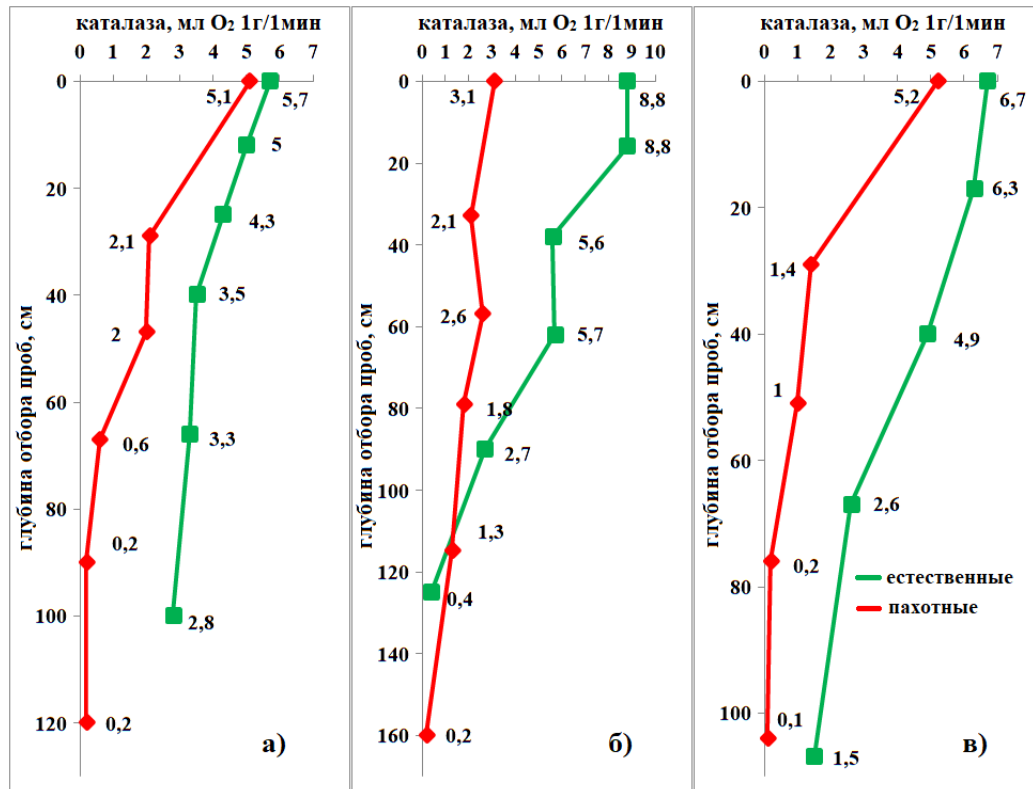


Рис. 15. Активность каталазы (мл О<sub>2</sub> 1г / 1мин) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов: а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

Активность дегидрогеназы наиболее высока в профилях типичных чернозёмов (средняя в пахотном горизонте и на границе средняя-высокая – в дерновом) (рис. 16). На глубине около 40см показатели естественного и агрогенного чернозёмов типичных сближаются на уровне средних значений и постепенно ослабевают вниз по профилю. В сравниваемых парах обыкновенных и выщелоченных чернозёмов слабая и очень слабая активность дегидрогеназы наблюдается даже в верхних горизонтах и агрогенных и естественных почв. Дальнейшее изменение показателей также происходит в границах слабых и очень слабых значений.

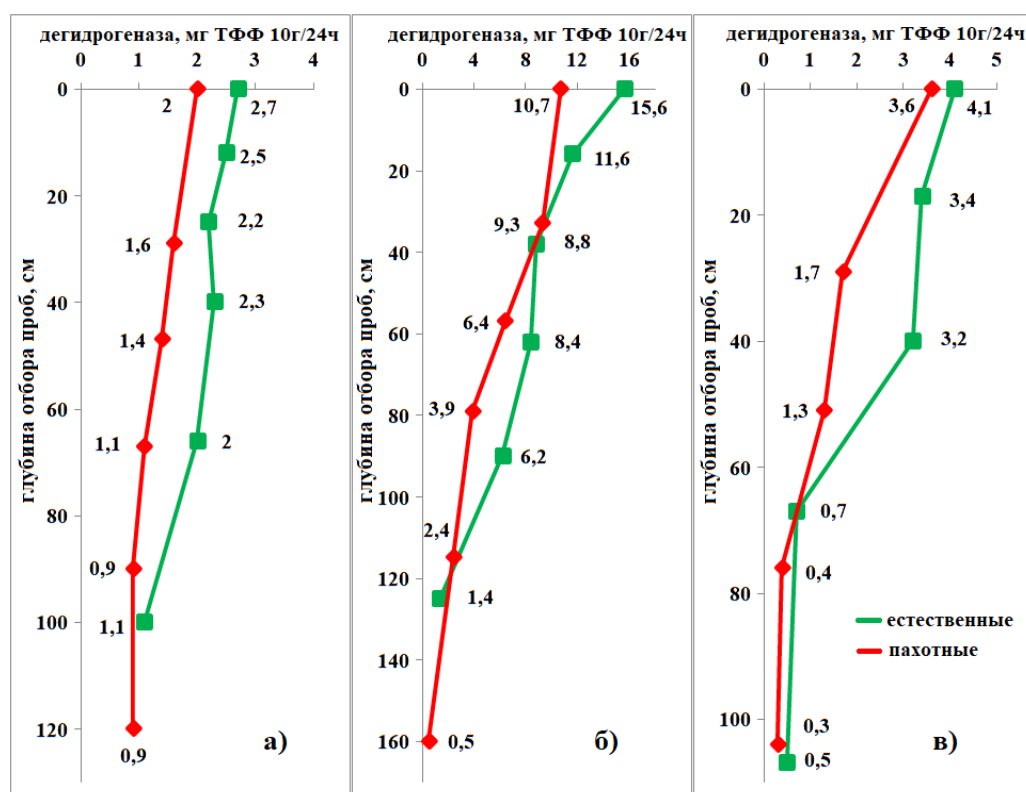


Рис. 16. Активность дегидрогеназы (мг ТФФ 10г / 24 ч) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов: а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

Существенно более значительные изменения в деятельности гидролитических ферментов наблюдаются в естественных и пахотных горных чернозёмах, и наиболее заметно процессы снижения каталитической функции гидролаз происходят в верхних горизонтах. *Инвертаза* обладает средней активностью в дерновых горизонтах естественных почв, которая постепенно снижается вниз по профилю - до слабой и очень слабой (рис. 17).

В пахотных горизонтах инвертазная активность заметно снижается, по сравнению с целинными почвами. Во всех подтипах обрабатываемых чернозёмов наблюдается слабая активность фермента, а в нижней части профиля агрогенных почв - очень слабая. Максимальные различия между установленными показателями зафиксированы в пахотных и подпахотных горизонтах.

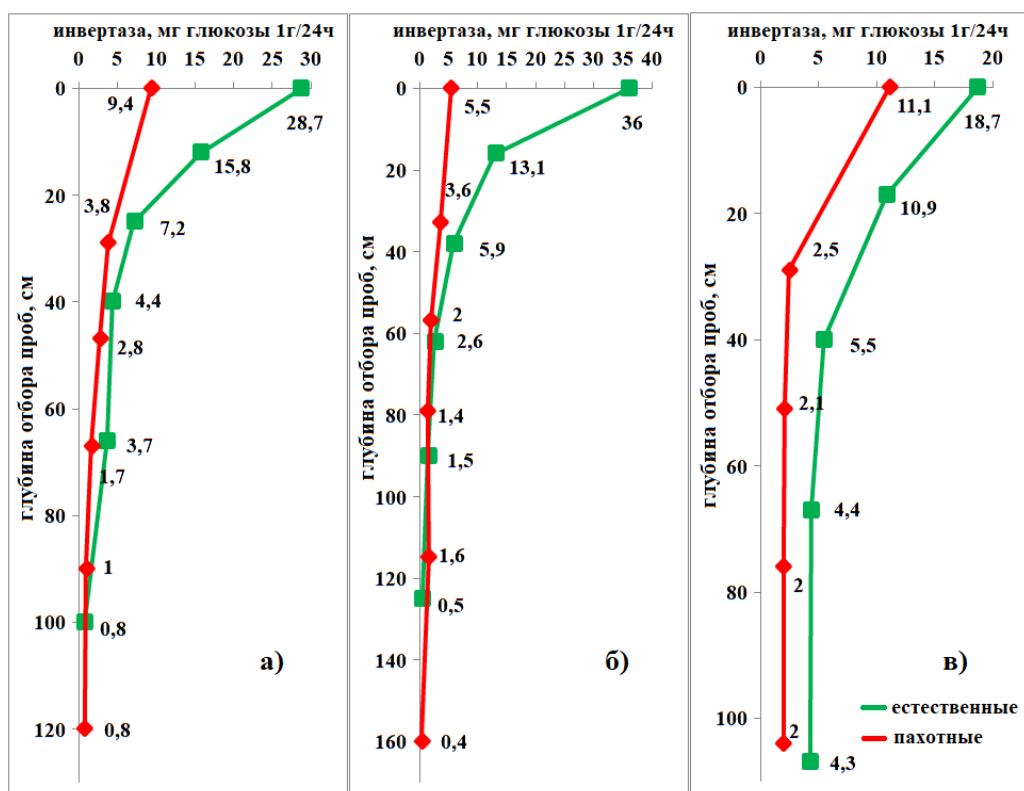


Рис. 17. Активность инвертазы (мг глюкозы 1г / 24 ч) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов: а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

Динамика деятельности *фосфатазы* в профилях целинных почв проявляется как постепенное снижение средней активности фермента (характерной для верхних горизонтов) - до средних и слабых показателей - в середине профиля и очень слабых - в нижней части. В пахотных чернозёмах также происходит постепенное снижение фосфатазной активности, но от слабых значений – к очень слабым. Как и в случае с инвертазой, максимальные различия между установленными значениями в целинных и обрабатываемых чернозёмах наблюдаются в пахотных и подпахотных горизонтах. Сближение кривых на диаграммах, отображающих деятельность фосфатазы (рис. 18) происходит на глубине около 60см.

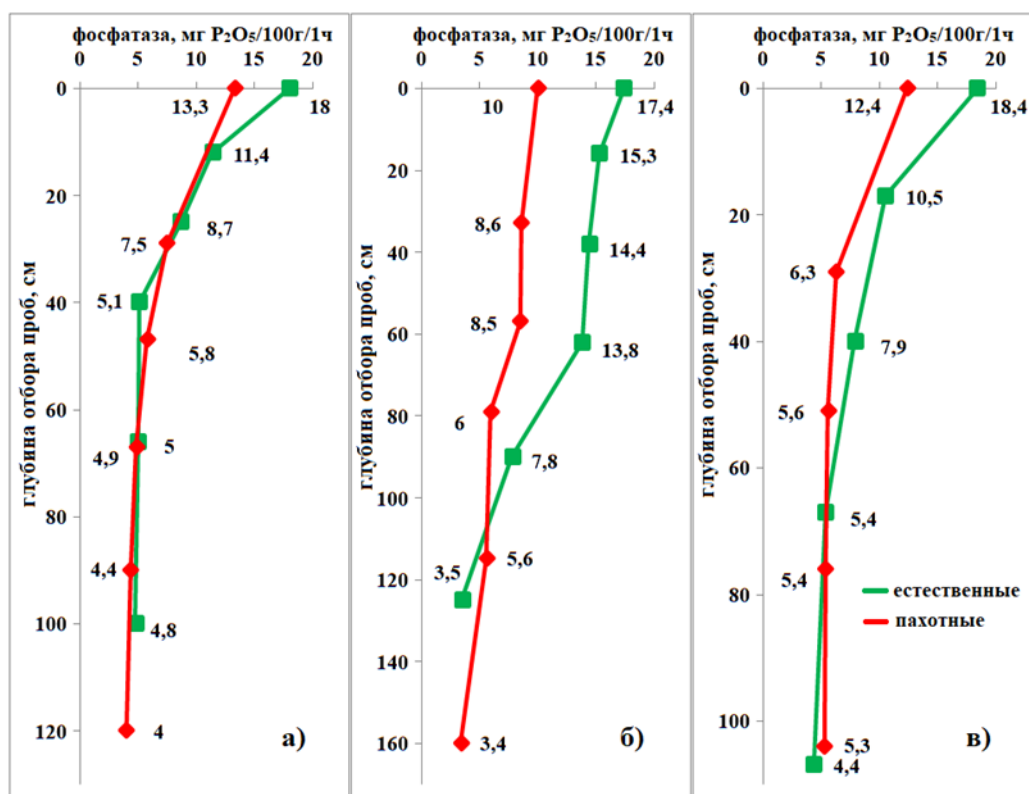


Рис. 18. Активность фосфатазы (мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/100г / 24 ч) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов: а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

Однако не все полученные данные укладываются в схему однозначного снижения ферментативной активности, произошедшего в результате сельскохозяйственного использования. Например, в чернозёме обыкновенном активность *уреазы* в пахотном горизонте практически совпадает со значением, характеризующим дерновый горизонт естественной почвы (рис. 19).

Динамика активности уреазы и в профиле агрочернозёма типичного проявляется весьма необычно. Её высокие показатели превосходят аналогичные характеристики естественной почвы и сохраняются до средней части профиля (гор. (Вса)). Описанная картина не является типичной и может быть следствием наличия субстрата (например, недавнему внесению минеральных удобрений), благодаря которому произошла активизация уреазы в описываемом профиле типичного агрочернозёма.

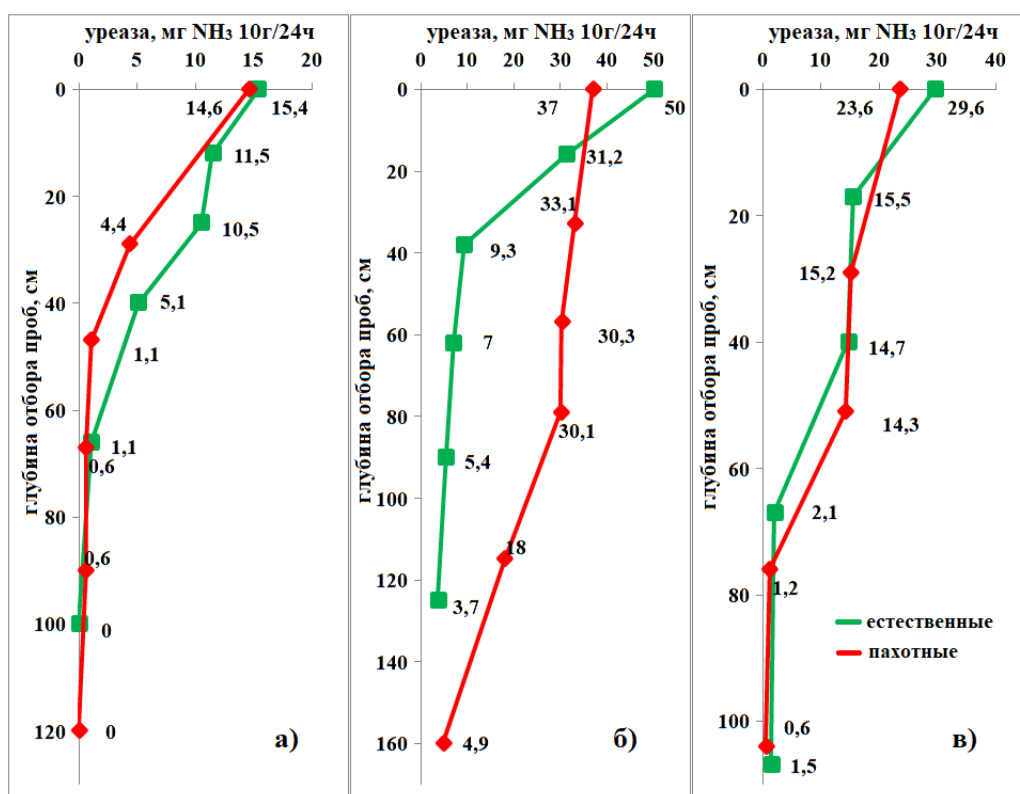


Рис. 19. Активность уреазы (мг NH<sub>3</sub> 10г/24 ч) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмов: а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

Представленные данные свидетельствуют, что влияние пахотного воздействия на активность почвенных ферментов имеет неоднозначный характер. Анализ многочисленных литературных источников, проведённый Хазиевым и Гулько, подтверждает ведущее, но при этом разнонаправленное действие агроэкологических факторов на процессы биологического круговорота в системе «почва-растения-микроорганизмы». Авторами отмечено, что внесение минеральных удобрений приводит к временному созданию благоприятных условий для выделения ферментов (Gorobtsova et al., 2019). Процесс активизации ферментов в этом случае связан с поступлением и переработкой субстрата и активизацией гидролиза углеводов (Хазиев, Гулько, 1991).

### Микробиологические показатели

Применение респираторных показателей (скорость БД и СИД) позволяет определить уровень физиологической активности, отражающей состояние микробных сообществ в естественных и антропогенно изменённых почвах.

Динамика показателей скорости БД в профилях естественных чернозёмов в целом повторяет основные закономерности, описанные выше для параметров гумусового состояния и ферментативной активности (рис. 20). Максимальные значения характерны для верхних горизонтов, однако определённая дыхательная активность почвенной микробиоты сохраняется и при переходе в материнскую породу. Снижение в гор. (BC), по сравнению с наиболее биогенным гор. (Ad), составляет для всех подтипов целинных чернозёмов более 50%.

Профиль чернозёма типичного, функционирующий в естественных условиях, выделяется наиболее высокими значениями скорости БД до глубины 100 см. Остальные контролируемые микробные показатели (БД, СИД, Смк) в описываемом профиле также заметно выше, чем в обыкновенном и выщелоченном чернозёмах (рис. 20-22). Разумеется, представленные данные отражают особенности конкретной почвы, возможно также, что условия формирования, характерные для типичных чернозёмов, способствуют проявлению высокой фоновой микробиологической активности в описываемом профиле.

Значения скорости БД в профилях пахотных горных чернозёмов различных подтипов вполне сопоставимы: показатели постепенно уменьшаются вниз по профилю, но некоторая респираторная активность сохраняется и в гор. BC. Максимальное снижение, при сопоставлении абсолютных показателей гор. (Апах.) и гор. (А) естественных почв, установлено для типичного чернозёма (около 50%), что объясняется высокими абсолютными значениями скорости БД в целинной почве.

Ослабление интенсивности БД в аналогичных горизонтах обыкновенных и выщелоченных агрочернозёмов составляет соответственно 26% и 37%. Как показывает подробное исследование верхних горизонтов (стр. 93), эти значения в большей степени отражают степень изменения рассматриваемого параметра биологической активности в пахотных почвах.

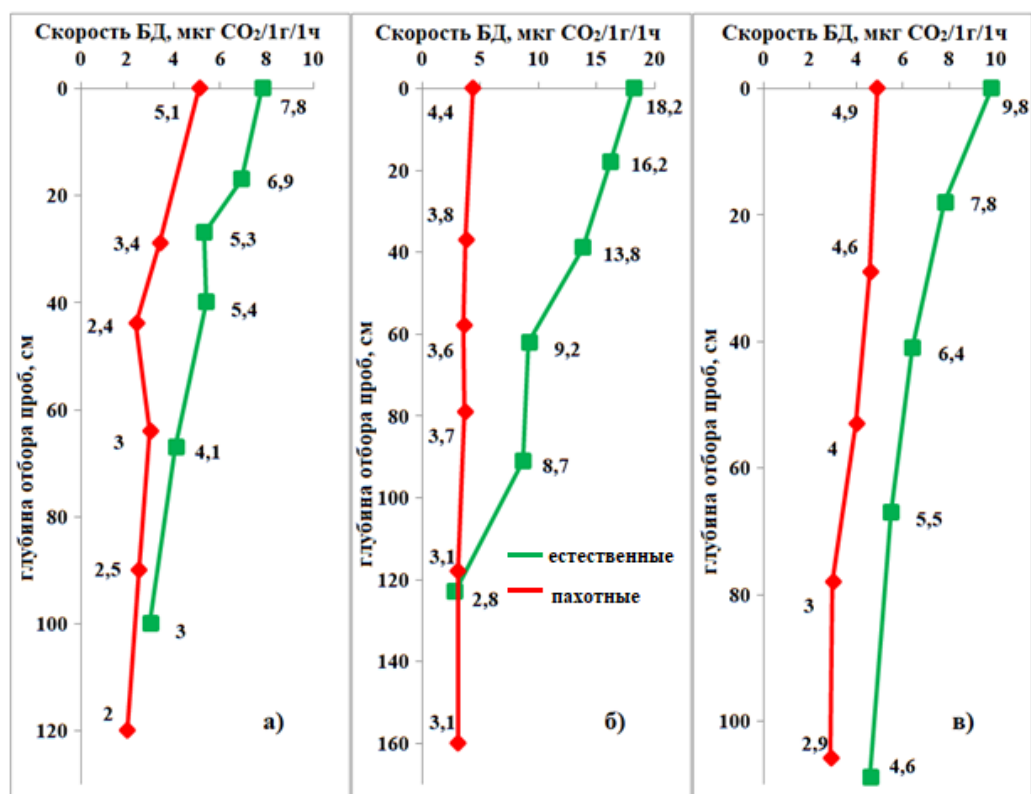


Рис. 20. Изменение скорости БД (мкг СО<sub>2</sub>/л/1ч) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмах: а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

Наиболее высокие значения скорости СИД также наблюдаются в профиле целинного чернозёма типичного, что, вероятно, является особенностью рассматриваемого профиля, так как остальные подтипы естественных горных чернозёмов характеризуются более низкими и близкими профильными показателями (рис. 21). Скорость СИД снизилась на 30–50 % в пахотных горизонтах по сравнению с целинными горными почвами (гор. А). Данное снижение отражает значительное уменьшение физиологической активности микробного сообщества почв под воздействием сельскохозяйственного использования по сравнению с естественными экосистемами.

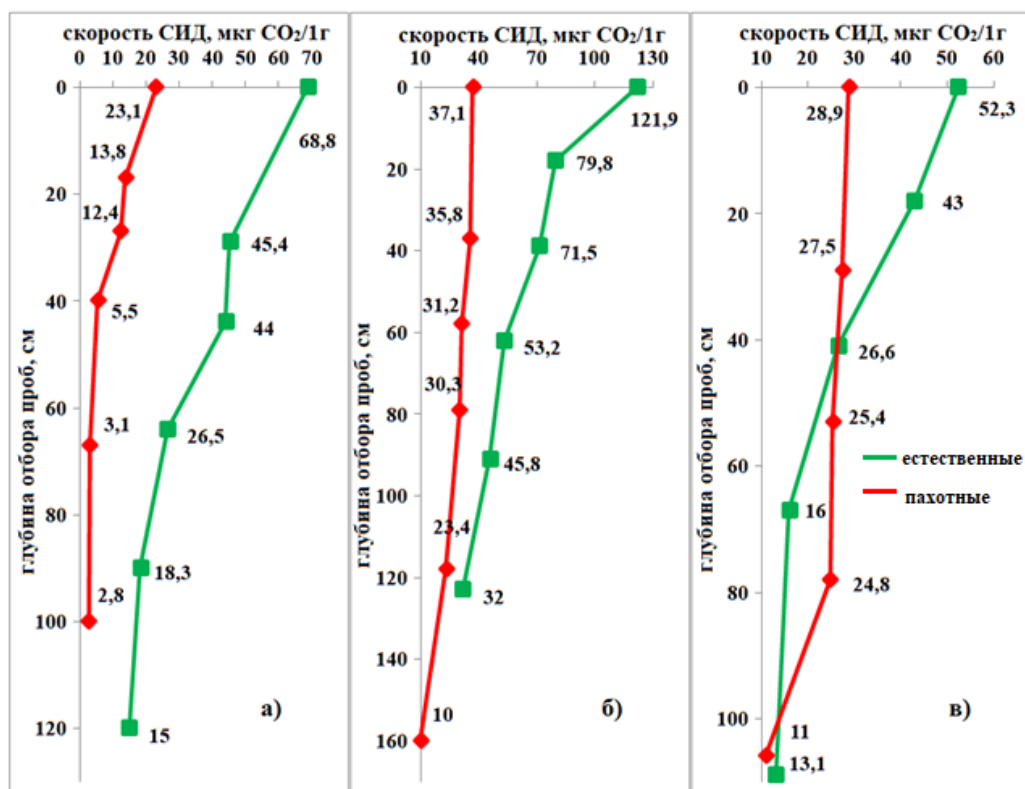


Рис. 21. Изменение скорости СИД (мкг CO<sub>2</sub>/1г) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмах: а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

Рассчитанное на основе данных о скорости СИД содержание Смик позволяет количественно оценить динамику состояния микробных сообществ в профилях горных чернозёмов. Очень высокое содержание Смик (> 1500 мкг С/г почвы, согласно градации Ананьева, 2003) наблюдается во всех горизонтах целинного чернозёма типичного (почти вплоть до материнской породы). Снижение данного показателя происходит постепенно, высокое его значение (> 1000 мкг С/г почвы) наблюдается даже на глубине около 140 см.

В естественных обыкновенных и выщелоченных чернозёмах очень высокие показатели скорости СИД наблюдаются приблизительно до середины профиля (60-80 см), затем они постепенно снижаются до высоких и средних (500-1000 мкг С/г почвы) значений. Таким образом, почвенная микробиота активно функционирует во всём профиле целинных горных чернозёмов, а достаточно высокие значения содержания Смик даже в нижних горизонтах свидетельствует о весьма существенном потенциале микробоценозов описываемых почв. Кривые,

отражающие динамику содержания Смик в пахотных чернозёмах, традиционно отражают постепенное снижение показателя вниз по профилю (рис. 22).

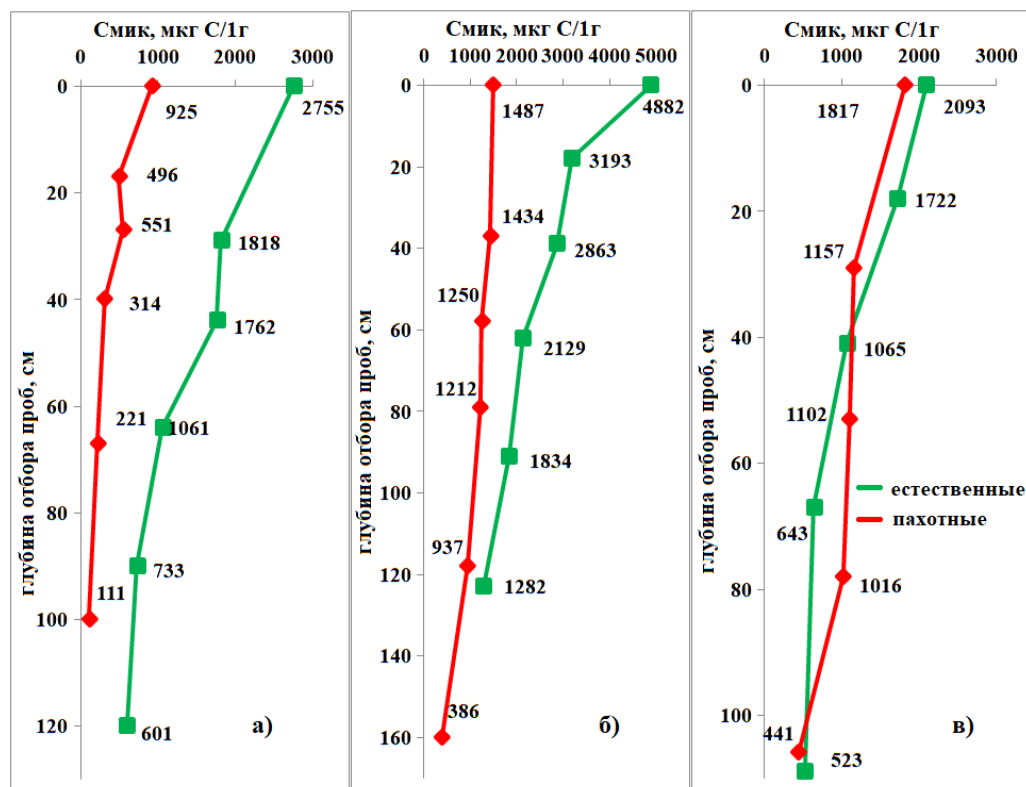


Рис. 22. Изменение содержания Смик (мкг С/г почвы) в профилях естественных и пахотных горных чернозёмах: а) обыкновенных, б) типичных, в) выщелоченных.

По сравнению с целинными почвами максимальные различия наблюдаются в пахотных и подпахотных горизонтах обыкновенных и типичных агрочернозёмов. Снижение в гор. (Апах) по сравнению с гор. (А) целинных почв составляет около 50%, кривые сближаются на глубине 50-60 см. Выщелоченный агрочернозём наиболее близок по распределению содержания Смик к своему естественному аналогу. Следует отметить близкие показатели гор. (Апах) и гор. (А) и очень плавное снижение значений до глубины около 100 см в профиле обрабатываемой почвы. Среди описываемых подтипов самые близкие значения между показателями содержания Смик наблюдаются в паре выщелоченных чернозёмов. Данные практически не отличаются в верхних горизонтах, а с глубины около 50 см показатели, характеризующие обрабатываемую почву даже несколько выше.

Как следует из представленных данных, формирование биологической активности в профилях как естественных, так и агрогенных горных чернозёмов – сложный и разнонаправленный процесс. Представленные описания динамики параметров биологической активности показывают, насколько различными могут быть проявления биологических свойств, в зависимости от строения профиля, условий почвообразования, наличия обработки, особенностей конкретного показателя.

Рассмотренные составляющие биологической активности горных чернозёмов проявляют различную профильную динамику и неоднозначно реагируют на комплекс агроэкологических факторов. В большинстве случаев пахотные горизонты несут максимальную агрогенную нагрузку, существенно изменяются свойства и подпахотных горизонтов. Сближение контролируемых показателей в профилях целинных и пахотных почв происходит ниже 60-80 см, но нередко различия присутствуют вплоть до материнской породы.

Чтобы делать определённые выводы об изменении биологических свойств горных чернозёмов в результате пахотного воздействия, анализ динамики различных показателей в профилях естественных и пахотных почв является необходимой частью работы. Но, чтобы выявить наиболее типичные тенденции и определить направленность процессов изменения почвенных свойств, необходим анализ данных, содержащихся в объёмной выборке и применение различных методов статистического анализа.

#### **4.2 Оценка влияния пахотного использования на физико-химические, биологические параметры и общее экологическое состояние горных чернозёмов**

Как показал анализ приведённых выше данных, наиболее биогенными являются верхние горизонты всех подтипов горных чернозёмов. Многолетняя обработка стала причиной формирования пахотного горизонта (0-20см), свойства которого изменились в наибольшей степени (Хакунова и др., 2018).

Сопоставление и статистический анализ данных, характеризующих верхние горизонты (0-20см) всех подтипов целинных и обрабатываемых горных чернозёмов, позволяет учесть пространственную динамику контролируемых показателей, определить их средние значения и различные статистические параметры, с помощью которых можно проследить основные закономерности и тенденции изменения почвенных свойств вызванных многолетним пахотным воздействием. Совокупность сведений, характеризующих верхние горизонты (0-20см) всех подтипов естественных и пахотных горных чернозёмов, составляют обучающую выборку, необходимую для создания ИКМ, которая сможет наглядно отразить структуру и состояние почвенного покрова предгорий Центрального Кавказа.

Согласно данным, представленным в табл. 4, слабощелочные условия являются наиболее типичными для всех подтипов горных чернозёмов исследуемых территорий (включая подтип выщелоченных). Сравнение кислотно-щелочных условий в верхних горизонтах обрабатываемых и естественных почв свидетельствуют, что статистически значимых различий в значениях  $pH(H_2O)$  между генетическими аналогами не обнаружено ( $t > 1,23$ ;  $p < 0,92$ ). Имеет место некоторая тенденция к повышению значений  $pH(H_2O)$  в пахотных горизонтах для всех подтипов горных агрочернозёмов.

Показатели плотности сложения характеризуют целый ряд факторов прямым и косвенным образом влияющих на формирование биологических свойств почв. Верхние горизонты целинных горных чернозёмов обладают рыхлым сложением (табл. 4), что в сочетании с ореховато-зернистой структурой обуславливает благоприятные водный, воздушный, тепловой режимы почвы и оптимальные условия для жизнедеятельности почвенной биоты (Хакунова и др., 2018).

Полученные данные свидетельствуют, что присутствует тенденция к повышению плотности верхних горизонтов ( $t > 1,26$ ;  $p < 0,84$ ), что является весьма распространенным следствием многолетнего пахотного воздействия.

Тем не менее, установленные значения характеризуют плотность пахотных горизонтов как удовлетворительную, учитывая, что в горных агрочернозёмах,

обладающих преимущественно тяжело- и среднесуглинистым гранулометрическим составом, сохранилась выраженная комковато-ореховатая структура верхних горизонтов.

*Количественные показатели гумусового состояния* почв являются индикаторами биологической активности почвы. Они служат наиболее информативными параметрами, позволяющими определить направление и интенсивность протекания важнейших биологических процессов, а также непосредственно характеризуют уровень плодородия почвы. Отличительной чертой горных чернозёмов является высокое и очень высокое содержание гумуса (Молчанов и др., 2017), что подтверждается и проведёнными исследованиями (табл. 4).

Таблица 4 – Средние значения физико-химических показателей верхних горизонтов (0-20см) естественных и пахотных горных чернозёмов исследуемых территорий

Почвы	n	pH (H <sub>2</sub> O)	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание гумуса, %	Запасы гумуса, т/га
Горные чернозёмы обыкновенные	<u>15</u>	<u>8,2±0,07</u>	<u>1,25±0,05</u>	<u>5,9±0,37</u>	<u>147±10</u>
	16	8,1±0,06	1,09±0,03	8,1±0,33	175±7
Горные чернозёмы типичные	<u>18</u>	<u>7,9±0,13</u>	<u>1,16±0,03</u>	<u>6,8±0,34</u>	<u>157±6</u>
	18	7,8±0,14	1,07±0,03	9,5±0,52	201±10
Горные чернозёмы выщелоченные	<u>18</u>	<u>7,9±0,11</u>	<u>1,21±0,03</u>	<u>6,5±0,53</u>	<u>155±11</u>
	18	7,7±0,15	1,01±0,03	10,2±0,69	197±9

Примечание: над чертой показатели пахотных почв, под чертой естественных; n - объем выборки

Согласно полученным данным (в соответствии с Классификацией, 1977 и согласно градации Валькова, 2001), к тучным почвам, обладающими высокими запасами гумуса, следует отнести типичные и выщелоченные горные чернозёмы, функционирующие в естественных биогеоценозах исследуемых территорий. Средние показатели целинных горных чернозёмов, относящихся к подтипу обыкновенных, несколько ниже, но также характеризуют указанные почвы как богатые и плодородные.

Характерные для обрабатываемых почв процессы, приводящие к дегумификации, происходят и в горных чернозёмах исследуемых территорий (Хакунова и др., 2018). Снижение содержания гумуса в пахотных горизонтах на 27% - 36%, по сравнению с их целинными аналогами, является статистически значимым для всех подтипов ( $t > 4,25$ ;  $p < 0,0001$ ).

Уменьшение запасов гумуса проявляется в меньшей степени (на 16% - 22%), но статистически достоверно для пахотных горизонтов всех подтипов горных чернозёмов ( $t > 2,27$ ;  $p < 0,04$ ). Причина менее выраженных различий между содержанием и запасами гумуса в естественных и пахотных аналогах – более высокие значения плотности в выборке, характеризующей свойства почв агроценозов (Хакунова и др., 2018).

Снижение гумусовых показателей в пахотных горизонтах горных чернозёмов Кабардино-Балкарии произошло после многолетнего сельскохозяйственного использования. Тем не менее, установленные средние значения содержания и запасов гумуса характеризуют изучаемые почвы как среднегумусные и описывают их как обладающие высоким биоэнергетическим потенциалом, стабильно функционирующие системы.

Анализ деятельности изученных ферментов указывает, что определённое снижение активности биохимических процессов в пахотных горизонтах наблюдается для всех сравниваемых значений (табл. 5). Окислительно-восстановительные ферменты проявляют в основном среднюю активность во всех изученных почвах, однако воздействие комплекса агрогенных факторов сказывается на их деятельности в различной степени (Хакунова и др., 2018). Для каталазы наблюдается одинаковый - средний уровень активности в целинных и пахотных аналогах, но при обработке происходит снижение её активности на 24% - 38%, установленные различия статистически значимы ( $t > 3,6$ ;  $p < 0,0001$ ).

Деятельность дегидрогеназы ослабляется в результате пахотного воздействия более заметно, на 31% - 48%, а в обыкновенных агрочернозёмах активность изменяется от средней градации - до слабой (Хакунова и др., 2018).

Установленные различия каталитической функции дегидрогеназы также достоверны для всех изученных подтипов горных чернозёмов ( $t > 2,6$ ;  $p < 0,04$ ).

Таблица 5 – Средние показатели ферментативной активности верхних горизонтов (0-20см) естественных и пахотных горных чернозёмов исследуемых территорий

Дегидрогеназа, мг ТФФ/10г/24ч	Каталаза, О <sub>2</sub> /1г/1мин	Инвертаза, мг глюкозы/1г/24ч	Уреаза, мг NH <sub>3</sub> /10г/24ч	Фосфатаза, мг Р <sub>2</sub> О <sub>5</sub> /100г/1ч
Горные чернозёмы типичные (n=18/18)				
<u>4,8±0,6</u> 9,3±0,7	<u>4,7±0,3</u> 7,6±0,6	<u>5,9±0,6</u> 15,2±2,2	<u>17,4±3,3</u> 38,7±5,6	<u>11,8±0,6</u> 25,1±1,6
Горные чернозёмы выщелоченные (n=18/18)				
<u>7,3±1,3</u> 10,6±0,9	<u>4,8±0,4</u> 6,3±0,3	<u>8,3±1,1</u> 23,4±3,7	<u>16,5±2,0</u> 55,2±8,8	<u>11,4±0,6</u> 26,5±1,7
Горные чернозёмы обыкновенные (n=15/16)				
<u>7,0±0,7</u> 12,7±1,4	<u>3,9±0,4</u> 6,3±0,5	<u>5,8±0,5</u> 18,6±3,3	<u>17,8±1,5</u> 47,9±4,2	<u>10,5±0,5</u> 22,4±0,9

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

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 ( $t > 2,08$ ;  $p < 0,01$ ).

Таким образом, в пахотных горизонтах происходит существенное снижение активности как окислительно-восстановительных, так и гидролитических ферментов, что влияет на интенсивность процессов азотного, фосфорного и углеродного обмена и биохимический потенциал агрогенных горных чернозёмов.

*Уменьшение респираторной активности почвенной микробной биомассы* – индикатор нарушения состояния микробоценозов антропогенно нарушенных почв (Гавриленко и др., 2011; Сушко и др., 2016; Ali et al., 2018; Ананьева и др., 2021).

Анализ полученных данных доказывает, что в результате пахотного использования горных чернозёмов происходит снижение всех представленных микробных характеристик (табл. 6). Выявлено ослабление интенсивности БД на 47% - 60%, которое является статистически значимым для всех изученных подтипов горных чернозёмов ( $t > 4,33$ ;  $p < 0,0001$ ). Это свидетельствует о том, что происходит ухудшение состояния почвенных микробных сообществ и снижение численности микроорганизмов в агрогенных почвах (Margesin et al., 2009).

Таблица 6 – Средние значения микробиологических показателей верхних горизонтов (0-20см) естественных и пахотных горных чернозёмов исследуемых территорий

Почвы	n	Скорость БД, мкг CO <sub>2</sub> /1г/ч	Скорость СИД, мкг CO <sub>2</sub> /1г/ч	C <sub>мик</sub> , мкг С/г	Запас C <sub>мик</sub> , г/м <sup>2</sup>
Горные чернозёмы типичные	<u>18</u>	<u>7,0±0,6</u>	<u>55,2±3,3</u>	<u>1222±73</u>	<u>295±18</u>
	18	17,3±1,9	86,8±7,3	1920±162	414±40
Горные чернозёмы выщелоченные	<u>18</u>	<u>7,1±0,6</u>	<u>58,3±4,4</u>	<u>1289±98</u>	<u>309±22</u>
	18	16,5±2,1	93,2±6,7	1998±152	390±28
Горные чернозёмы обыкновенные	<u>15</u>	<u>8,5±0,9</u>	<u>54,8±2,8</u>	<u>1213±63</u>	<u>305±22</u>
	16	16,1±1,5	99,6±9,1	2203±201	484±45

Примечание: над чертой показатели пахотных почв, под чертой – естественных; шкала оценки содержания углерода микробной биомассы (мкг С/г почвы) в почвах: до 200 - очень низкое; 201-500 - низкое; 501-1000 - среднее; более 1000 – высокое (Ананьева, 2003); n- объем выборки

Показатели скорости СИД, характеризующие физиологический потенциал микробной биомассы, а также рассчитанные на их основе величины содержания C<sub>мик</sub> уменьшаются в пахотных почвах на 35% - 45% (Хакунова и др., 2018, Горобцова и др., 2023). Обнаруженные различия статистически значимы для всех подтипов горных чернозёмов ( $t > 4,44$ ;  $p < 0,00007$ ). Снижение содержания C<sub>мик</sub> подтверждает сокращение численности микроорганизмов в обрабатываемых почвах (Papa et al., 2010).

Несмотря на установленные различия, содержание C<sub>мик</sub> в пахотных горизонтах остаётся высоким (>1001 мкг С/г), благодаря природному потенциалу горных чернозёмов. Запасы C<sub>мик</sub> снижаются в меньшей степени (на 21% - 37%), что, как и в случае с расчётом запасов гумуса, объясняется более высокими

показателями плотности сложения в выборке, характеризующей пахотные горизонты горных чернозёмов (Хакунова и др., 2018).

Таким образом, многолетняя обработка горных чернозёмов привела к формированию пахотных горизонтов, параметры биологической активности которых существенно ниже, чем в верхних горизонтах целинных почв. Комплекс полученных данных проанализировали с применением методов двухфакторного дисперсионного анализа. Было установлено, что влияние совокупности причин, обозначенных как «фактор пахотного воздействия», является определяющим и достоверным для следующих показателей: активность фосфатазы – 74%; инвертазы – 58%; дегидрогеназы – 45%; уреазы – 41%; скорость БД – 40%; содержание и запасы гумуса – 35%; скорость СИД, содержание и запасы Смик – 32%. Вторым фактором при проведении анализа рассмотрено влияние генетических особенностей горных чернозёмов (на уровне подтипа). Оказалось, что влияние этого фактора гораздо ниже и варьирует для всех перечисленных показателей от 1% до 16% (Хакунова и др., 2018).

Результаты дисперсионного анализа позволяют объединить полученные данные, характеризующих различные подтипы горных агрочернозёмов, в общую выборку и осуществить оценку степени изменения параметров биологической активности в пахотных горизонтах горных чернозёмов исследуемых территорий. Как следует из представленных результатов (табл. 7), параметры, характеризующие различные аспекты биологических свойств горных почв снизились в различной степени. Максимально изменились средние показатели активности гидролитических ферментов и скорость БД. Падение содержания Смик указывает на существенное уменьшение микробного пула в агрогенных чернозёмах.

Уровень снижения содержания гумуса (в среднем на 30%) совпадает с установленным ранее в равнинных чернозёмах Кабардино-Балкарии (Гедгафова и др., 2015; Горобцова и др., 2017; 2018). Вероятно, произошла минерализация наиболее лабильных форм гумуса и установился новый баланс, характерный для пахотных горных чернозёмов при наблюдаемом уровне агрогенного воздействия,

со средним содержанием гумуса около 6%. Относительно меньшее снижение запасов гумуса и Смик является кажущимся, так как возросшая плотность пахотных горизонтов влияет на значения данных показателей.

Таблица 7 – Снижение (на %) показателей биологической активности в верхних горизонтах (0-20 см) горных чернозёмов под воздействием пахотной обработки

Показатель	Снижение, на %
Содержание гумуса, %	30
Запасы гумуса, т/га	20
Суммарная активность окислительно–восстановительных ферментов	37
Суммарная активность гидролитических ферментов	61
Скорость БД, мкг CO <sub>2</sub> /1г/ч	56
Скорость СИД, мкг CO <sub>2</sub> /1г/ч	39
Содержание Смик, мкг С/г	39
Запас Смик, г/м <sup>2</sup>	29

Установить общий уровень изменения биологической активности пахотных горизонтов горных чернозёмов позволяет применение ИПЭБСП, суммирующий все описанные выше показатели (рис. 23).

При расчётах ИПЭБСП пахотных горизонтов за 100% принимали значения, характеризующие данный подтип в естественных условиях. Падение общего уровня биологической активности в среднем приблизительно на 40% говорит о существенном изменениях, произошедших в обрабатываемых горных чернозёмах: нарушении их важнейших свойств, режимов и биоэнергетических функций, снижении порога устойчивости почвенной системы (Колесников и др., 2002; Яковлев, Евдокимова, 2011).

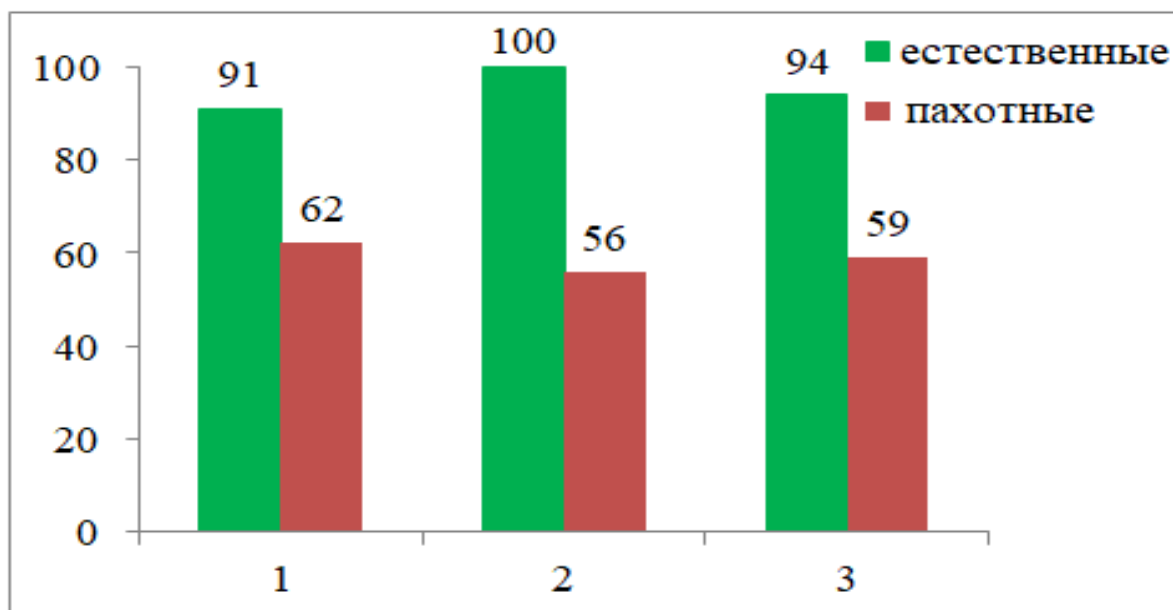


Рис. 23. Интегральные показатели эколого-биологического состояния (ИПЭБСП) верхних горизонтов (0-20 см) различных подтипов естественных и пахотных горных чернозёмов (% отн.). Примечание: 1- чернозёмы обыкновенные; 2 – чернозёмы типичные; 3 – чернозёмы выщелоченные.

В настоящее время состояние пахотных почв можно охарактеризовать как удовлетворительное. Горные чернозёмы, обладающие высоким естественным плодородием, несмотря на многолетний интенсивный агротехнический режим, сохраняют свой врожденный биопотенциал. Вместе с тем, учитывая перспективы дальнейшего наращивания интенсивности хозяйственного использования данных плодородных почв, становится очевидной необходимостью регулярного и системного мониторинга их состояния, чтобы своевременно выявлять и предотвращать возможные негативные изменения.

## **ГЛАВА 5. Современное состояние горно-луговых черноземовидных почв Центрального Кавказа**

### **5.1 Динамика физико-химических и биологических параметров в профилях различных подтипов естественных горно-луговых черноземовидных почв**

Как отмечено выше, горно-луговые чернозёмовидные (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 горными чернозёмами (Гедгафова и др., 2019, Темботов, 2024). 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 (25-45см), плотная хорошо развитая дернина, отсутствие переходных гор. (В) и гор. (ВС). Гумусовые горизонты расположены непосредственно на каменистых карбонатных материнских породах (рис. 8).

Как показывает исследование динамики контролируемых показателей (табл. 8), биологические процессы в профиле ГЛЧВ типичной почвы, протекают при слабощелочной реакции, в выщелоченной – рН (Н<sub>2</sub>О) нейтральная. Деятельность корневой системы травянистых растений и почвенной мезофауна обуславливают рыхлое сложение описываемых почв. Обилие органических остатков богатой разнотравно-злаковой растительности способствует накоплению гумуса, его содержание и запас в описываемых почвах характеризуются очень высокими значениями по всему профилю. Такие условия благоприятны для формирования высокой биологической активности описываемых почв.

Таблица 8 – Физико-химические показатели в профилях естественных горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии).

Горно-луговая чернозёмовидная типичная почва					Горно-луговая чернозёмовидная выщелоченная почва				
Глубина отбора образцов почвы, см	Содержание гумуса, %	Запас гумуса, т/га	Плотность, г/см <sup>3</sup>	pH(H <sub>2</sub> O)	Глубина отбора образцов почвы, см	Содержание гумуса, %	Запас гумуса, т/га	Плотность, г/см <sup>3</sup>	pH(H <sub>2</sub> O)
Ад 0-10	17,0	221	0,65	7,48	Ад 0-8	12,3	187	0,76	6,87
А 10-30	15,6	302	0,97	7,70	А 8-25	9,7	206	1,06	6,99
В 30-43	10,8	183	0,85	8,28	-	-	-	-	-

Полученные данные респираторной активности почвенной микробной биомассы (скорость БД и СИД) и количественные характеристики (содержание и запасы Смик) подтверждают активную деятельность и стабильное функционирование почвенных микробсообществ (табл. 9).

Таблица 9 – Микробиологические показатели в профилях естественных горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии)

Глубина отбора проб, см	Скорость БД, мкг СО <sub>2</sub> /1г/час	Скорость СИД, мкг СО <sub>2</sub> /1г	Смик, мкг С/1г	Запас Смик, г/м <sup>2</sup>
Горно-луговая чернозёмовидная типичная почва				
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 почва				
Ад 0-8	18,3	68,8	1522	231
А 8-25	6,4	41,3	914	194

Характер динамики указанных параметров БА также вполне предсказуем. Максимальными значениями обладают дерновые горизонты, вниз по профилю все показатели в той или иной степени снижаются. Из-за отсутствия переходных горизонтов, высокие значения изученных микробных показателей наблюдаются во всём профиле описываемых почв. Респираторные характеристики состояния микробной биомассы ГЛЧВ почв в целом сопоставимы с данными, характеризующими описанные выше профили естественных горных чернозёмов.

Деятельность почвенных ферментов отражает сложную динамику различных биохимических процессов, протекающих в профилях ГЛЧВ почв (табл. 10). *Окислительно-восстановительные ферменты (каталаза и дегидрогеназа)* в дерновых горизонтах проявляют среднюю активность, которая трансформируется в низкую вглубь по профилю. Среди *гидролитических ферментов* наиболее активна *уреаза*. В дерновых горизонтах установленные значения соответствуют градации «очень высокая», а далее по всему профилю типичной ГЛЧВ отмечена высокая уреазная активность. В профиле ГЛЧВ выщелоченной очень высокий показатель в гор. (Ад) падает до среднего в гор. (А). Максимальные значения активности уреазы и резкое их падение в нижележащих горизонтах (на 50% и более 80% соответственно) может быть связано с наличием субстрата (экскрементов животных) на поверхности почвы.

Таблица 10 – Ферментативная активность в профилях естественных горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии)

Глубина отбора образцов почвы, см	Дегидрогеназа, мг ТФФ /10г/24час	Каталаза, мл О <sub>2</sub> /1г/1мин	Инвертаза, мг глюкозы /1г/24 час	Уреаза, мг NH <sub>3</sub> /10 г/24 час	Фосфатаза, мг P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /100г/1 час
Горно-луговая чернозёмовидная типичная почва					
Ад 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
АВ 30-43	2,1	2,1	31,3	40,3	10,5
Горно-луговая чернозёмовидная выщелоченная почва					
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

*Инвертаза и фосфатаза* проявляют среднюю активность во всём профиле типичных и выщелоченных ГЛЧВ почв. При этом в профиле выщелоченной почвы отмечено резкое снижение их абсолютных показателей в гор. (А), по сравнению с гор. (Ад) (около 40% и 50% соответственно). В профиле типичной ГЛЧВ почвы снижение активности инвертазы и фосфатазы происходит постепенно.

Представленные данные вновь подтверждают, что формирование активности почвенных ферментов – 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 горные чернозёмы. Деятельность фосфатазы в дерновых горизонтах ГЛЧВ почв заметно выше, по сравнению с показателями, характеризующими верхние горизонты естественных горных чернозёмов (17,4-18,4 мг  $P_2O_5$  /100 г/1 час).

## **5.2 Экологическая оценка состояния горно-луговых черноземовидных почв**

Как показано выше, условия почвообразования ГЛЧВ почв обладают рядом особенностей, благодаря которым сформировались и характерные черты, отличающие их от горных чернозёмов (табл. 11). В сравнении с горными чернозёмами, рассматриваемые почвы функционируют в более влажных условиях (описание см. стр. 40-42).

Возможно, влияние особенностей водного режима и процессы выщелачивания карбонатов – один из факторов формирования кислотно-щелочных условий, характерных для ГЛЧВ почв. Средние значения, установленные для верхних горизонтов (0-20см) ГЛЧВ почв, соответствуют нейтральной реакции почвенной суспензии, а значения  $pH(H_2O)$  достоверно отличается от данных, характеризующих верхние горизонты горных чернозёмов ( $t=3,9$ ;  $p=0,000$ ).

Таблица 11 – Средние значения физико-химических и биологических показателей верхних горизонтов (0-20см) естественных горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа

Показатель	Горно-луговые чернозёмовидные типичные почвы	Горно-луговые чернозёмовидные выщелоченные почвы
Влажность, %	43,5±3,7	43,1±6,1
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,74±0,02	0,93±0,06
pH(H <sub>2</sub> O)	7,4±0,1	6,9±0,1
Содержание гумуса, %	22,5±0,9	12,2±1,4
Запасы гумуса, т/га	318±18	195±15
Скорость БД, мкг СО <sub>2</sub> /1г/час	23,9±3,0	19,1±2,4
Скорость СИД, мкг СО <sub>2</sub> /1г/час	200,6±18,3	119,1±15,5
Содержание Смик, мкг С/г	4437±464	2635±342
Запас Смик, г/м <sup>2</sup>	618±54	492±51
Смик/Сорг, %	3,6±0,3	4,3±0,4
Активность каталазы, мг О <sub>2</sub> /г/мин	6,6±0,5	4,5±0,5
Активность дегидрогеназы, мг ТФФ 10г/24час	6,2±0,5	4,0±0,3
Активность инвертазы, мг глюкозы 1г/24 часа	42,9±2,5	24,4±4,3
Активность фосфатазы, мг Р <sub>2</sub> О <sub>5</sub> /100г/1 час	37,0±3,1	36,0±3,0
Активность уреазы, мг NH <sub>3</sub> , 10г/24 часа	99,4±12,6	45,9±6,1

Хорошо развитая корневая система богатой горно-лугово-степной растительности обуславливает низкие значения плотности верхних и средних горизонтов ГЛЧВ почв. Усреднённые данные доказывают более рыхлое сложение ГЛЧВ почв, по сравнению с горными чернозёмами ( $t=7,7$ ;  $p=0,000$ ). Вероятно, на формирование данного показателя оказывает влияние накопление растительных

остатков в разной степени разложения, которое наблюдали в верхних горизонтах рассматриваемых ГЛЧВ почв.

Совокупность условий, включающих обилие органических остатков богатой горно-луговой травянистой растительности, достаточное количество влаги, благоприятные термические условия и высокая микробиологическая активность - обуславливают очень высокие показатели содержания и запасов гумуса в верхних горизонтах типичных ГЛЧВ почв (Молчанов, 2005). Данные, характеризующие гумусовое состояние подтипа выщелоченных ГЛЧВ почв, несколько ниже, но также позволяют отнести их (в соответствии с Классификацией, 1977) к виду тучных. Количественные гумусовые характеристики ГЛЧВ почв статистически значимо отличаются от показателей, свойственных горным чернозёмам ( $t > 6,7$ ;  $p < 0,000$ ). Представленные данные и проведённый статистический анализ подтверждают, что стабильные физико-химические показатели различаются у сравниваемых почв на уровне типа.

ГЛЧВ почвы обладают очень высокими параметрами физиологической активности микробной биомассы (табл. 11). Сравнение контролируемых показателей на уровне типа показало, что скорость БД и СИД в ГЛЧВ почвах, по сравнению с горными чернозёмами, существенно выше, а различия установленных значений статистически значимы ( $t > 5,85$ ;  $p < 0,00$ ).

Средние значения содержания  $S_{мик}$  обоих подтипов ГЛЧВ почв очень высокие (более 1500 мкг С/1г) и на уровне типа значимо выше, чем в горных чернозёмах (на 43%,  $t = 6,8$ ;  $p = 0,00$ ). Различие показателей запаса  $S_{мик}$  в сравниваемых типах почв менее выражено (выше на 20%,  $t = 6,6$ ;  $p = 0,00$ ), что объясняется более высокими показателями плотности сложения в выборке, характеризующей верхние горизонты горных чернозёмов (Хакунова и др., 2018). Усреднённые значения отношения  $S_{мик}/C_{орг}$ , установленные для ГЛЧВ почв и горных чернозёмов, достаточно близки и различия этого параметра в сравниваемых типах не являются статистически значимыми ( $t = 0,065$ ;  $p = 0,95$ ). Таким образом, для рассматриваемых типов естественных горных почв предлагается считать характерным показатель  $S_{мик}/C_{орг}$  близкий к 3-4%.

Деятельность почвенных ферментов в ГЛЧВ почвах существенно отличается от таковой в горных чернозёмах. *Оксидоредуктазы* проявляют в ГЛЧВ почвах слабую (дегидрогеназа) и среднюю (каталаза) активность. Усреднённые показатели деятельности этих ферментов в ГЛЧВ почвах значимо ниже, чем аналогичные характеристики естественных горных чернозёмов ( $t > 2,5$   $p < 0,02$ ). Данные свидетельствуют, что в более влажных и прохладных условиях окислительно-восстановительные процессы, катализируемые каталазой и дегидрогеназой, протекают с меньшей интенсивностью. Это может служить одной из причин того, что процессы окисления органических веществ происходят медленнее, а полуразложившиеся растительные остатки накапливаются и формируют богатые грубым гумусом, вспушенные верхние горизонты ГЛЧВ почв.

*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%. Более интенсивные процессы углеродного, азотного и фосфорного обмена, возможно, обуславливают и более высокую физиологическую активность почвенной микробной биомассы, активность и большее содержание которой в ГЛЧВ почвах отмечены выше.

Показатели *суммарной относительной ферментативной активности* обоих типов исследуемых почв позволяют сравнить совокупную деятельность всех контролируемых ферментов на уровне типа и подтипа. По мере возрастания суммарной относительной ферментативной активности, изученные почвы рассматриваемых подтипов формируют следующий ряд: *ГЛЧВ типичные (100%) > ГЧ выщелоченные (79%) > ГЧ обыкновенные (76%) > ГЧ типичные (73%) > ГЛЧВ выщелоченные (67%)*. Представленный ряд показывает, что суммарная активность изученных ферментов различается в горных чернозёмах незначительно, однако она заметно ниже, чем в ГЛЧВ типичных почвах. Минимальное значение данного показателя в ГЛЧВ выщелоченных почвах обусловлено самой низкой активностью оксидоредуктаз (каталазы и дегидрогеназы) в почвах данного подтипа.

Для сравнения общего уровня БА в изученных горных почвах, основанного на определении ИПЭБСП (% отн.) по средним показателям параметров БА верхних горизонтов (0-20см), представлена диаграмма (рис. 24).

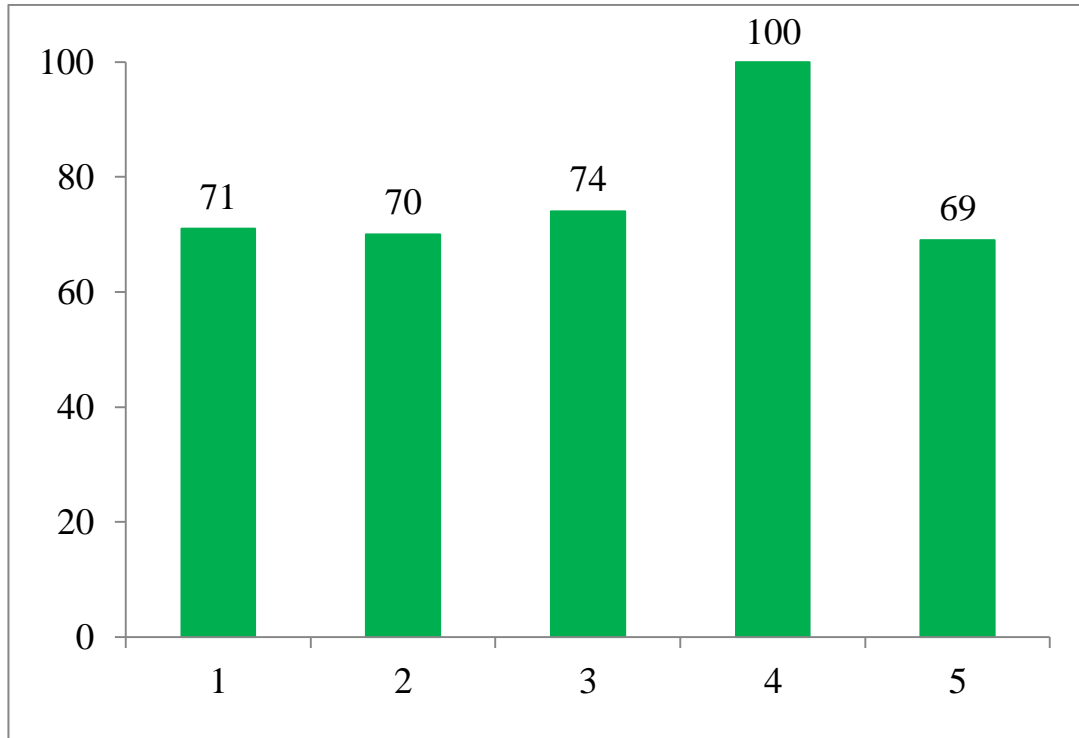


Рис. 24. Общий уровень биологической активности верхних горизонтов (0-20см) изученных почв естественных биогеоценозов, выраженный через интегральные показатели эколого-биологического состояния почвы (ИПЭБСП, отн. %).

Примечание: 1 – горные чернозёмы обыкновенные; 2 – горные чернозёмы типичные; 3 – горные чернозёмы выщелоченные; 4 – горно-луговые чернозёмовидные типичные; 5 – горно-луговые чернозёмовидные выщелоченные.

Полученные данные свидетельствуют, что почвы одного типа (в данном исследовании ГЛЧВ типичные и выщелоченные) могут существенно (на 31%) отличаться по уровню проявления БА. При этом все три подтипа естественных горных чернозёмов и выщелоченные ГЛЧВ почвы характеризуются в верхних горизонтах (0-20см) весьма близкими значениями ИПЭБСП и, следовательно, одинаковым уровнем БА.

Вероятно, для сопоставления общего уровня БА в генетически различных почвах следует использовать определение ИПЭБСП не верхних горизонтов, а полных профилей, отражающих наиболее характерные особенности данного типа (подтипа). Это предположение подтверждает диаграмма (рис. 25), которая

позволяет сравнить уровень БА в профилях различных подтипов горных чернозёмов и ГЛЧВ. Среди горных чернозёмов выделяется профиль типичного чернозёма, обладающий существенно более высоким уровне БА, по сравнению с обыкновенными и выщелоченными чернозёмами, значения ИПЭБСП которых вполне сопоставимы.

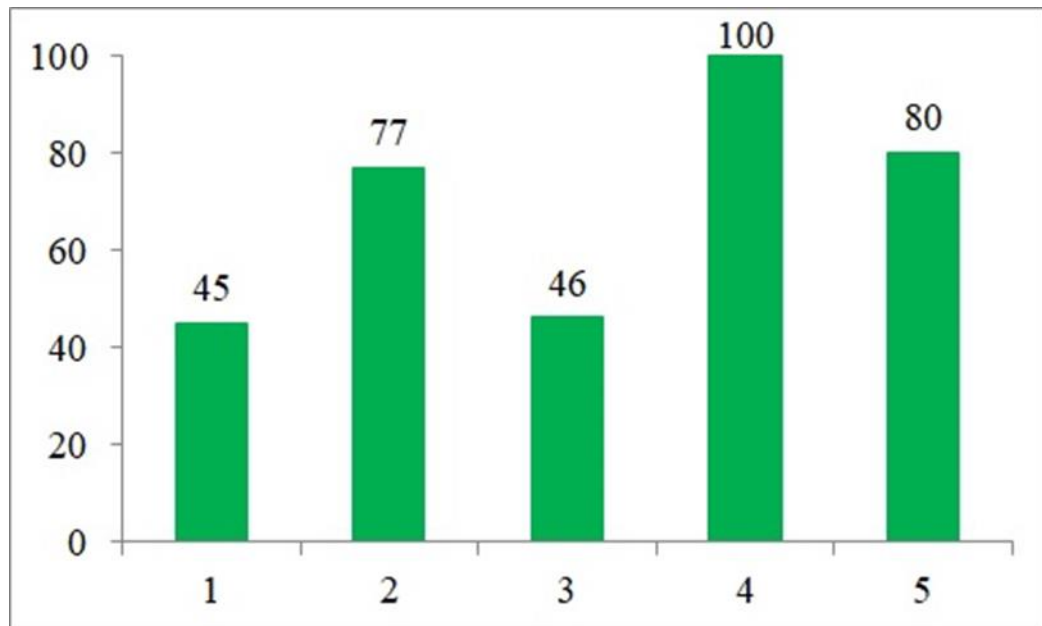


Рис. 25. Интегральные показатели эколого-биологического состояния (ИПЭБСП, % отн.) профилей различных подтипов естественных горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв Центрального Кавказа.

Примечание: 1. горные чернозёмы обыкновенные; 2. горные чернозёмы типичные; 3. горные чернозёмы выщелоченные; 4. горно-луговые чернозёмовидные типичные; 5. горно-луговые чернозёмовидные выщелоченные.

Установлено, что ГЛЧВ почвы обладают более высоким уровнем БА, несмотря на то, что имеют существенно меньшую мощность почвенного слоя (что учитывается и влияет на результат при расчёте ИПЭБСП (% отн.)). Таким образом, ГЛЧВ почвы исследуемых территорий имеют очень высокий биоэнергетический потенциал и превосходят по напряжённости биохимических и микробиологических процессов, даже типичный чернозём, обладающий эталонными показателями.

Установленные средние значения характеризуют горные почвы, функционирующие в естественных (слабоповреждённых) биогеоценозах, и могут

служить эталонными параметрами для дальнейших почвенно-экологических исследований. Выявленные изменения в агрогенных почвах необходимы для мониторинга и оценки состояния почвенного покрова, с учётом хозяйственного использования исследуемых территорий. 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 интерактивная картографическая модель (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:  $pH(H_2O)$ , содержание гумуса, скорость БД почвенной микробной биомассы, содержание  $S_{мик}$ , 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.

При формировании слоёв ИКМ, почвы объединяли в группы, каждая из которых соответствует некоторому уровню моделируемого показателя, относится к определённой градации (низкая-средняя-высокая) и выделена цветом.

### **6.1 Модели пространственной изменчивости физико-химических и биологических параметров естественных и агрогенных почв**

Дискриминантный анализ показал, что естественные и агрогенные системы существенно различаются и описываются различным количеством «внешних» переменных (табл. 12).

Таблица 12 – Количество «внешних» переменных, описывающих поведение изученных почвенных показателей в дискриминантных моделях

Показатель	Модели, характеризующие агроценозы	Модели, характеризующие биогеоценозы
pH (H <sub>2</sub> O)	33	69
Содержание гумуса	25	60
Скорость БД	23	58
Содержание Смик	29	68
Активность каталазы	32	57
Активность фосфатазы	20	69
Активность инвертазы	14	62
Активность уреазы	14	50

Полученные данные свидетельствуют, что для моделирования пространственной вариабельности контролируемых почвенных параметров в условиях естественных биогеоценозов требуется большее количество переменных, чем для описания почв агроценозов. Большое количество «внешних» данных, необходимых для описания почвенного покрова в естественных системах, вызвано влиянием сложного рельефа нераспаханных участков. Следует отметить, что естественные (малоповреждённые) биогеоценозы сохранились

только в тех местах, где обработка почвы и другое хозяйственное использование затруднено или невозможно из-за недоступности расположения и особенностей рельефа.

Рельеф является ведущим фактором почвообразования в горных условиях, так как влияет на перераспределение тепла и влаги (Хакунова, 2022), видовой состав и характер растительных сообществ, перемещение почвенной массы и развитие эрозионных процессов, то есть прямо или опосредованно формирует большинство режимов и почвенных свойств. Искусственно выровненные пахотные угодья расположены на выположенных элементах рельефа и обладают более однородными свойствами, в сравнении с участками естественных горных степей, что и отразил проведённый дискриминантный анализ. Это предположение подтверждается характером «внешних» переменных, которые вносят наибольший вклад в описание каждого показателя (табл. 13).

Таблица 13 – «Внешние» переменные, вносящие наибольший вклад в описание изученных почвенных показателей в дискриминантных моделях

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

При моделировании пространственной динамики почвенных показателей в условиях естественных биогеоценозов, максимальный вклад в описание поведения каждого показателя вносят данные, описывающие особенности изменения рельефа исследуемых территорий (SRTM) (Темботов, 2017).

При построении моделей варьирования контролируемых параметров в искусственных агроценозах, наиболее существенный вклад (помимо данных SRTM) вносит информация, полученная благодаря индексам, которые рассчитаны на основе информации, содержащейся в многоканальных сканерных снимках (LANDSAT). По большей части это, так называемые, «вегетационные индексы» (Хакунова, 2022), описывающие влияние продуктивности биомассы, активности транспирации и других параметров, характеризующих различные типы растительных сообществ.

Итак, статистический (дискриминантный анализ) показал, что рассмотренные «внешние» переменные по-разному влияют на пространственную динамику почвенных показателей в естественных биогеоценозах и искусственных агроценозах, следовательно, требуют создания отдельных моделей, учитывающих описанные особенности. Проведённый анализ обосновал необходимость построения двух типов гипотетических моделей для каждого изученного почвенного показателя. *Первый тип моделей* иллюстрирует пространственную динамику почвенных характеристик, согласно закономерностям, обнаруженным для агроценозов. *Второй тип моделей* отображает изменение контролируемых параметров в условиях естественных биогеоценозов.

Создание таких гипотетических моделей и их сопоставление позволяет проследить характер и степень изменения каждого почвенного параметра и сравнить состояние почвенного покрова при максимальном антропогенном воздействии (как если бы вся территория моделирования была распахана) и при полном отсутствии такового.

На рис. 26-34 представлены картографические модели биогеоценозов (КМ БИО), которые отображают – какими могли бы быть почвенные показатели исследуемых территорий в том случае, если бы на них не оказывалось

антропогенного воздействия. Для сравнения, на тех же рисунках представлены картографические модели агроценозов (КМ АГРО), отображающие ситуацию при гипотетическом использовании под пашню всей исследуемой территории.

Следующим шагом моделирования является агрегация гипотетических моделей КМ АГРО и КМ БИО в *объединенную картографическую модель (ОКМ)*. При формировании ОКМ учтены были учтены такие факторы, как границы почвенных контуров, фактическое размещение пахотных угодий и естественных биогеоценозов с определённым типом растительности, особенности рельефа, климатические параметры и другие характеристики. Таким образом, сформированные ОКМ отражают достоверное пространственное распределение почвенных показателей на всей территории исследования.

### 6.1.1 Кислотно-щелочные условия

Кислотно-щелочные условия – устойчивый, генетически обусловленный почвенный показатель. Однако, пахотное использование, внесение в почву минеральных удобрений и средств защиты растений может привести к изменению уровня кислотности почвы (Вальков, 2002). Данные, полученные в результате проведённых исследований (табл. 14) и отображённые на приведённых картографических моделях (рис. 26), подтверждают, что кислотно-щелочные условия в верхних горизонтах обрабатываемых почв (КМ АГРО) могут существенно измениться, по сравнению с естественными аналогами (КМ БИО).

Таблица 14 – Площадь, занимаемая исследуемыми почвами с различным уровнем рН(H<sub>2</sub>O) в естественных (КМ БИО), агрогенных условиях (КМ АГРО) и при их сочетании (ОКМ)

рН(H <sub>2</sub> O)	Площадь, км <sup>2</sup>		
	КМ АГРО	КМ БИО	ОКМ
Слабокислые 6-6,5	0	687,9	606,4
Нейтральные 6,5-7,5	1011,6	642,1	668,3
Слабощелочные 7,5-8,7	773,4	455	510,3

Согласно представленной модели (рис. 26, КМ АГРО), верхние горизонты всех горных почв, находящихся на исследуемой территории, приобрели бы при обработке показатели  $pH(H_2O)$ , лежащие в пределах нейтральных и слабощелочных значений. Такое «нивелирование» некоторых почвенных показателей (и в том числе кислотно-щелочных условий) в пахотных горизонтах различных подтипов чернозёмов степной зоны наблюдалось и при анализе полученных ранее данных (Горобцова и др., 2012).

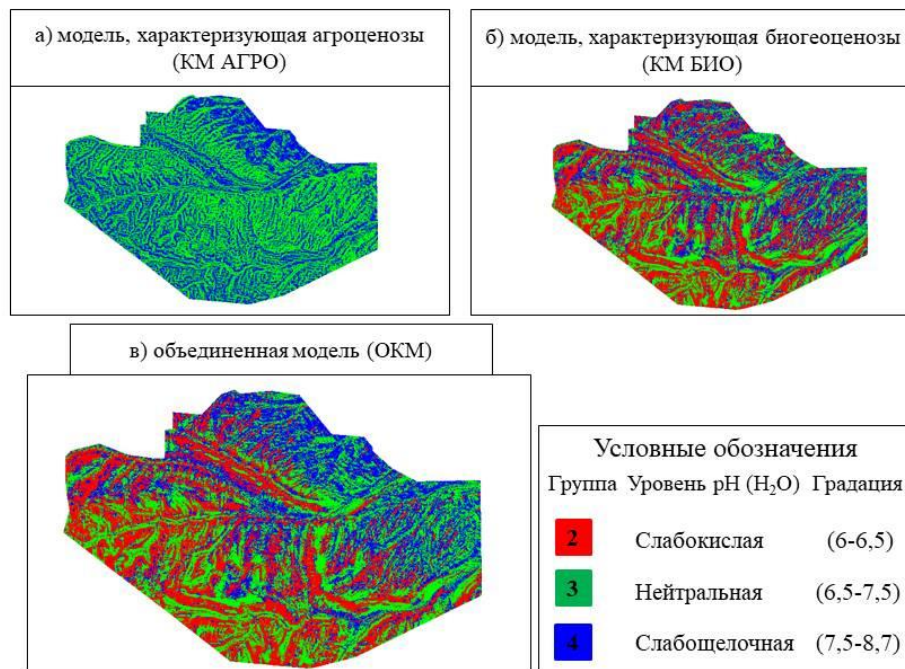


Рис. 26. Картографические модели, отображающие пространственное изменение уровня  $pH(H_2O)$  в верхних горизонтах (0-20 см) почв исследуемых территорий.

Модель, отражающая ситуацию в естественных биогеоценозах (рис. 26, КМ БИО), демонстрирует изменение кислотно-щелочных условий - от слабокислой - до слабощелочной реакции. Слабокислые почвы занимают 38,5% от общей картографируемой площади. Их основные массивы расположены на повышенных элементах рельефа (например, гребень Джинальского хребта), а также на речных террасах (р. Баксан, р. Малка) и ближе к горам.

Нейтральные почвы заняли бы в естественных биогеоценозах приблизительно такую же площадь (около 36%). Они чередуются с кислыми

почвами, и их участки также расположены в предгорьях, и у подножий Джинальского хребта. Слабощелочные почвы (25,5% картируемой площади) в основном расположились бы ближе к границам с равниной, в северной и северо-западных частях исследуемой территории. Участки со слабощелочными почвами располагаются и за Джинальским хребтом, но не доходят до границы с субальпийским поясом.

В соответствии с полученной *общей картографической моделью* (ОКМ), на исследуемой территории выделено три группы почв, реакция которых изменяется от слабокислой - до слабощелочной. Территории, занимаемые нейтральными и слабокислыми почвами сопоставимы (37% и 34% площади модели соответственно). Их расположение, отражённое в ОКМ, сходно с моделью КМ БИО, особенно за линией хребтов, однако есть и различия. В северных и северо-западных районах их площади стали меньше за счёт слабощелочных почв.

Слабощелочные почвы (28% площади картируемой территории) чаще встречаются в северных и северо-западных районах, большая часть которых используется под пашню. Сравнение представленных моделей (КМ БИО и ОКМ) показывает, что площади слабощелочных почв в реальных условиях увеличиваются (табл. 14), что, вероятно, является следствием обработки, в результате которой происходит процесс подщелачивания пахотных горизонтов. Массивы слабощелочных почв расположены и за Джинальским хребтом, что связано с высокой карбонатностью почвообразующих пород в этих районах. Ближе к горам, на границах картографируемой территории участки слабощелочных почв почти не встречаются.

### **6.1.2 Содержание гумуса**

Многочисленными исследованиями установлено, что многолетнее пахотное воздействие приводит к существенным (около 30%) потерям гумуса в пахотных горизонтах (Кислицына, Иванова, 2006; Когут и др., 2007). Проведённый дискриминантный анализ и представленные на рис. 27 модели (КМ АГРО и КМ

БИО) наглядно демонстрируют, как изменилось бы содержание гумуса в изученных горных почвах в гипотетических условиях их сплошного пахотного использования и полном отсутствии такового.

Следует отметить, что на исследуемых территориях отсутствуют почвы с очень низким (0-2%) и низким (2-4%) содержанием гумуса (табл. 15). Для горных почв характерны высокие гумусовые показатели верхних горизонтов, что отражают и полученные данные.

В естественных условиях (КМ БИО) на исследуемых территориях преобладали бы почвы с очень высоким (> 10%) содержанием гумуса. Они могли занимать 83,2% площади района исследований. Столь высокая гумусированность типична для верхних горизонтов горных чернозёмов и ГЛЧВ и указывает на их высокий природный потенциал (Молчанов, 2008; Молчанов и др., 2017).

Таблица 15 – Площадь, занимаемая исследуемыми почвами с различным содержанием гумуса в естественных (КМ БИО), агрогенных условиях (КМ АГРО) и при их сочетании (ОКМ)

Градации содержания гумуса, (%)	Площадь, тыс. га		
	КМ АГРО	КМ БИО	ОКМ
Очень низкое 0-2 %	0	0	0
Низкое 2-4 %	0	0	0
Среднее 4-6 %	39,3	10,7	11,9
Высокое 6-10 %	139,2	19,3	34,0
Очень высокое > 10 %	0	148,5	132,6

В агрогенных условиях (КМ АГРО) ситуация существенно меняется. Исчезают почвы с очень высоким содержанием гумуса, они переходят в категорию средне и высоко гумусированных (22% и 78% площади соответственно). Следует отметить, что, несмотря на существенное снижение содержания гумуса, исследуемые пахотные почвы всё же сохраняют достаточно высокие его значения, что определяет целый ряд их биохимических и микробиологических свойств.

Объединённая модель наглядно демонстрирует влияние рельефа и хозяйственного использования на гумусовые свойства почв. Как и на предыдущей модели (рис. 27), чётко проявляется участок в северо-западной части ареала исследуемых почв, где на границе предгорий и среднегорий расположены пологие участки, используемые под пашню. На этих территориях преобладают высокогумусные почвы (19% площади модели) с вкраплениями среднегумусных (6,5%). Дальше и выше в горы пашни сменяются сенокосами и пастбищами.

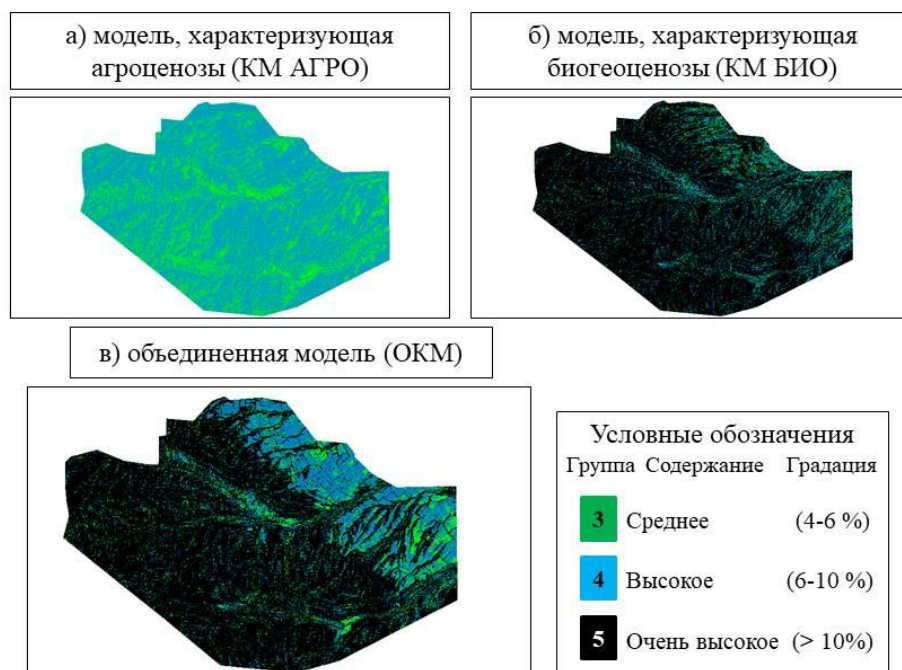


Рис. 27. Картографические модели, отображающие пространственное изменение содержания гумуса (%) в верхних горизонтах (0-20 см) почв исследуемых территорий.

На гумусное состояние почв в большей степени оказывает влияние рельеф и другие природные факторы, поэтому преобладают почвы с очень высоким содержанием гумуса, составляющие 74,4% картографируемой площади. Но, несмотря на преобладание почв этой группы, гумусовые показатели варьируют весьма широко, что также типично для горных территорий и отражено в предлагаемой модели. Учитывая, что почвы с высоким и очень высоким содержанием гумуса занимают более 93% исследуемых территорий, можно предполагать высокие значения микробиологических и биохимических

показателей и общего уровня биологической активности верхних горизонтов горных чернозёмов и ГЛЧВ почв.

### 6.1.3 Скорость базального дыхания

Представленные модели наглядно демонстрируют влияние пахотной обработки на фоновую дыхательную активность почвенной микробной биомассы, которую принято характеризовать с помощью показателя скорости БД (рис. 28).

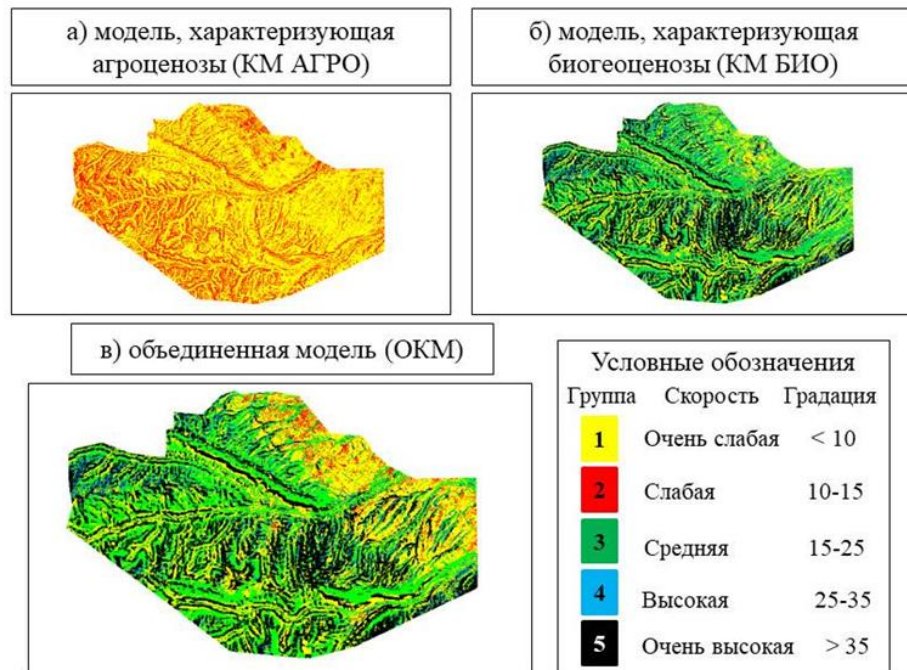


Рис. 28. Картографические модели, отображающие пространственное изменение скорости базального дыхания ( $\text{мкг CO}_2/\text{1г}/\text{1ч}$ ).

В условиях агроценозов преобладают почвы, в пахотных горизонтах которых скорость БД соответствует градации «очень слабая» (73,5% от общей картографируемой площади). На остальной части территории скорость БД слабая (26,3%). Как показано на гипотетической модели (KM АГРО), если бы исследуемый район полностью использовался бы под пашню, почвенные микроорганизмы проявляли бы только слабую и очень слабую фоновую респираторную активность (табл. 16). В условиях естественных биogeоценозов

наблюдалась бы совсем иная картина. Представленная гипотетическая модель отражает очень высокое варьирование скорости БД. Представленные значения меняются от очень слабых (на 23,4% площади территории), до высоких и очень высоких (в совокупности на 38,8% площади территории). Значительна доля почв со средними показателями скорости БД (37,1%).

Таблица 16 – Площадь, занимаемая исследуемыми почвами с различной скоростью базального дыхания в естественных (КМ БИО), агрогенных условиях (КМ АГРО) и при их сочетании (ОКМ)

Градации скорости БД	Площадь, тыс. га		
	КМ АГРО	КМ БИО	ОКМ
Очень слабая	131,1	41,8	51,4
Слабая	47,3	1,3	5,8
Средняя	0	66,2	56,1
Высокая	0	15,5	13,3
Очень высокая	0	53,7	51,8

Причину такого разнообразия данных объясняет дискриминантный анализ, который показывает, что наибольший вклад в модель, описывающую поведение скорости БД в условиях естественных биогеоценозов, среди внешних переменных вносит индекс MINC\_11 (SRTM) (табл. 13), который означает влияние минимальной кривизны рельефа. Таким образом, наиболее значительное влияние на значение скорости БД имеет микрорельеф исследуемых территорий, и, вероятно, связанные с ним перераспределение тепла, влаги, особенности растительного покрова.

Реальная ситуация, представленная на ОКМ, отображает ещё более высокую вариабельность описываемого показателя, так как учитывает наличие, как пахотных угодий, так и малонарушенных участков горных степей и лугов. Большая часть почв с низкой скоростью БД (28,8 % площади картографирования) расположена в северо-западной части района исследования, где на границе со

степной зоной находятся основные площади обрабатываемых территорий. Остальная часть ОКМ весьма сходна с КМ БИО, так как с увеличением высоты и усложнением орографии района, участки горных степей и лугов уже не используются под пашню и условия почвообразования на них соответствуют естественным (слабоповреждённым) биогеоценозам, что отражено и в представленной модели.

#### 6.1.4 Содержание углерода микробной биомассы

Содержание Смик (мкг С/г), определённое на основе показателей скорости СИД, является важным микробиологическим показателем, который может служить для количественной оценки состояния почвенной микробиоты (Ананьева и др., 2008). Его применение в экологическом мониторинге почв обусловлено высокой чувствительностью к агрогенному воздействию и смене землепользования (Никитин и др., 2022). Полученная гипотетическая модель (КМ АГРО) свидетельствует, что в условиях агроценозов большая часть территории (около 70%) была бы занята почвами со средними значениями данного показателя (табл. 17).

Таблица 17 – Площадь, занимаемая исследуемыми почвами с различным содержанием углерода микробной биомассы в естественных (КМ БИО), агрогенных условиях (КМ АГРО) и при их сочетании (ОКМ)

Градации содержания Смик (мкг С/г)	Площадь, тыс. га		
	КМ АГРО	КМ БИО	ОКМ
Среднее 501-1000	125,1	14,7	69,9
Высокое > 1000	53,3	163,7	108,5

Однако немалые площади пахотных почв (около 30%) могли характеризоваться высоким содержанием Смик (рис. 29). Это свидетельствует о том, что в горных чернозёмах даже в условиях многолетнего пахотного

воздействия сохраняются условия, позволяющие стабильно функционировать почвенной микробиоты и её физиологической активности.

Представленная на рис. 29 КМ БИО подтверждает, что в условиях естественных биогеоценозов верхние горизонты почв исследуемых территорий обладают высоким содержанием Смик (около 92% площади). Почвы со средними значениями описываемого показателя встречаются небольшими вкраплениями, а их суммарная площадь незначительна (около 8%).

В реально существующих условиях, отражённых на ОКМ (рис. 29), на исследуемых территориях преобладают почвы с высоким содержанием Смик (около 61%).

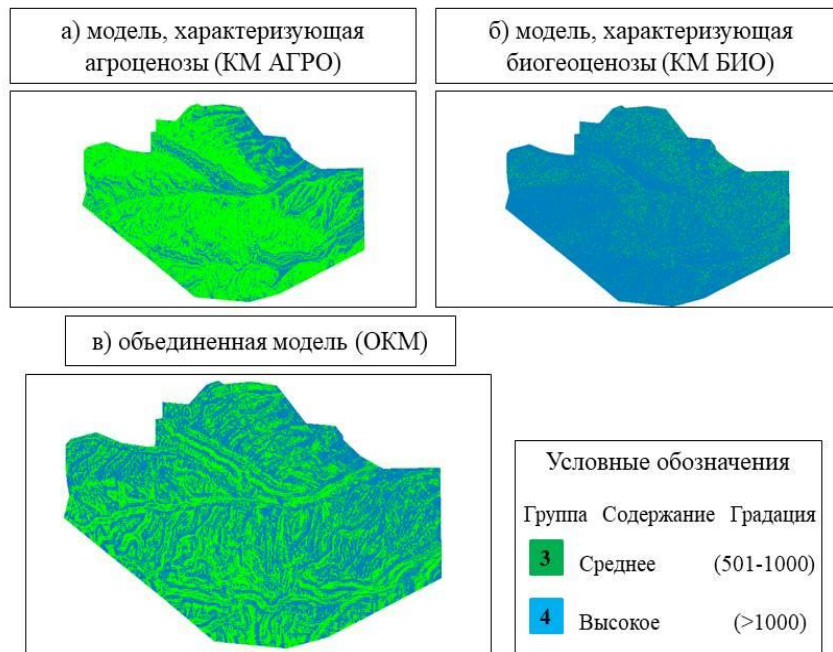


Рис. 29. Картографические модели, отражающие пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы в верхних горизонтах почв (0-20 см) исследуемых территорий.

Это свидетельствует о том, что почвенная микробная биомасса успешно выполняет свои функции по разложению растительного материала и газообмену между почвой и атмосферой. Однако, пахотное использование исследуемых почв влияет на состояние почвенного микробного пула. Наблюдается снижение

содержания Смик от высоких до средних показателей на 39% площади почв исследуемых территорий, что более чем в 4 раза выше по сравнению с КМ БИО.

### 6.1.5 Активность почвенных ферментов

Согласно данным, полученным при дискриминантном анализе (табл. 13), при отсутствии агрогенного воздействия (см. рис. 30-33, КМ БИО) почвы изученных территорий обладают более высоким уровнем активности всех изученных ферментов. Моделирование активности почвенных ферментов в агро- и биогеоценозах показало, что наибольшее влияние пахотное воздействие оказывает на деятельность гидролитических ферментов (инвертаза, фосфатаза, уреазы) (табл. 18).

*Инвертаза* в условиях агроценозов (КМ АГРО) проявляет слабую активность в верхних горизонтах почв на практически всей исследуемой территории (99,6%). При отсутствии пахотного воздействия (КМ БИО) более половины моделируемого участка занимают почвы со средним уровнем активности фермента (51,9%). Небольшая часть территории занята почвами с высокими показателями активности инвертазы (8,1%). При совмещении моделей (рис. 30, ОКМ) отображается ситуация, которая отражает реальную картину: почвы со слабой и средней активностью занимают приблизительно равные территории (43,5% и 48,3% соответственно).

Почвы с низкой активностью инвертазы сосредоточены в северо-восточных районах, где преобладают пахотные угодья. А небольшие участки с высокой активностью, составляющие в сумме 8,2% площади расположены в основном на юго-западе, ближе к горам, на малоповреждённых почвах горных лугов и степей.

Отличия в поведении *фосфатазы* в условиях агро- и биогеоценозов ещё более существенны. В условиях агроценозов этот фермент проявляет слабую и среднюю активность (39,8% и 60,2% соответственно), почвы с высокой активностью отсутствуют. В условиях биогеоценозов, напротив площади почв с высокими показателями фосфатазной активности занимают 38,5%

картографируемой площади, а остальные (61,5%) характеризуются средними показателями (рис. 31). Низкой активности фосфатазы в изученных почвах при отсутствии пахотного воздействия не наблюдается.

Таблица 18 – Площадь, занимаемая исследуемыми почвами с различным уровнем ферментативной активности в естественных (КМ БИО), агрогенных условиях (КМ АГРО) и при их сочетании (ОКМ)

Градации активности почвенных ферментов	Площадь, тыс. га		
	КМ АГРО	КМ БИО	ОКМ
Гидролитические ферменты			
Активность инвертазы, мг глюкозы 1г/24 часа			
слабая	177,7	713,7	77,6
средняя	710	925,9	86,2
высокая	0	14,5	14,6
Активность фосфатазы, мг P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /100г/1 час			
слабая	71,0	0	23,2
средняя	107,4	109,7	93,5
высокая	0	68,7	61,8
Активность уреазы, мг NH <sub>3</sub> /10г/24 часа			
слабая	0,2	0	0
средняя	178,2	29,3	44,6
высокая	0	66,4	55,7
очень высокая	0	82,8	78,1
Окислительно-восстановительные ферменты			
Активность каталазы, мг O <sub>2</sub> /1г/1 мин			
слабая	4,8	0	1,3
средняя	173,6	178,4	178,1

В реальных условиях, отображённых на модели (рис. 31, ОКМ), присутствуют почвы, относящиеся ко всем трём группам активности.

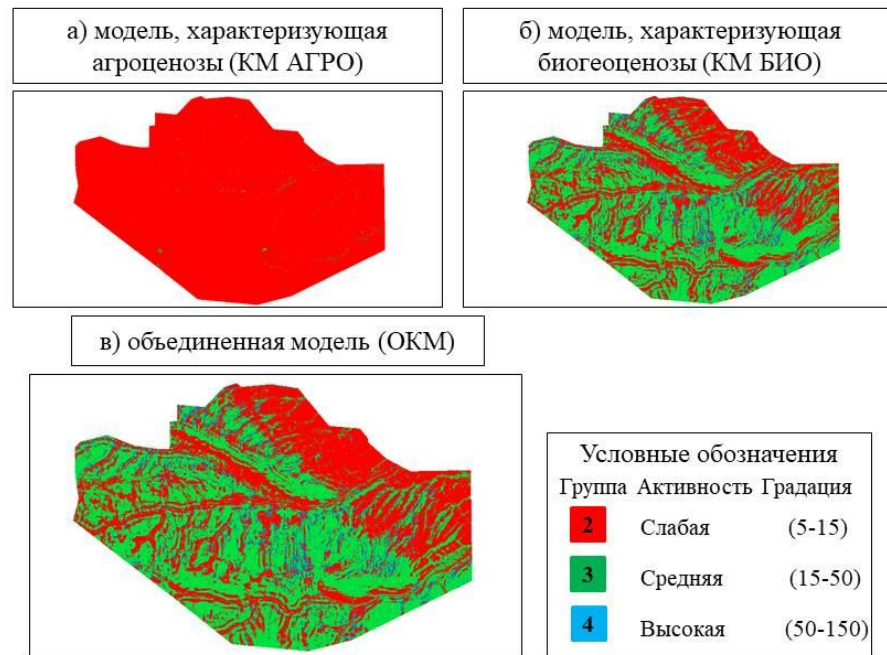


Рис. 30. Картографические модели, отражающие пространственное варьирование активности инвертазы (мг глюкозы 1г/24 часа) в верхних горизонтах почв исследуемых территорий.

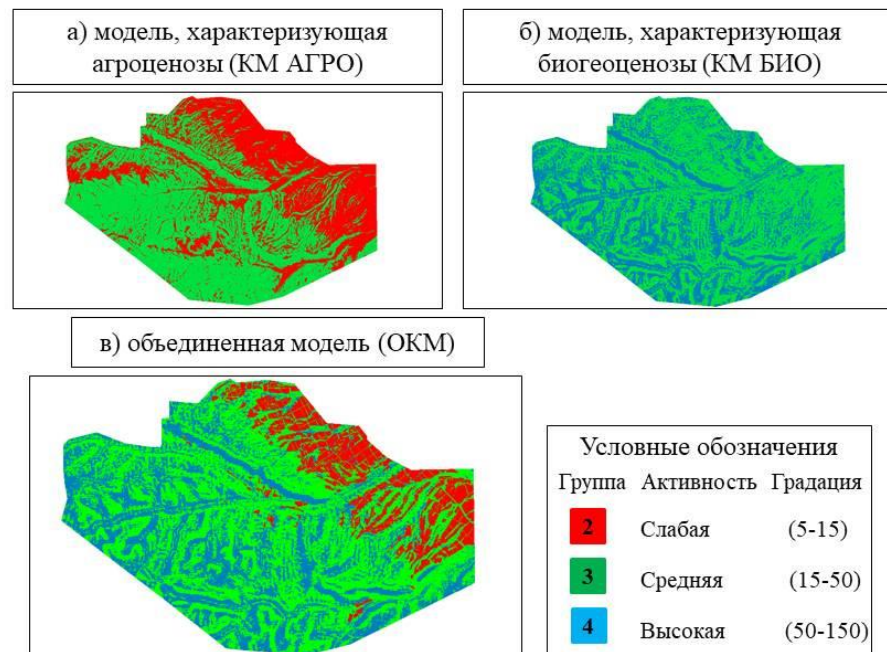


Рис. 31. Картографические модели, отражающие пространственное варьирование активности фосфатазы (мг  $P_2O_5$  /100г/1 час) в верхних горизонтах почв исследуемых территорий.

Почвы с низкими значениями показателя занимают 13% от общей территории и сосредоточены в обрабатываемых районах. Почвы с высокими показателями (34,6%) расположены ближе к горам, а также занимают участки на повышенных элементах рельефа. Остальная часть моделируемой территории – почвы со средней активностью фосфатазы (52,4% от площади общей территории).

Наибольшие изменения активности в ряду изученных ферментов проявляет *уреаза*, которая в условиях пахотного воздействия практически повсеместно (99,9% исследуемой площади) обладает средней активностью (рис. 32, КМ АГРО). На модели имеются небольшие вкрапления участков со слабой активностью, и отсутствуют почвы с более высокими показателями деятельности данного фермента.

Модель, отражающая активность уреазы в естественных условиях (рис. 32, КМ БИО) демонстрирует совершенно иную картину. Небольшую площадь в основном в восточной части модели занимают почвы со средними показателями (16,4%), а остальные изученные почвы в условиях биогеоценозов обладают высокой и очень высокой активностью уреазы.

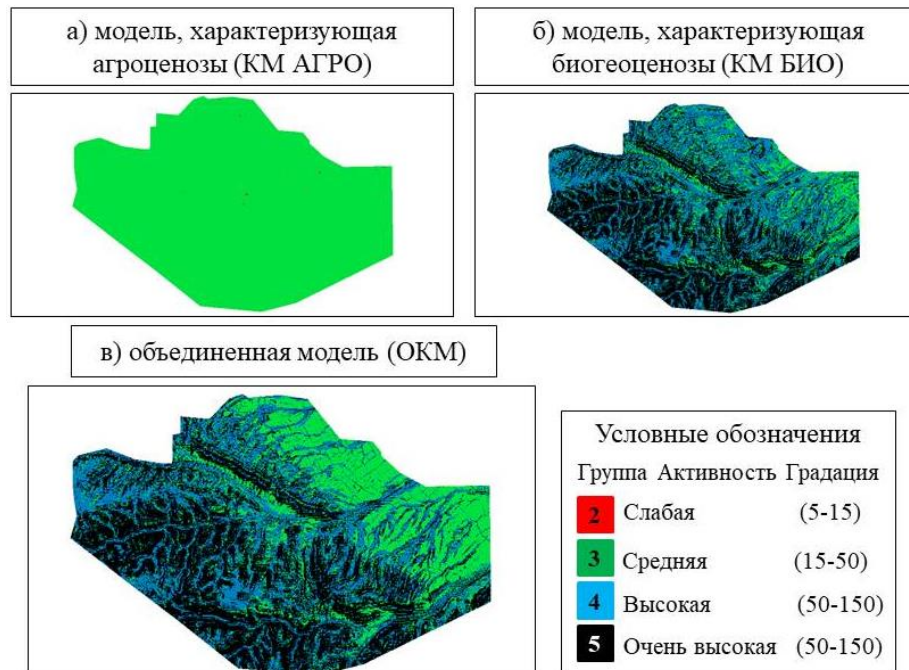


Рис. 32. Картографические модели, отражающие пространственное варьирование активности уреазы ( $\text{мг NH}_3 / 10\text{г}/24$  часа) в верхних горизонтах почв исследуемых территорий.

Объединённая модель (рис. 32, ОКМ) наглядно демонстрирует снижение активности уреазы в результате пахотного воздействия. Основная часть почв, обладающих средней активностью уреазы (25% моделируемой площади) расположена в районах пахотных угодий. Остальные почвы, функционирующие в естественных условиях, сохраняют высокую и очень высокую активность уреазы.

Как показали проведённые исследования, окислительно-восстановительные ферменты в меньшей степени реагируют на пахотное воздействие. Представитель этого класса *каталаза* в почвах исследуемых территорий проявляет в основном среднюю активность (рис. 33). В условиях агроценозов встречаются небольшие участки со слабой активностью фермента (2,7% от общей площади). В естественных условиях верхние горизонты всех изученных почв характеризуются средней активностью каталазы.

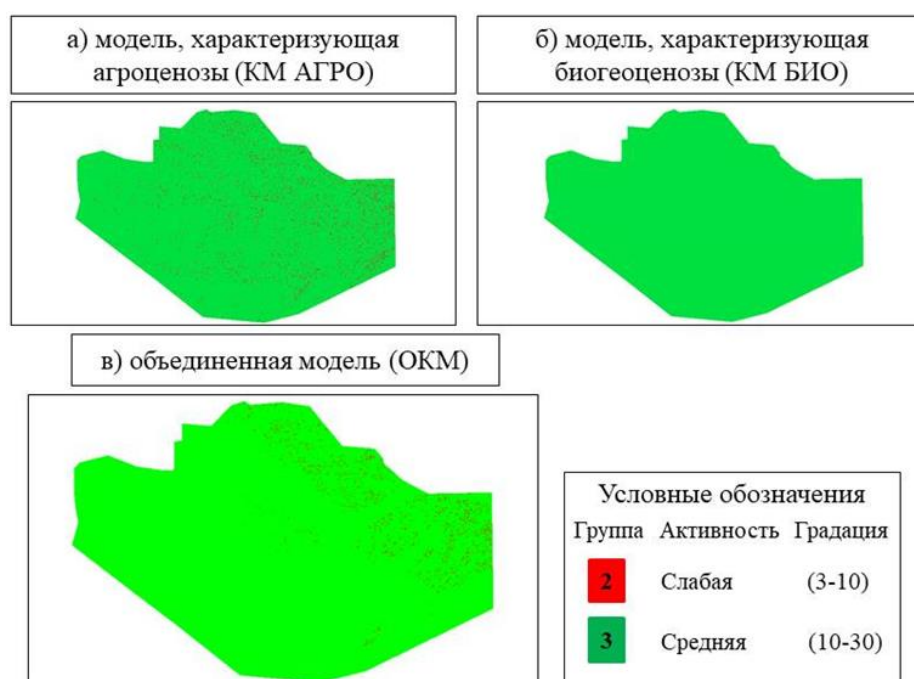


Рис. 33. Картографические модели, отражающие пространственное варьирование активности каталазы ( $\text{мг O}_2/\text{1г}/\text{1 мин}$ ) в верхних горизонтах почв исследуемых территорий.

При совмещении моделей (рис. 33, ОКМ) отражается реальная картина, которая иллюстрирует невысокую вариабельность активности каталазы в изученных почвах. Практически повсеместно данный показатель не выходит из группы средних значений (99,2% площади исследуемых территорий).

Представленные модели свидетельствуют, что показатели активности гидролитических ферментов (инвертаза, фосфатаза, уреазы) чутко реагирует на воздействие комплекса агрогенных факторов и могут быть эффективно при оценке изменения БА пахотных почв в условиях горных территорий.

### ***6.1.6 Общий уровень биологической активности***

Как показано выше (стр. 20-36) БА почв достаточно сложное и многогранное понятие, которое описывает интенсивность протекания микробиологических, биохимических и физиологических процессов и характеризует целый комплекс почвенных свойств (Звягинцев, 2005).

Антропогенные факторы оказывают существенное влияние на БА почв. Для точного количественного анализа изменений биологической активности требуется создание интегративного индекса, способного учитывать комплекс взаимодействующих факторов, формирующих данный параметр, и обеспечивающего надежное сравнение почв с различной степенью антропогенной трансформации и их естественных аналогов (Казеев, 1998; Вальков и др., 1999). Эффективность применения индекса потенциальной экологической биологической активности почв (ИПЭБСП, % отн.) в данной роли продемонстрирована в ряде исследований (Темботов и др., 2014; Горобцова и др., 2018). Данный показатель применён и при формировании одного из слоёв предлагаемой ИКМ (рис. 34).

Значения ИПЭБСП (% отн.) рассчитаны на основе семи описанных выше составляющих БА: запасы гумуса и Смк (при определении которых учитываются значения плотности сложения почв, что делает эти показатели более информативными, по сравнению содержанием Сорг и Смк), скорость БД, активность четырёх почвенных ферментов. Все используемые при расчётах ИПЭБСП (% отн.) данные учитывают характер землепользования, особенности структуры почвенного покрова и условия почвообразования (особенности растительного покрова, климатический фактор, рельеф местности).

Полученные значения ИПЭБСП (% отн.) объединили в группы, каждая из которых соответствует определённому уровню БА (низкий, средний, высокий, очень высокий) в соответствии с градацией, предложенной исследователями данной проблемы (Казеев, 1998). Как свидетельствуют представленные данные, в условиях агроценозов (КМ АГРО) все почвы исследуемых территорий обладали бы низким уровнем БА (табл. 19).

При гипотетическом отсутствии агрогенного воздействия картина была бы совершенно иной (КМ БИО). Пространственное распределение почв с различным уровнем БА представлено на рис. 34. 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.

Таблица 19 – 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

Дискриминантный анализ показал, что наибольший вклад в описываемую модель вносит группа климатических индексов, учитывающих количество осадков, температурный режим, сезонную амплитуду температур. Таким образом, в условиях естественных биогеоценозов БА почв может значительно колебаться, а

на её формирование в наибольшей степени влияет гидротермический режим почв, формируемый климатическими факторами.

Модель, характеризующая вариабельность значений ИПЭБСП в существующих 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. 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. 34 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 горными чернозёмами.

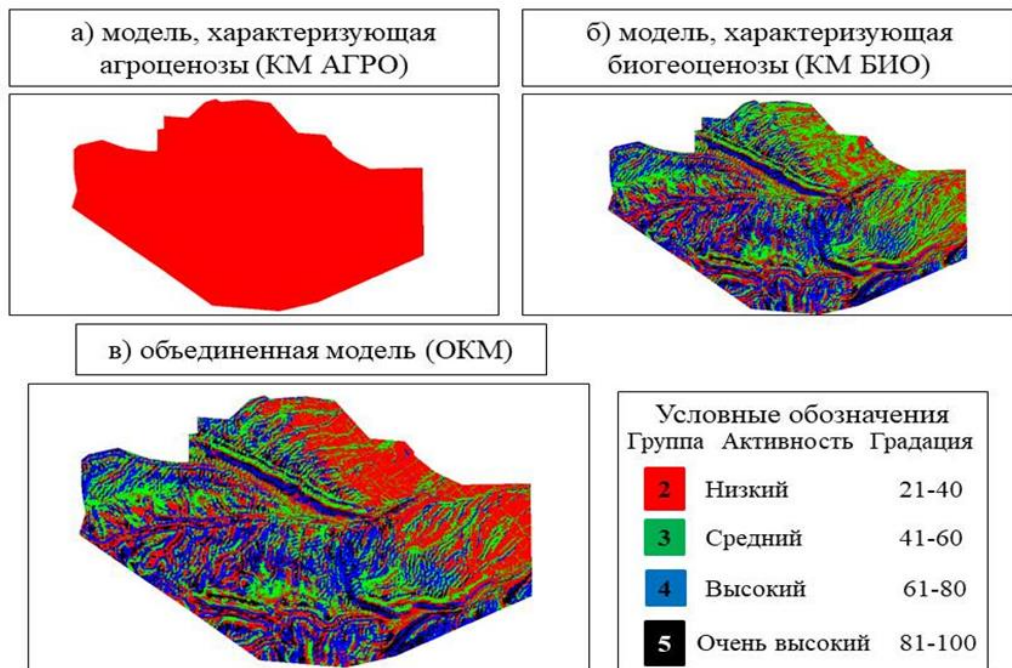


Рис. 34. Картографические модели, отражающие пространственное варьирование уровня биологической активности, в верхних горизонтах почв исследуемых территорий, выраженного через интегральный показатель эколого-биологического состояния почв (ИПЭБСП, % отн.).

На всех представленных моделях чётко выделяются максимально используемые под пашню территории, обладающие наименьшими значениями

как показателей БА, так и её общим уровнем. Участки, расположенные ближе к горам характеризуются более прохладными и влажными климатическими условиями, богатой разнотравно-луговой растительностью, распространением ГЛЧВ почв, высокая БА которых отмечена выше. Поэтому, на повышенных элементах рельефа и в условиях предгорий мы наблюдаем распространение почв с высоким и очень высоким уровнем БА.

## 6.2 Верификация картографических моделей

Верификация – проверка качества и адекватности полученной модели - является завершающим этапом проделанной работы, так как необходимо установить, насколько фактические данные, характеризующие свойства почвы, совпадают с предсказанными в созданной модели ([https://economic\\_mathematics.academic.ru/1004/Верификация\\_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 не включили в состав обучающей выборки, а использовали для проверки адекватности модели.

Верификация проведена с методикой, описанной на стр. 70, результаты представлены в табл. 20, совпадения фактических данных с предсказанными в моделях составляют 65-80%. Принято считать (Козлов, 2009), модель может рассматриваться как достоверная при достижении точности не менее 60%. Результаты, приведённые в таблице 20, свидетельствуют о достаточно высокой точности моделирования пространственного распределения всех исследованных показателей.

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.

Таблица 20 – 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, %
pH(H <sub>2</sub> 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

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 км<sup>2</sup>. 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.

### **6.3 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 (рис. 35).

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.

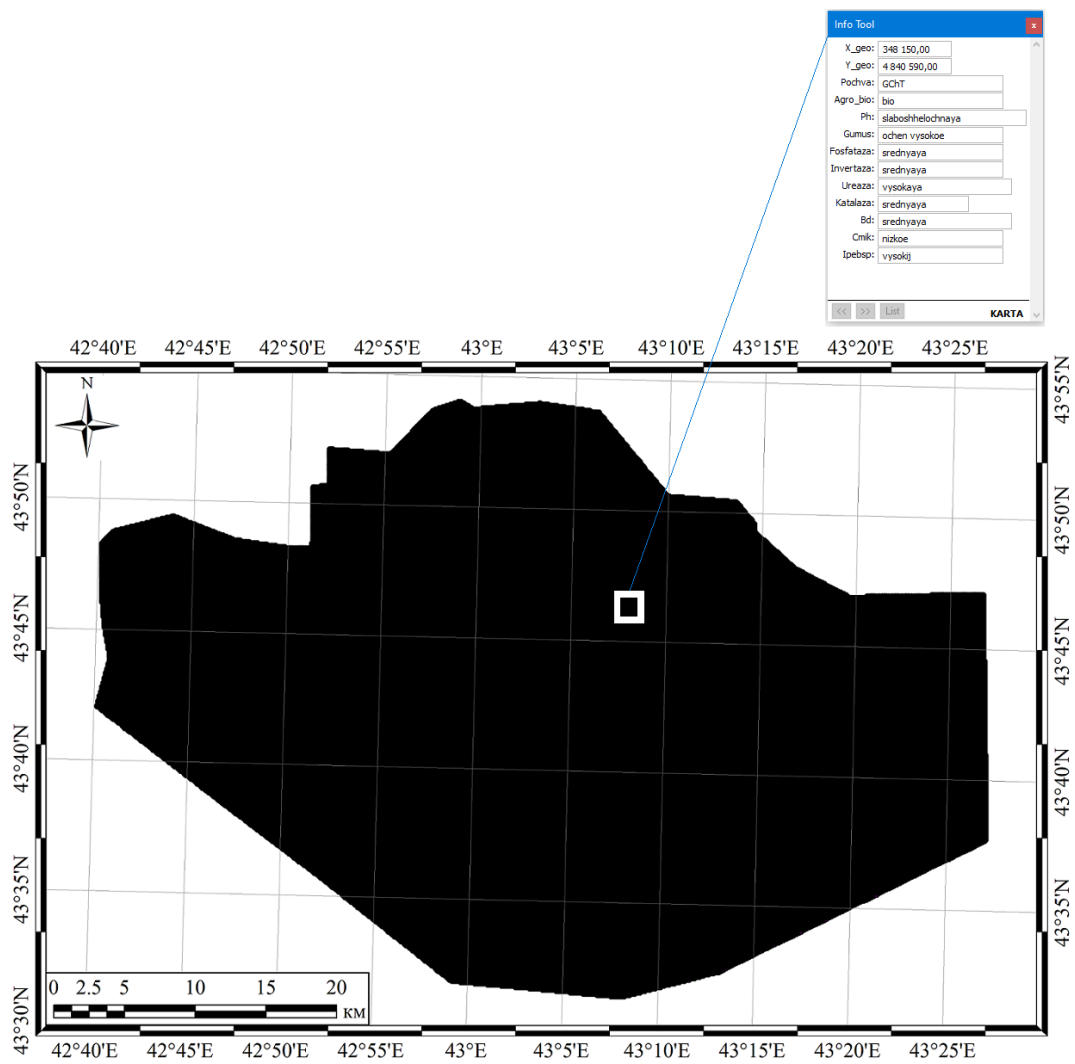


Рис. 35. Интерактивная картографическая модель, характеризующая классификационную принадлежность, наличие хозяйственного использования, пространственное варьирование 9 физико-химических и биологических показателей и общий уровень биологической активности почв предгорной части Центрального Кавказа (в границах 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 чернозёмов, 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 км<sup>2</sup> и обеспечивает пространственное разрешение на уровне пикселя размером 90 × 90 м, при этом точность воспроизведения значений оцениваемых показателей варьирует в пределах 65–85%.

#### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

**БА** – биологическая активность

**БД** – базальное дыхание

**ГИС** – геоинформационные системы

**ГЛЧВ** – горно-луговые чернозёмовидные почвы

**ГЧ** – горные чернозёмы

**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

**КУ** – коэффициент увлажнения

**ОКМ** – объединенная картографическая модель

**СИД**–субстрат-индуцированное дыхание

**C<sub>мик</sub>** – углеродмикробной биомассы

**ФА** – ферментативная активность

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абрамян, С.А. Изменение ферментативной активности почвы под влиянием естественных и антропогенных факторов / С.А. Абрамян // Почвоведение. – 1992. – № 7. – С. 70-82.
2. Абрамян, С.А. Природа регуляции ферментативных процессов в почве: автореф. дис. ... д-ра биол. Наук / Абрамян Синара Арамовна. – Москва, 1990. – 36 с.
3. Айвазян, С.А. Прикладная статистика: Классификации и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков [и др.] // – М.: Изд-во Финансы и статистика. 1989. – 607 с.
4. Акименко, Ю.В. Оценка экологического состояния основных почв Юга России в условиях загрязнения антибиотиками: Монография / Ю.В. Акименко, О.В. Чуvaraева, С.И. Колесников, К.Ш. Казеев, Т.В. Минникова. – Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – 114 с.
5. Алехин, В.Г. Биологическая активность и микробиологическая рекультивация почв, загрязненных нефтепродуктами / В.Г. Алехин, В.Т. Емцев, Е.А. Рогозина [и др.] // Биологические ресурсы и природопользование: Сборник науч. трудов. Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. пед. ин-та, 1998. – 95 с.
6. Ананко, Т.В. Почвы горных территорий в классификации почв России / Т.В. Ананко, М.И. Герасимова, Д.Е. Конюшков // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2018. – Вып. 92. – С. 122-146.
7. Ананьева, Н.Д. Методические аспекты определения скорости СИД почвенных микроорганизмов / Н.Д. Ананьева, Е.В. Благодатская, Д.Б. Орлинский // Почвоведение. – 1993. – № 11. – С. 72-77.
8. Ананьева, Н.Д. Микробные показатели городских почв и их роль в оценке экосистемных сервисов (обзор) / Н.Д. Ананьева, К.В. Иващенко, С.В. Сушко // Почвоведение. – 2021. – № 10. – С. 1231-1246.
9. Ананьева, Н.Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв / Н.Д. Ананьева. – М.: Наука, 2003. – 222 с.
10. Ананьева, Н.Д. Сравнительная оценка микробной биомассы почв, определяемой методами прямого микроскопирования и субстрат-индуцированного дыхания / Н.Д. Ананьева, Л.М. Полянская, Е.А. Сусьян, И.В. Васенкина, С. Вирт, Д.Г. Звягинцев // Микробиология. – 2008. – Т. 77. – № 3. – С. 404-412.
11. Ананьева, Н.Д. Углерод микробной биомассы и микробное продуцирование двуокиси углерода дерново-подзолистыми почвами постагрогенных биоценозов и коренных ельников южной тайги (Костромская область) / Н.Д. Ананьева, Е.А. Сусьян, И.М. Рыжова, Е.О. Бочарникова, Е.В. Стольников // Почвоведение. – 2009. – № 9. – С. 1108-1116.
12. Ананьева, Н.Д. Особенности определения углерода микробной биомассы почвы методом субстрат-индуцированного дыхания / Н.Д. Ананьева, Е.А. Сусьян, Е.Г. Гавриленко // Почвоведение. – 2011. – № 11. – С. 1327-1333.
13. Ананьева, Н.Д. Микробное дыхание почв подтайги и лесостепи европейской части России: полевой и лабораторные подходы / Н.Д. Ананьева, С.В. Сушко, К.В. Иващенко, В.И. Васенев // Почвоведение. – 2020. – № 10. – С. 1276-1286.

14. Антипов-Каратаев, И.Н. Почвы Крымского государственного лесного заповедника и прилегающих местностей / И.Н. Антипов-Каратаев, Л.И. Прасолов. – Л.: Изд-во АН СССР, 1932. – Т. 7. – 280 с.
15. Аринушкина, Е.В. Руководство по химическому анализу почв / Е.В. Аринушкина. – М., 1962. – 490 с.
16. Ашабоков, Б.А. Анализ и прогноз изменения климата в Кабардино-Балкарской Республике / Б. А. Ашабоков, Л. М. Федченко, Х. М. Калов, Р. М. Бисчоков, Е. М. Богаченко, – Нальчик: Изд-во КБГАУ. 2005. – 150 с.
17. Базилевич, Н.И. Географические аспекты изучения биологической продуктивности / Н.И. Базилевич, Л.Е. Родин, Н.Н. Розов // Мат-лы 5 съезда Географического общества СССР. – Л., 1970. – 28 с.
18. Балаян, Т.В. Биологическая активность дерновоподзолистой почвы и урожай сельскохозяйственных культур / Т.В. Балаян // Почвоведение. – 1993. – № 12. – С. 65-71.
19. Белкин, А.А. Влияние обработки почвы на агрофизические, агрохимические свойства почвы и урожайность зерновых культур / А.А. Белкин, Н.В. Беседин // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2010. – № 5(5). – С. 54-57.
20. Берлянд, А.М. Геоинформационное картографирование / А.М. Берлянд, – Москва. 1997. – 62 с.
21. Бирюкова, О.Н. Содержание органического углерода в верхних горизонтах почв / О. Н. Бирюкова, М. В. Бирюков // Национальный атлас почв Российской Федерации. – М.: Астрель-АСТ, 2011. – С. 230–231.
22. Благодатская, Е.В. Характеристика состояния микробного сообщества почвы по величине метаболического коэффициента / Е.В. Благодатская, Н.Д. Ананьева, Т.Н. Мякшина // Почвоведение. – 1995. – № 2. – С. 205-210.
23. Благодатская, Е.В. Количественная экстракция микробной ДНК из разных типов почв природных и агроценозов / Е.В. Благодатская, С.А. Благодатский, Т.-Х. Андерсон // Микробиология. – 2003. – Т. 72. – № 6. – С. 840-846.
24. Богатырев, Л.Г. По природным зонам СССР / Л.Г. Богатырев, А.С. Владыченский, Н.М. Чернов, – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 58 с.
25. Богословский, Н.А. Несколько слов о почвах Крыма / Н.А. Богословский // Изв. Геол. Комитета. – 1897. – Т. 16. – № 8-9. – С. 279-289.
26. Браун Лестер Р. Покончить с голодом: вызов брошен // Доклад Ин-та Worldwatch о развитии по пути к устойчивому обществу, - 2001.
27. Вадюнина А.Ф. Методы исследования физических свойств почв и грунтов / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина, – М.: Высшая школа, 1961. – 345 с.
28. Валова, Е.Э. Влияние тяжелых металлов на ферментативную активность почв / Е.Э. Валова, Ю.Б. Цыбенков, Э.В. Цыбикова // Ученые записки ЗабГГПУ. – 2012. – № 1 (42). – С. 63-67.
29. Вальков, В.Ф. Методология исследования биологической активности почв (на примере Северного Кавказа) / В.Ф. Вальков, К.Ш. Казеев, С.И. Колесников // Научная мысль Кавказа. – 1999. – №1. – С. 32-37.
30. Вальков, В.Ф. Почвы юга России: классификация и диагностика / В.Ф. Вальков, С.И. Колесников, К.Ш. Казеев, – Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ. – 2002. – 349 с.
31. Вальков, В.Ф. Почвенно-географические исследования на Северном Кавказе: к истории заблуждений / В.Ф. Вальков // Научная мысль Кавказа. – 2001. – № 1. – С. 57-61.

32. Владыченский, А.С. Особенности горного почвообразования / А.С. Владыченский, – М.: Наука, 1998, – 191 с.
33. Владыченский, А.С. Особенности гумусообразования и гумусного состояния горных почв / А.С. Владыченский, Б.Г. Розанов // Почвоведение. – 1986. – № 3. – С. 73-80.
34. Владыченский, А.С. Органическое вещество и биологическая активность постагрогенных почв южной тайги (на примере Костромской области) / А.С. Владыченский, В.М. Телеснина, К.А. Румянцева, Т.А. Чалая // Почвоведение. – 2013. – № 5. – С. 570-582.
35. Гавриленко, Е.Г. Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв южного Подмосковья / Е.Г. Гавриленко, Е.А. Сусьян, Н.Д. Ананьева, О.А. Макаров // Почвоведение. – 2011. – № 10. – С. 1231-1245.
36. Галстян, А.Ш. Ферментативная активность почв Армении / А.Ш. Галстян, – Ереван: Изд-во Айастан, 1974. – 275 с.
37. Гапонюк, Э.И. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв / Э.И. Гапонюк, С.В. Малахов // Тр. Всесоюз. совещ. Обнинск, июнь 1983. Л.: Гидрометеиздат, – 1985. – С. 3-10.
38. Гедгафова, Ф.В. Биологическая активность горных чернозёмов и горно-луговых чернозёмовидных почв естественных биогеоценозов эльбрусского варианта поясности в пределах Кабардино-Балкарии / Ф.В. Гедгафова, О.Н. Горобцова, Т.С. Улигова, Р.Х. Темботов, Е.М. Хакунова // Матер. VII Всерос. конф. «Горные экосистемы и их компоненты». – Махачкала: ИП Овчинников, 2019. – С. 24-26.
39. Гедгафова, Ф.В. Биологическая активность чернозёмных почв Центрального Кавказа (в пределах терского варианта поясности Кабардино-Балкарии) / Ф.В. Гедгафова, Т.С. Улигова, О.Н. Горобцова, Р.Х. Темботов // Почвоведение. – 2015. – № 12. – С. 1474-1482.
40. Гиляров М.С. Особенности почвы как среды обитания и её значение в эволюции насекомых / М.С. Гиляров, – М. – Л.: издательство АН СССР, 1949. – 268с.
41. Глинка, К.Д. Деградация и подзолистый процесс / К.Д. Глинка // Почвоведение. – 1924. – № 3-4.
42. Горбов, С.Н. Биологическая активность почв городских территорий (на примере г. Ростова-на-Дону) / С.Н. Горбов, О.С. Безуглова // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 85. – С. 1-15.
43. Горобцова, О.Н. Биологическая активность черноземов выщелоченных Центрального и Северо-Западного Кавказа (в пределах Кабардино-Балкарии и Адыгеи) / О.Н. Горобцова, Т.С. Улигова, Ф.В. Гедгафова, Р.Х. Темботов, Е.М. Хакунова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. - №4 (2). С. 327-332.
44. Горобцова, О.Н. Влияние условий почвообразования на микробные показатели горных черноземов и горно-луговых черноземовидных почв Центрального Кавказа / О.Н. Горобцова, Ф.В. Гедгафова, Р.Х. Темботов, Е.М. Хакунова, А.Т. Цурова, З.Л. Баккуева // Матер. III Междунар. науч. конф. и II Междунар. науч. школы для молодых ученых «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки». - Ростов-на-Дону, 2023. – С. 249-253.
45. Горобцова, О.Н. 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.

46. Горобцова, О.Н. Экофизиологические индикаторы состояния микробной биомассы чернозёмов Центрального Кавказа (в пределах терского варианта поясности Кабардино-Балкарии) / О.Н. Горобцова, Ф.В. Гедгафова, Т.С. Улигова, Р.Х. Темботов // Экология. – 2016. – № 1. – С. 22-29.
47. Горобцова, О.Н. Биологическая активность горных и равнинных чернозёмов Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии) / О.Н. Горобцова, Т.М. Минкина, Т.С. Улигова, Р.Х. Темботов, Е.М. Хакунова // Поволжский экологический журнал. – 2018. – № 2. – С. 183-196.
48. Горобцова, О.Н. Биологическая активность почв в поясе широколиственных лесов Центрального Кавказа / О.Н. Горобцова, Т.С. Улигова, Ф.В. Гедгафова, Р.Х. Темботов, Е.М. Хакунова // Лесоведение. – 2021. – № 1. – С. 78-92.
49. Горобцова, О.Н. Определение общего уровня биологической активности естественных и пахотных горных чернозёмов Кабардино-Балкарии сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность / О.Н. Горобцова, Е.М. Хакунова, Т.С. Улигова // Матер. IV Междунар. научно-практич. конф., посвященной памяти Заслуженному деятелю науки РФ, КБР, Республики Адыгея профессору Б.Х. Фиашеву 22 марта 2018 г. – Нальчик, 2018. – С. 218-221.
50. Горобцова, О.Н. Оценка уровня биологической активности агрогенных и естественных чернозёмов Кабардино-Балкарии / О.Н. Горобцова, Т.С. Улигова, Р.Х. Темботов, Е.М. Хакунова // Почвоведение. – 2017. – № 5. – С. 614-623.
51. Горобцова, О.Н. Биохимические свойства основных типов гидроморфных почв степной зоны Центрального Кавказа (в пределах Кабардино-Балкарии), сформированных в условиях различных вариантов поясности / О.Н. Горобцова, Ф.В. Жежева, Т.С. Улигова, Р.Х. Темботов // Известия КБНЦ РАН. – 2012. – №6-1 (50). – С. 69-76.
52. Гришина, Л.А. Система показателей гумусового состояния почв. Проблемы почвоведения / Л.А. Гришина, Д.С. Орлов, – М.: Наука. – 1978. – С. 42-47.
53. Даденко, Е.В. Методические аспекты применения ферментативной активности в диагностике и мониторинге почв / Е.В. Даденко // Биология почв Юга России. Ростов н/Д: Изд-во ЦВВР, 2004. – С. 65-71.
54. Даденко, Е.В. Применение показателей ферментативной активности при оценке состояния почв под сельскохозяйственными угодьями / Е.В. Даденко, М.А. Прудникова, К.Ш. Казеев // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15, – № 3 (4), – С. 1274-1277.
55. Девятова, Т.А. Биоэкологические принципы мониторинга и диагностики загрязнения почв / Т.А. Девятова // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2005. – № 1. – С. 105-106.
56. Добровольский, Г.В. Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере / Г.В. Добровольский, И.П. Бабьева, Л.Г. Богатырев, - Москва: Наука. – 2003. – 364 с.
57. Добровольский, Г.В. Экологические функции почвы / Г.В. Добровольский, Е.Д. Никитин, – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 136 с.
58. Добровольский, В.В. Основы биогеохимии / В.В. Добровольский, – Москва: Академия. 2003. – 395с.
59. Добровольский, Г.В. Структурно-функциональная роль почвы в биосфере / Г.В. Добровольский, – М.: ГЕОС, 1999. – 277 с.
60. Дробник, Я. Изучение биологических превращений органических веществ в почве / Я. Дробник // Почвоведение. – 1957. – № 12. – С. 46-52.

61. Дубовенко, Е.К. Изучение активности некоторых ферментов в прикорневой почве сельскохозяйственных растений / Е.К. Дубовенко, Э.И. Уласевич // Сборник докладов симпозиума по ферментам почвы 27-30 июня 1967 года. Минск: Наука и техника. – 1968. – С. 320-327.
62. Желтухин, А.С. Оценка качества местообитаний животных на основе учетов следовой активности и дистанционной информации / А.С. Желтухин, Ю.Г. Пузаченко, Р.Б. Сандлерский // Сибирский экологический журнал. – 2009. – Т. 16. – № 3. – С. 341-351.
63. Жоголев, А.В. Актуализация региональных почвенных карт на основе спутниковых и геоинформационных технологий (на примере Московской области): дис. ... канд. с.-х. н.: 03.02.13 / Жоголев Арсений Вадимович. – Москва, 2016. – 188 с.
64. Жуланова, В. Н. Агроэкологическая оценка почв Тувы: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. / Жуланова Валентина Николаевна. – Москва, 2013. – 46 с.
65. Заварзин, Г.А. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России / Г.А. Заварзин, В.Н. Кудеяров // Вестник Российской академии наук. – 2006. – Т. 76. – №1. – С. 14–29.
66. Захаров, С.А. К составлению сводной почвенной карты Юго-Востока / С.А. Захаров // Юго-Восток. – 1923. – №5, 6.
67. Захаров, С.А. К характеристике горно-луговых чернозёмовидных почв высокогорий / С.А. Захаров // Изв. Константиновского межевого ин-та. М., 1914. Вып. 6. – 368 с.
68. Захаров, С.А. О некоторых спорных вопросах горного почвоведения / С.А. Захаров // Почвоведение. – 1948. – №6. – С. 347-356.
69. Захаров, С.А. Почвы горных районов СССР / С.А. Захаров // Почвоведение. – 1937. – №6. – С. 810-848.
70. Звягинцев, Д.Г. Биология почв / Д.Г. Звягинцев, И.П. Бабьева, Г.М. Зенова. – М.: МГУ, 2005. – 448 с.
71. Звягинцев, Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых её показателей / Д.Г. Звягинцев // Почвоведение. – 1978. – №6. – С. 48-54.
72. Звягинцев, Д.Г. Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями / Д.Г. Звягинцев, – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 176 с.
73. Звягинцев, Д.Г. Роль микроорганизмов в биогеоценотических функциях почв / Д.Г. Звягинцев, Т.Г. Добровольская, И.П. Бабьева, Г.М. Зенова, Л.В. Лысак, О.Е. Марфенина // Почвоведение. – 1992. – №6. – С. 63-77.
74. Звягинцев, Д.Г. Экологические проблемы в почвенной микробиологии / Д.Г. Звягинцев, П.А. Кожевин, В.В. Малахов // Общая микробиология. – 1976. – Т. 37. – №5. – С. 691-706.
75. Звягинцев, Д. Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Д.Г. Звягинцев, – М.: Изд-во МГУ, 1980. – 224 с.
71. Звягинцев, Д.Г. Микроорганизмы и охрана почв / Д.Г. Звягинцев, – М. Изд-во МГУ, 1989. – 204 с.
76. Зонн, С.В. Почвы Дагестана / С.В. Зонн // Сельское хоз. Дагестана, – М.: Изд-во АН СССР, 1940. – С. 97-156.
77. Иващенко, К.В. Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) / К.В. Иващенко, Н.Д. Ананьева, В.И. Васенев, В.Н. Кудеяров, Р. Валентини // Биомасса и дыхательная активность почвенных

микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область). Почвоведение. – 2014. – № 9. – С. 1077-1088.

78. Иващенко, К.В. Обилие и дыхательная активность микробного сообщества почвы при антропогенном преобразовании наземных экосистем: дис. ... канд-та. биол. наук: 03.02.03 / Иващенко Кристина Викторовна. – Пушино, 2017. – 205 с.

79. Казеев, К.Ш. Биологическая диагностика почв. Биохимические методы / К.Ш. Казеев, С.И. Колесников, – Ростов-на-Дону, 1998. – 23 с.

80. Казеев, К.Ш. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований / К.Ш. Казеев, С.И. Колесников, В.Ф. Вальков, – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 2003. – 204 с.

81. Казеев, К.Ш. Биология почв юга России / К.Ш. Казеев, С.И. Колесников, В.Ф. Вальков, – Ростов-на-Дону: Изд-во ЦВВР, 2004. – 350 с.

82. Казеев, К.Ш. Экологическая оценка применения технологии No-Till в Ростовской области: монография / К.Ш. Казеев, Г.В. Мокриков, Ю.В. Акименко, М.А. Мясникова, С.И. Колесников, – Южный федеральный университет; отв. ред. К. Ш. Казеев. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018 – 332 с.

83. Карпачевский, Л.О. Новые подходы к оценке роли почв в биосфере / Л.О. Карпачевский // Почвоведение. – 1987. – № 1. – С. 135-137.

84. Каштанов, А.Н. Эрозия почв России / А.Н. Каштанов, Л.Л. Шишов, В.А. Рожков, – М.: Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 2004. – 76 с.

85. Кендалл, М. Дж. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М. Дж. Кендалл, А. Стьюарт / Гл. ред. физ.-мат. лит., Пер. с англ. М.: Наука, 1976. – 736 с.

86. Кереев, К.Н. Почвы степной зоны КБ АССР / К.Н. Кереев, Б.Х. Фиашев, – Нальчик, 1966. – 100 с.

87. Кереев, К.Н. Природные зоны и пояса Кабардино-Балкарской АССР / К.Н. Кереев, Б.Х. Фиашев, – Нальчик, 1977. – 71 с.

88. Кириллова, Н.П. Метод “совпадений” и его применение для построения цифровой крупномасштабной почвенной карты / Н.П. Кириллова, Т.М. Силева, Т.Ю. Ульянова, И.Ю. Савин // Почвоведение. – 2014. – №10. – С. 1193–1203.

89. Кислицына, А.П. Гумусное состояние почв кормовых севооборотов / А.П. Кислицына, А.Г. Иванова // Актуальные проблемы регионального экологического мониторинга: научный и образовательный аспекты: материалы Всероссийской научной школы. – Киров, 2006 – С.183–184.

90. Кисриев, Ф.Г. Почвенно-климатическое районирование территории Дагестанской АССР / Ф.Г. Кисриев, С.У. Керимханов // Тр. ДНИИСХ. Махачкала: Даг. Кн. Изд-во, 1967. Т. IV. – С. 9-28.

91. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос. 1977. – 280 с.

92. Ковалев, Р.Ф. Почвы Горно-Алтайской автономной области / Р.Ф. Ковалев, – Новосибирск: Наука, 1973. – 348 с.

93. Ковриго, В.П. Почвоведение с основами геологии / В.П. Ковриго, И.С. Кауричев, Л.М. Бурлакова, – М.: Колос, 2000. – 416 с.

94. Когут, Б.М. Влияние длительного использования черноземов на органическое вещество его фракций / Б.М. Когут, Н.П. Масютенко, О.В. Киселева, Э. Шульц // Земледелие. – 2007. – №2. – С. 11–12.

95. Кожевин, П.А. Динамика развития различных микроорганизмов в почве / П.А. Кожевин, Л.М. Полянская, Д. Г. Звягинцев // Микробиология. – 1979. – Т. 48. – С. 490-494.
96. Козлов, Д.Н. Инвентаризация ландшафтного покрова методами пространственного анализа для целей ландшафтного планирования / Д.Н. Козлов // Тр. Междунар. шк.-конф. «Ландшафтное планирование. Общие основания. Методология. Технология». М.: Геогр. фак. МГУ, 2006. – С. 117-137.
97. Козлов, Д.Н. Цифровой ландшафтный анализ при крупномасштабном картографировании структур почвенного покрова: автореф. дис. ... канд. геогр. н. / Козлов Даниил Николаевич. – М., 2009. – 26 с.
98. Колесников, С.И. Экологическое состояние и функции почв в условиях химического загрязнения / С.И. Колесников, К.Ш. Казеев, В.Ф. Вальков, – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростиздат. 2006. – 385 с.
99. Колесников, С.И. Экологические функции почв и влияние на них загрязнения тяжелыми металлами / С.И. Колесников, К.Ш. Казеев, В.Ф. Вальков // Почвоведение. – 2002. – №12. – С. 1509-1514.
100. Колесников, С.И. Оценка устойчивости почв Юга России к загрязнению мазутом по биологическим показателям (в условиях модельного эксперимента) / С.И. Колесников, В.Г. Гайворонский, Е.Н. Ротина, К.Ш. Казеев, В.Ф. Вальков // Почвоведение. – 2010. – №8. – С. 995-1000.
101. Колесников, С.И. Изменение биологических свойств почв Адыгеи при химическом загрязнении / С.И. Колесников, З.Р. Тлехас, К.Ш. Казеев, В.Ф. Вальков // Почвоведение. – 2009. – №12. – С. 1499-1505.
102. Колесников, С.И. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на биологические свойства горных чернозёмов Юга России / С.И. Колесников, М.В. Ярославцев, Н.А. Спивакова, К.Ш. Казеев, Т.В. Денисова, Е.В. Даденко // Юг России: экология, развитие. 2012. №12. – С. 103-109.
103. Корзников, К.А. Моделирование лесного покрова бассейна реки Венгери на острове Сахалин с применением данных дистанционного зондирования / К.А. Корзников, Н.Г. Беляева, Р.Б. Сандлерский // Лесоведение. – 2020. №5. – С. 399–411.
104. Котелев, В.В. Роль микроорганизмов в разложении органических фосфатов и передвижения фосфора в почве: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. / Котелев Вадим Витальевич. М., 1964. – 27 с.
105. Кравцова, В.И. Космические методы исследования почв / В.И. Кравцова, – М., 2005. – 190 с.
106. Красильников, Н.А. Адсорбция фосфатаз почвенными микроорганизмами / Н.А. Красильников, В.В. Котелев // Микробиология. – 1959. – Т. 4. – С. 117-121.
107. Красильников, Н. А. Качественное определение фосфатазной активности некоторых групп почвенных микроорганизмов / Н.А. Красильников, В.В. Котелев // Док. АН СССР. – 1957. – Т. 117. – №5. – С. 894-895.
108. Кренке, А.Н. Построение карты ландшафтного покрова на основе дистанционной информации / А.Н. Кренке, Ю.Г. Пузаченко // Экологическое планирование и управление. – 2008. – №2. – С. 10-25.
109. Кудеяров, В.Н. Глобальные изменения климата и почвенный покров / В.Н. Кудеяров, В.А. Демкин, Д.А. Гиличинский, С.В. Горячкин, В.А. Рожков // Почвоведение. – 2009. – №9. – С. 1027-1042.

110. Кулик, К.Н. К вопросу о состоянии защитного лесоразведения в Волгоградской области / К.Н. Кулик, А.С. Манаенков, А.Н. Салугин, А.Н. Кузенко // Известия НВ АУК. – 2020. – 1(57). – С. 23-33.
111. Куликова, А.Х. Экологические функции почвы / А.Х. Куликова // Вестник ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2007. - № 1(4). – С. 3-7.
112. Кумахов, В.И. Почвы Центрального Кавказа / В.И. Кумахов, – Нальчик, 2007. – 125 с.
113. Купревич, В.Ф. Биологическая активность и методы ее определения / В.Ф. Купревич, – Минск, 1974. – 193 с.
114. Купревич, В.Ф. Биологическая активность почвы и методы ее определения / В.Ф. Купревич // Докл. АН СССР. – 1951. – Т. 79. – №5. – С. 863-866.
115. Ландина, М.М. Физические свойства и биологическая активность почв / М.М. Ландина, – Новосибирск: Наука, 1986. – 143 с.
116. Лариков, А.А. Влияние растений на ферментативную активность почв Юга России: дис. ... канд. биол. Наук / Лариков Александр Александрович. – Ростов н/Д, 2010. – 154 с.
117. Ливеровский, Ю.А. К генезису горно-луговых почв / Ю.А. Ливеровский // Почвоведение. – 1945. – №2. – С. 44-58.
118. Ливеровский, Ю.А. Почвы СССР. Географическая характеристика / Ю.А. Ливеровский, –М.: Мысль, 1974. – 462 с.
119. Маслюгин, К.И. Почвы Кабардинской АССР / К.И. Маслюгин, С.Н. Дубошина, – Нальчик: Кабардин. кн. изд-во, 1952. – 144 с.
120. Мирчинк, Т.Г. Современные подходы к оценке биомассы и продуктивности грибов и бактерий в почве / Т.Г. Мирчинк, Н.С. Паников // Успехи микробиологии. – 1985. – №20. – С. 198-226.
121. Михайловская, О.Н. К вопросу о генезисе высокогорных почв / О.Н. Михайловская // Тр. Почв.ин-та им. В.В. Докучаева. – 1936. – Т. 13. – С. 315-366.
122. Моисеева, В.К. Микробиологические и биохимические процессы превращения азота в дерново-подзолистых почвах: автореф. дис. ... канд. биол. Наук / Моисеева Валентина Константиновна. – Таллин, 1975. – 19 с.
123. Молчанов, Э.Н. Горно-луговые почвы высокогорий Западного Кавказа / Э.Н. Молчанов // Почвоведение. – 2010. – №12. – С. 1433–1448.
124. Молчанов, Э.Н. Горные почвы Кабардино-Балкарии и перспективы их использования. Кн.: Географические проблемы изучения и освоения природных ресурсов Ниж. Дона и Сев. Кавказа / Э. Н. Молчанов, – Ростов-на-Дону, 1971. – С. 147-149.
125. Молчанов, Э.Н. К вопросу генезиса основных типов высокогорных почв // Lucrarile conferiteiint ernationale stiintifico-practice Solul-una din problemele principale ale secolului XXI / Э.Н. Молчанов., Moldova. Chisinau. 7 august 2003. Pontos-Chisinau, 2003. – С. 148-149.
126. Молчанов, Э.Н. Почвенная карта Кабардино-Балкарской АССР, м-б 1:100000 / Э.Н. Молчанов, В.Д. Калмаков, А.К. Романова [и др.], – М., ГУГК, 1990.
127. Молчанов, Э.Н. К проблеме почвенно-географического районирования гор Северного Кавказа / Э.Н. Молчанов // Почвоведение. – 1991. – №1. – С. 5-18.
128. Молчанов, Э.Н. К характеристике структуры почвенного покрова высокогорий Кабардино-Балкарской АССР. Кн.: Почвенные комбинации и их генезис / Э.Н. Молчанов, – «Наука». М., 1972. – С. 80-85.

129. Молчанов, Э.Н. Почвенные структуры гор Кабардино-Балкарии и их охрана. Кн.: Актуальные проблемы экологии и охраны окружающей среды Кабардино-Балкарской АССР / Э.Н. Молчанов, – Нальчик, 1989. – С. 24-31.
130. Молчанов, Э.Н. Деградация горных чернозёмов северного склона Джинальского хребта (Центральный Кавказ) и ее эколого-экономические последствия / Э.Н. Молчанов, И.Ю. Савин, В.В. Разумов, О.А. Макаров, Е.В. Цветнов, Р.Я. Ермияев, Е.А. Шишконокова, С.М. Харзинов // Бюл. Почв.ин-та им. В.В. Докучаева. – 2017. – Вып. 87. – С. 86-99.
131. Молчанов, Э.Н. Система организации почвенного покрова гор Северного Кавказа и классификация его структур. Кн.: Высокогорные экосистемы под воздействием человека. Тр. Высокогорного геофизического института. Выпуск 71 / Э.Н. Молчанов, – М., Гидрометеиздат, 1988. – С. 78-79.
132. Молчанов, Э.Н. Сравнительная характеристика основных типов почв высокогорий Северного Кавказа (на примере Кабардино-Балкарской и Дагестанской АССР): автореф. диссерт. на соискание учен. степ. канд. геогр. наук / Молчанов Эрик Николаевич. – М., 1973. – 236 с.
133. Молчанов, Э.Н. Структура почвенного покрова Центрального Кавказа. Кн.: Высокогорные экосистемы под воздействием человека. Тр. Высокогорного геофизического института / Э.Н. Молчанов // Выпуск 75. М., Гидрометеиздат, 1989. – С. 97-106.
134. Молчанов, Э.Н. Формирование горно-луговых чернозёмовидных почв высокогорий / Э. Н. Молчанов // Почвоведение. – 2008. – №12. – С. 1438-1452.
135. Неуструев, С.С. Чимкентский уезд Сыр-Дарьинской области / С.С. Неуструев // Предв. отчет об орг. и исполн. работ по иссл. почв Азиатской России в 1908 году. Спб, 1908. – С. 60-68.
136. Никитин, Д.А. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) / Д.А. Никитин, М.В. Семенов, Т.И. Чернов, Н.А. Ксенофонтова, А.Д. Железова, Е.А. Иванова, Н.Б. Хитров, А.Л. Степанов // Почвоведение. – 2022. – №2. – С. 228-243.
137. Никулина, А.Р. Определение биологической активности почв в целях поддержания равновесия урбозкосистемы / А.Р. Никулина, Е.Д. Сачкова, Л.В. Бубнова // Известия Байкальского государственного университета. – 2020. – №4(30). – С. 586-592.
138. Орлов, Д.С. Химическое загрязнение почв и их охрана / Д.С. Орлов, М.С. Малинина, Г.В. Мотузова, Л.К. Садовникова, Т.А. Соколова, – М.: Агропромиздат, 1991, – 303 с.
139. Орлов, Д.С. Гумусовые кислоты почв / Д.С. Орлов, – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 332 с.
140. Панков, А.М. Почвы Большой Кабарды / А.М. Панков, – Воронеж. 1926. – 160 с.
141. Полянская, Л.М. Содержание и структура микробной биомассы как показатель экологического состояния почв / Л.М. Полянская, Д.Г. Звягинцев // Почвоведение. – 2005. – №6. – С. 706-714.
142. Почвы Кабардино-Балкарской АССР и рекомендации по их использованию. Нальчик: Государственный проектный институт по землеустройству СевКавНИИгипрозем, 1984. – 201 с.
143. Прасолов, Л.И. О почвах долин юго-западной части Центрального Тянь-Шаня / Л.И. Прасолов // Тр. почв.-ботан. экспедиций по иссл. колонизац. районов Азиатской России. Почвенные иссл. Ч. 1. 1908. Вып. 5. 1909. – 97 с.

144. Пузаченко, Ю.Г. Анализ пространственно-временной динамики экологической ниши на примере популяции лесной куницы (*Martes martes*) / Ю.Г. Пузаченко, А.С. Желтухин, Р.Б. Сандлерский // Журнал общей биологии. – 2010. – Т. 71. №6. – С. 467-487.
145. Пузаченко, Ю.Г. Оценка запасов органического вещества в почвах мира: методика и результаты / Ю.Г. Пузаченко, Д.Н. Козлов, Е.В. Сиунова, А.Г. Санковский // Почвоведение. – 2006. – №12. – С. 1427–1440.
146. Пузаченко, Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях / Ю.Г. Пузаченко, – М.: Изд-во АСАДЕМА, 2004. – 416 с.
147. Пузаченко, М.Ю. Мультифункциональный ландшафтный анализ Юго-Запада Валдайской возвышенности: автореф. дис. ... канд географ. наук / Пузаченко Михаил Юрьевич. – Москва, 2009. – 278 с.
148. Пузаченко, Ю.Г. Спектральный анализ иерархической организации рельефа / Ю.Г. Пузаченко, И.А. Онуфреня, Г.М. Алещенко // Изв. РАН. Сер. Географическая. – 2002. – №4. – С. 29-38.
149. Пузаченко, М.Ю. Картографирование мощности органогенного и гумусового горизонтов лесных почв и болот южнотаежного ландшафта (юго-запад Валдайской возвышенности) на основе трехмерной модели рельефа и дистанционной информации (Landsat-7) / М.Ю. Пузаченко, Ю.Г. Пузаченко, Д.Н. Козлов, М.В. Федяева // Исследование Земли из космоса. – 2006. – №4. – С. 70-78.
150. Пхитиков, А.Б. Экология, охрана и рациональное использование ресурсов копытных на Центральном Кавказе: в пределах Кабардино-Балкарской Республики: дис. ... канд-та. биол. наук: 03.02.08 / Пхитиков Алим Бесланович. – Тольятти, 2011. – 210 с.
151. Разумов, В.В. Экосистемы гор Центрального Кавказа и здоровье человека / В.В. Разумов, Х.А. Курданов, Л.А. Разумова, А.Г. Крохмаль, Л.М. Батырбекова, – М.; Ставрополь: Илекса, Ставропольсервисшкола, 2003. – 448 с.
152. Рожков, В.А. Новые информационные технологии в почвоведении: прогресс и заблуждения / В.А. Рожков // Вестник с.х.науки, – 1991. – №12. – С. 31-38.
153. Ромашкевич, А.И. Горное почвообразование и геоморфологические процессы / А.И. Ромашкевич, – М.: Колос, 1988. – 150 с.
154. Савин, И.Ю. Анализ почвенных ресурсов на основе геоинформационных технологий: дис. ... д-ра с.-х. наук: 03.00.27 / Савин Игорь Юрьевич. – Москва, 2004. – 382 с.
155. Савин, И.Ю. Перспективы развития картографирования и мониторинга почв на основе интерполяции точечных данных и дистанционных методов / И.Ю. Савин // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2022. – №2. – С. 13-19.
156. Савин, И.Ю. Перспективы развития картографии почв в России / И.Ю. Савин, М.С. Симакова, С.В. Овечкин // Почвенные и земельные ресурсы: состояние, оценка, использование. – 2015. – С. 274–279.
157. Савин, И.Ю. Современные тренды и проблемы почвенной картографии / И. Ю. Савин, А. В. Жоголев, Е. Ю. Прудникова // Почвоведение. – 2019. – №5. – С. 517-528.
158. Сандлерский, Р.Б. Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации / Р.Б. Сандлерский, Ю.Г. Пузаченко // Журнал общей биологии. – 2009. – Т. 70. – №2. – С. 121-142.
159. Сапожников, Н.А. Роль механической обработки в окультуривании суглинистых и глинистых подзолистых почв / Н.А. Сапожников // Материалы научно-метод. совещания по обработке почвы. М., 1961. – С. 71-87.

160. Симакова, М.С. Использование материалов аэро- и космической съемки в картографировании почв: пути развития, состояние, задачи / М.С. Симакова, И.Ю. Савин // Почвоведение. – 1998. – №11. – С. 1339-1347.
161. Соколов, В.Е. Позвоночные Кавказа. Млекопитающие. Насекомоядные / В.Е. Соколов, А.К. Темботов., М.: Наука, 1989. – 547 с.
162. Соколов, М.С. Здоровая почва как необходимое условие жизни человека / М.С. Соколов, Ю.А. Дородных, А.И. Марченко // Почвоведение. – 2010. – № 7. – С. 858-866.
163. Солдатов, А.С. Почвы горных пастбищ Гунибского и Лакского районов Дагестанской АССР / А.С. Солдатов // Тр. отд. почвовед. Махачкала: Даг. Фил. АН СССР. – 1956. – Т. 3. – С. 30-78.
164. Сорокин, А.Д. Микробная индикация почв, загрязненных промышленными эмиссиями / А.Д. Сорокин, Е.Н. Афанасова // Сибирский экологический журнал. – 2011. – №5. – С. 689-695.
165. Стольникова, Е.В. Микробная биомасса, ее структура и продуцирование парниковых газов почвами разного землепользования: дис. ... канд-та. биол. наук: 03.02.03 / Стольникова Екатерина Владимировна. – Москва, 2010. – 164 с.
166. Сусьян, Е.А. Разделение грибного и бактериального субстрат-индуцированного дыхания с использованием антибиотиков в почвах разных экосистем / Е.А. Сусьян, Н.Д. Ананьева, Е.В. Благодатская // Микробиология. – 2005. – Т. 74. – №3. – С. 394-400.
167. Сусьян, Е.А. Активная микробная биомасса разных типов почв: дис. ... канд-та. биол. наук: 03.02.03 / Сусьян Евгений Александрович. – Москва, 2005. – 130 с.
168. Сушко, С.В. Микробное дыхание почвы в полевых и лабораторных условиях / С.В. Сушко, Н.Д. Ананьева, К.В. Иващенко, В.И. Васенев, Д.А. Саржанов // Агрофизика. – 2016. – №4. – С. 17-23.
169. Темботов, А.К. География млекопитающих Северного Кавказа / А.К. Темботов, – Нальчик: Эльбрус, 1972. – 245 с.
170. Темботов, А.К. Номенклатура и систематика высотно-поясной структуры для макроэкологических целей / А.К. Темботов, Ф.А. Темботова, И.Л. Ворокова // Экология млекопитающих горных территорий. Популяционные аспекты. Мат-лы всерос. совещ. Нальчик: Изд. центр “Эль-фа”, 1997. – С. 3-20.
171. Темботов, А.К. Фундаментальная экология горных территорий и ее социальные аспекты / А.К. Темботов, Ф.А. Темботова // Мат-лы Всероссийск. научно-практич. конф. «Северный Кавказ в условиях глобализации». Майкоп, 2001. – С. 277-280.
172. Темботов, Р.Х. 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, Е.М. Хакунова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19. – №4. – С. 128-137.
173. Темботов, Р.Х. Изучение биохимических свойств почвенного покрова Центрального Кавказа с применением геоинформационных систем и данных дистанционного зондирования / Р.Х. Темботов, О.Н. Горобцова, Ф.В. Гедгафова, Т.С. Улигова // Вестник Дагестанского научного центра РАН. – 2014. – №55. – С. 35-41.
174. Темботов, Р.Х. Использование мультифункционального подхода для картографического моделирования содержания органического углерода в естественных и

пахотных почвах Центрального Кавказа / Р.Х. Темботов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20. – № 3. – С. 193–206.

175. Темботов, Р.Х. Применение дистанционной информации для картографического моделирования содержания органического углерода в черноземах равнинно предгорной части Центрального Кавказа / Р.Х. Темботов, О.Н. Горобцова, Ф.В. Гедгафова, Е.М. Хакунова, А.Т. Цурова, З.Л. Баккуева // Матер. III Междунар. науч. конф. и II Междунар. науч. школы для молодых ученых «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки». – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 306-310.

176. Темботов, Р.Х. Респираторная активность микробной биомассы в основных типах горных почв вдоль высотного градиента Центрального Кавказа / Р.Х. Темботов // Почвоведение. – 2024. – №4. – С. 1400-1413.

177. Темботов, Р.Х. Эколого-биологическая оценка состояния почв равнин и предгорий Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии): автореф. дис. ... канд. биол. наук / Темботов Рустам Хасанбиевич. – Ростов-на-Дону, 2017. – 23с.

178. Темботов Р.Х. Эколого-биологическая оценка состояния почв равнин и предгорий Центрального Кавказа (в границах Кабардино-Балкарии): дис. ... канд-та. биол. наук: 03.02.08 / Темботов Рустам Хасанбиевич. – Ростов н/Д, 2017. – 190 с.

179. Титлянова, А.А. Изменение продуктивности болотных и травяных экосистем по широтному градиенту / А.А. Титлянова, Е.К. Вишнякова // Почвы и окружающая среда. – 2022. – Том 5. – №2. e176.

180. Умаров, М.М. Роль микроорганизмов в круговороте химических элементов в наземных экосистемах. Структурно-функциональная роль почвы в биосфере / М.М. Умаров, – М.: Наука, 2003. – С. 125-139.

181. Фиапшев, Б.Х. Высокогорные почвы центральной части Северного Кавказа / Б.Х. Фиапшев, – Нальчик: Изд-во КБГСХА, 1996. – 137 с.

182. Фиапшев, Б.Х. Почвы Кабардино-Балкарской АССР (генетические особенности, география и хозяйственное использование): автореф. дис. ... д-ра биол. наук / Фиапшев Борис Хамзетович. – Ростов н/Д, 1975. – 54 с.

183. Фиапшев, Б.Х. Чернозёмы Центрального и Восточного Предкавказья // Чернозёмы СССР. (Предкавказье и Кавказ) / Б.Х. Фиапшев, К.И. Трофименко, В.И. Кумахов, М.Т. Куприченков, Л.Н. Петров, Н.С. Пищуга, М.И. Сикорский, – М.: Агропромиздат, 1985. – С. 54-146.

184. Фиапшев, Б.Х. О составе органического вещества высокогорных почв Северного Кавказа / Б.Х. Фиапшев, С.И. Федорова // Научные основы рационального использования почв Северного Кавказа и пути повышения их плодородия. Нальчик, 1971. – С. 114-121.

185. Фридланд, В.М. Почвы высокогорий Кавказа / В.М. Фридланд // Генезис и география почв. М.: Наука, 1966. – С. 43-87.

186. Хазиев, Ф.Х. Методы почвенной энзимологии / Ф.Х. Хазиев, – М.: Наука, 2005. – 252 с.

187. Хазиев, Ф.Х. Почвенные ферменты / Ф.Х. Хазиев, – М.: Знание, 1972. – 32 с.

188. Хазиев, Ф.Х. Ферментативная активность почв агроценозов и перспективы ее изучения / Ф.Х. Хазиев, А.Е. Гулько // Почвоведение. – 1991. – №8. – С. 88-103.

189. Хазиев, Ф.Х. Температура и влажность как экологические факторы биологической активности почв / Ф.Х. Хазиев // Экология. – 1976. – №6. – С. 50-55.

190. Хазиев, Ф.Х. Ферментативная активность почв / Ф.Х. Хазиев, – М., 1976. – 180 с.

191. Хазиев, Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв / Ф.Х. Хазиев // Экобиотех. – 2018. – Том 1. – №2. – С. 80-92.
192. Хакунова, Е.М. Изменение биологической активности горных чернозёмов Центрального Кавказа при сельскохозяйственном использовании (в границах эльбрусского варианта пояности Кабардино-Балкарии) / Е.М. Хакунова, О.Н. Горобцова, Ф.В. Гедгафова, Т.С. Улигова, Р.Х. Темботов // Агрохимия. – 2018. – №3. – С. 12-18.
193. Хакунова, Е.М. Применение ГИС-технологий при исследовании горных черноземов Центрально Кавказа / Е.М. Хакунова // Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки: Материалы Международной молодежной научной школы, Ростов-на-Дону, 27–30 сентября 2022 года. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Южный федеральный университет, 2022. – С. 248-253.
194. Чимитдоржиева, Г.Д. Биологическая активность каштановых почв бассейна озера Байкал при применении на них отходов различных производств / Г.Д. Чимитдоржиева, Р.А. Егорова, Ц.Д.-Ц. Корсунова // Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2001. – 158 с.
195. Чундерова, А.И. Влияние севооборота и бессменных посевов на активность биохимических процессов на дерново-подзолистой почве / А.И. Чундерова // Микробиология земледелия. Ленинград, 1970. – С. 59-65.
196. Щепаченко, Д.Г. Запасы органического углерода в почвах России / Д.Г. Щепаченко, Л.В. Мухортова, А.З. Швиденко, Э.Ф. Ведрова // Почвоведение. – 2013. – №2. – С. 123-132.
197. Щербакова, Т.А. Ферментативная активность почв и трансформация органического вещества / А.Т. Щербакова, – Минск: Наука и техника, 1983. – 222 с.
198. Яковлев, А.С. Экологическое нормирование почв и управление их качеством / А.С. Яковлев, М.В. Евдокимова // Почвоведение. – 2011. – №5. – С. 582-597.
199. Adhikari K. Constructing a soil class map of denmark based on the fao legend using digital techniques / K. Adhikari, B. Minasny, M.B. Greve, M.H. Greve // Geoderma. – 2014. – V. 214-215. – P. 101-113.
200. Ali, R.S. Dynamics of soil respiration and microbial communities: interactive controls of temperature and substrate quality / R.S. Ali, C. Poll, E. Kandeler // Soil Biol. Biochem. – 2018. – V. 127. – P. 60-70.
201. Ananyeva, N.D. Soil microbial respiration in subtaiga and forest-steppe ecosystems of European Russia: field and laboratory approaches / N.D. Ananyeva, S.V. Susnko, K.V. Ivashchenko, V.I. Vasenev // Eurasian soil science. – 2020. – N.10. – P. 1492-1501.
202. Ananyeva, N.D. Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of european Russia / N.D. Ananyeva, E.A. Susyan, O.V. Chernova, S. Wirth // Eur. J. Soil Biol. – 2008. – V. 44. – P. 147-157.
203. Anderson, J.P.E. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils / J.P.E. Anderson, K.H. Domsch // Soil Biol. Biochem. – 1978. – V. 10. – N. 3. – P. 215-221.
204. Anderson, T.H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach / T.H. Anderson, K.H. Domsch // Soil Biol. Biochem. – 2010. – V. 42. – Issue 12. – P. 2039-2043.
205. Anderson, T.H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality / T.H. Anderson // Agric Ecosys Environ. – 2003. – V. 98. – P. 285-293.
206. Arrouays, D. GlobalSoilMap: Toward a Fine-Resolution Global Grid of Soil Properties / D. Arrouays, M.G. Grundy, A.E. Hartemink, J.W. Hempel, G.B.M. Heuvelink, S. Young Hong, P. Lagacherie, G. Lelyk, A.B. McBratney, N.J. McKenzie, M.L. Mendonca-Santos, B. Minasny, L.

Montanarella, I.O.A. Odeh, P.A. Sanchez, J.A. Thompson, Gan-Lin Zhang // *Advances in Agronomy*. – 2014. – V. 125. – P. 93-134.

207. Bardelli, T. Effects of slope exposure on soil physico-chemical and microbiological properties along an altitudinal climosequence in the Italian Alps / T. Bardelli, M. Gomez-Brandon, J. Ascher-Jenuill, F. Fornasier, P. Arfaioli, D. Francioli, M. Egli, G. Sartori, H. Insam, G. Pietramellara // *Sci. Total Environ.* – 2017. – V. 575. – P. 1041-1055.

208. Beare, M.H. A substrate-induced respiration (SIR) method for measurement of fungal and bacterial biomass on plant residues / M.H. Beare, C.L. Neely, D. Coleman, W.L. Hargrove // *Soil Biol Biochem.* – 1990. – V. 22. – N 5. – P. 585-594.

209. Beare, M.H. Microbial and faunal interactions and effects on litter nitrogen and decomposition in agro-ecosystems / M.H. Beare, R.W. Parmelee, P.F. Hendrix, W. Cheng, D.C. Coleman, Jr. Crossley // *Ecological Monographs*. – 1992. 62: 569-591.

210. Benedetti, A. Approaches to defining, monitoring, evaluating and managing soil quality / A. Benedetti, O. Dilly // *Mikrobiological Methods for Assessing Soil Quality/CABI*. Wallingford. – 2006. – P. 3-14.

211. Blagodatskaya, E. Temperature sensitivity and enzymatic mechanisms of soil organic matter decomposition along an altitudinal gradient on Mount Kilimanjaro / E. Blagodatskaya, S. Blagodatsky, N. Khomyakov, O. Myachina, Y. Kuzyakov // *Scientific Reports*. – 2016. – V. 6. – P. 22240.

212. Blagodatskaya, E. Active microorganisms in soil: Critical review of estimation criteria and approaches / E. Blagodatskaya, Y. Kuzyakov // *Soil Biol Biochem.* – 2013. – V. 67. – P. 192-211.

213. Boettinger, J.L. Digital Soil Mapping – Bridging Research, Environmental Application, and Operation / J.L. Boettinger, D.W. Howell, A.C. Moore, A.E. Hartemink, S. Kienast-Brown // Dordrecht: Springer, 2010. – 473 p.

214. Bouma, T.J. Estimating respiration of roots in soil: Interactions with soil CO<sub>2</sub>, soil temperature and soil water content / T.J. Bouma, K.L. Nielsen, D.M. Eissenstat, J.P. Lynch // *Plant and Soil*. – 1997. – V. 195. – N. 2. – P. 221-232.

215. Brevik, E.C. Soil Maps of the United States of America / E.C. Brevik, A.E. Hartemink // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 2013. – V. 77. – P. 1117-1132.

216. Brookes, P.C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals / P.C. Brookes // *Biology and Fertility of Soil*. – 1995. – V. 19. – P. 269-279.

217. Chang, E.H. The effect of altitudinal gradient on soil microbial community activity and structure in moso bamboo plantations / E.H. Chang, T.H. Chen, G. Tian, C.Y. Chiu // *Applied Soil Ecology*. – 2016. – V. 98. – P. 213-220.

218. Collof, M.J. Detection of nitrogen cycle genes in soils for measuring the effects of changes in land use and management / M.J. Collof, S.A. Wakelin, D. Gomez, S.L. Rogers // *Soil Biol. Biochem.* – 2008. – V. 40. – P. 1637-1645.

219. Conrad, R. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, OCS, N<sub>2</sub>O and NO) / R. Conrad // *Microbiological Reviews*. – 1996. – V. 60. – N. 4. – P. 609-640.

220. Creamer, R.E. Measuring basal soil respiration across Europe: Do incubation temperature and incubation period matter? / R.E. Creamer, R.P.O. Schulte, D. Stone // *Ecological Indicators*. – 2014. – V. 36. – P. 409-418.

221. Dilly, O. Regulation of the respiratory quotient of soil microbiota by availability of nutrients / O. Dilly // *FEMS Microbiology Ecology*. – 2003. – V. 43. – P. 375-381.

222. DIN ISO 14240-1. Soil quality -determination of soil microbial biomass. Part 1: substrate-induced respiration method. Berlin-Wien-Zurich: Beuth, 1997.
223. Doran, J.W. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set // *Methods for Assessing Soil Quality* / J.W. Doran, T.B. Parkin // Wisconsin. USA: Inc. Madison. – 1996. – P. 25-37.
224. Doran, J.W. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality / J.W. Doran, M.R. Zeiss // *Applied Soil Ecology*. – 2000. – V. 15. – P. 3-11.
225. Elbeih, S.F. Evaluation of agricultural expansion areas in the Egyptian deserts: A review using remote sensing and GIS / S.F. Elbeih // *The Egyptian J. Remote Sensing and Space Science*. – 2021. – V. 24. – No. 2. – P. 889-906.
226. Food and Agriculture Organization (FAO) [Electronic resource]. – 2023. – Accessed: <http://www.fao.org/news/story/ru/item/1148827/icode/>
227. Ge, T. Stability and dynamics of enzyme activity patterns in the rice rhizosphere: effects of plant growth and temperature / T. Ge, X. Wei, B.S. Razavi, Z. Zhu, Y. Hu, Y. Kuzyakov, D.L. Jones, J. Wu // *Soil Biol. Biochem.* – 2017. – V. 113. – P. 108-115.
228. Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Version 1.5: Technical Report. FAO and ITPS. Rome, Italy: FAO, 2020. – 169 p.
229. Gorobtsova, O. N. Profile researches of natural and agrogenic chernozemic soils biological activity in the belt of steppe meadows of Central Caucasus (Kabardino-Balkar Republic) / O. N. Gorobtsova, T. S. Uligova, F. V. Gedgafova, R. H. Tembotov, E. M. Khakunova, V. A. Chadayeva, N. L. Tsepikova, Z. M. Khanov, A. Z. Zhashuev // *IIOAB JOURNAL*. – 2019. – V. 10, No. 2. – P. 101-110.
230. Greve, M.H. Soil mapping in Denmark / M.H. Greve, H. Breuning-Madsen // *European Soil Bureau Research Report*. – 1999. – № 6. – P. 49-56.
231. Han, X. Soil microbial community response to land use and various soil elements in a city landscape of north China / X. Han, R. Wang, W. Guo, X. Pang, J. Zhou, Q. Wang, J. Zhan, J. Dai // *Afr. J. Biotechnol.* – 2011. – V. 10(73). – P. 16554-16565.
232. Hartemink, A.E. Soil maps of the Netherlands / A.E. Hartemink, M.P. Sonneveld // *Geoderma*. – 2013. – V. 204. – P. 1-9.
233. Hassink, J. Relationship between the amount and the activity of the microbial biomass in Dutch grassland soils: comparison of the fumigation-incubation method and the substrate-induced method / J. Hassink // *Soil Biol Biochem.* – 1993. – V. 25. – P. 533-538.
234. Ivashchenko, K. Soil microbial activity along an altitudinal gradient: Vegetation as a main driver beyond topographic and edaphic factors / K. Ivashchenko, S. Sushko, A. Selezneva, N. Ananyeva, A. Zhuravleva, V. Kudryarov, M. Makarov, S. Blagodatsky // *Applied Soil Ecology*. – 2021. – V. 168. – P. 1-12.
235. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
236. Jenkinson, D.S. Microbial biomass in soil: measurement and turnover / D.S. Jenkinson, J.N. Ladd // *Soil Biochemistry*. Dekker. New York, 1981. – V. 5. – P. 415-471.
237. Jorgensen, S.E. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems / S.E. Jorgensen, Y.M. Svirezhev // Elsevier. – 2004. – 369 p.
238. Lagacherie, P. Digital soil mapping: an introductory perspective / P. Lagacherie, A. McBratney, M. Voltz // Elsevier, 2006. – V. 31. – 658 p.

239. Landsat. The NASA/USGS Landsat Program [Electronic resource]. – 2022. – Accessed: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
240. Li, Y. T. Microbial biomass, enzyme and mineralization activity in relation to soil organic C, N and P turnover influenced by acid metal stress / Y.T. Li, C. Rouland, M. Benedetti, F.B. Li, A. Pando, P. Lavelle, J. Dai // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2009. – V. 41. – P. 969-977.
241. Macdonald, C.A. Physiological, biochemical and molecular responses of the soil microbial community after afforestation of pasture with *Pinus radiata* / C.A. Macdonald, N. Thomas, L. Robinson, K.R. Tate, D.J. Ross, J. Dando, B.K. Singh // *Soil Biol. Biochem.* – 2009. – V.41. – P. 1642-1651.
242. Margesin, R. Microbial communities and activities in alpine and subalpine soils / R. Margesin, M. Jud, D. Tschirko, F. Schinner // *FEMS Microbiol. Ecol.* – 2009. – V. 67. – P. 208-218.
243. Margalef, O. Global patterns of phosphatase activity in natural soils / O. Margalef, J. Sardans, M. Fernandez-Martinez, R. Molowny-Horas, I.A. Janssens, P. Ciais, D. Goll, A. Richter, M. Obersteiner, D. Asensio, J. Penuelas // *Sci. Rep.* – 2017. – V. 7. – P. 1337.
244. Martens R. Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations / R. Martens // *Biol. Fertil. Soils*. – 1995. – V. 19. – N. 2-3. – P. 87-99.
245. Minasny, B. Soil carbon 4 per mille / B. Minasny, B.P. Malone, A.B. McBratney // *Geoderma*. – 2017. – V. 292. – P. 59-86.
246. Moreno, J.F. Analysis, Investigation and Monitoring of Water resources, for the management of multi-purpose reservoirs / J.F. Moreno // *Survey of Remote Sensing Data Analysis Methods*. 1999.
247. Murugan, R. Changes in soil microbial biomass and residual indices as ecological indicators of land use change in temperate permanent grassland / R. Murugan, R. Loges, F. Taube, A. Sradnick, R.G. Joergensen // *Microb Ecol.* – 2014. – V. 67. – P. 907-918.
248. Nielsen, M.N. Microorganisms as indicators of soil health. National environmental research institute. Denmark / M.N. Nielsen, A. Winding // *Technical report*. – 2002. – N. 388. – 84 p.
249. Nogueira, M.A. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural, reforested and agricultural land use in southern Brazil / M.A. Nogueira, U.B. Albino, O. Brandao-Junior // *Agriculture, ecosystems and environment*. – 2006. – V. 115. – P. 237-247.
250. Nottingham, A.T. Temperature sensitivity of soil enzymes along an elevation gradient in the peruvian Andes / A.T. Nottingham, B.L. Turner, J. Whitaker, N. Ostle, R.D. Bardgett, N.P. McNamara, N. Salinas, P. Meir // *Biogeochemistry*. – 2016. – V. 127. – P. 217-230.
251. Ohtonen, R. Ecological theories in soil biology / R. Ohtonen, S. Aikio, H. Vare // *Soil Biol Biochem.* – 1997. – V. 29. – No. 11/12. – P. 1613-1619.
252. Papa, S. Microbial activities and trace element contents in an urban soil / S. Papa, G. Bartoli, A. Pellegrino, A. Fioretto // *Environ. Monitor. Assess.* – 2010. – V. 165. – P. 193-203.
253. Powlson, D.S. Measurement of microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to the straw incorporation / D.S. Powlson, P.C. Brookes, B.T. Christensen // *Soil Biol Biochem.* – 1987. – № 19. – P. 159-164.
254. Powlson, D.S. A Comparison of the Organic-Matter, Biomass, Adenosine-Triphosphate and Mineralizable Nitrogen Contents of Ploughed and Direct Drilled Soils / D.S. Powlson, D.S. Jenkinson // *Journal of Agricultural Science*. – 1981. – № 97. – P.713-721.
255. Puzachenko, Yu.G. Estimation of thermodynamic parameters of the biosphere, based on remote sensing / Yu.G. Puzachenko, R.B. Sandler, A. Svirejeva-Hopkins // *Ecological Modelling*. – 2011. – V. 222 (16). Elsevier. – P. 2913-2923.

256. Rozhkov, V.A. Soil Carbon Estimates and Soil Carbon Map for Russia: IIASA Working Paper / V.A. Rozhkov, V.B. Wagner, B.M. Kogut, D.E. Konyushkov, S. Nilsson, V.B. Sheremet, A.Z. Shvidenko // 1996. – No. WP-96-060. – 47 p.
257. Schloter, M. Microbial indicators for soil quality / M. Schloter, P. Nannipieri, Sørensen S. J., J. D. Elsas // *Biol. Fertil. Soils*. – 2018. – V. 54. – P. 1-10.
258. Sikora, L.J. Comparison of the rehydration method for biomass determination to fumigation-incubation and substrate-induced respiration method / L.J. Sikora, V. Yakovchenko, D.D. Kaufman // *Soil Biol Biochem*. – 1994. – V. 26. – N. 10. – P. 1443-1445.
259. Sims, J.T. Assessing Soil Quality for Environmental Purposes: Roles and Challenges for Soil Scientists / J.T. Sims, S.D. Cunningham, M.E. Sumner // *J Environ Qual*. – 1997. – V. 26. – N. 1. – P. 20-25.
260. Stolbovoi, V. Carbon in Russian soils / V. Stolbovoi // *Climatic Change*. – 2002. – V. 55(1). – P. 131-156.
261. USGS science for a changing world. EarthExplorer [Electronic resource]. – 2022. – Accessed: <http://earthexplorer.usgs.gov/>
262. USGS science for a changing world (GloVis) [Electronic resource]. – 2022. – <http://glovis.usgs.gov/>
263. Wardle, D.A. A critique of the microbial metabolic quotient  $qCO_2$  as a bioindicator of disturbance and ecosystem development / D.A. Wardle, A. Ghani // *Soil Biol. Biochem*. – 1995. – V. 27. – P. 1601-1610.
264. Wardle, D.A. The quest for a contemporary ecological dimension to soil biology / D.A. Wardle, K.E. Giller // *Soil Biol Biochem*. – 1996. – V. 28. – N. 12. – P. 1549-1554.
265. WorldClim. WorldClim climate database [Electronic resource]. – 2022. – Accessed: <https://worldclim.com/version2>
266. Xu, Z. The variations in soil microbial communities, enzyme activities and their relationships with soil organic matter decomposition along the northern slope of Changbai Mountain / Z. Xu, G. Yu, X. Zhang, J. Ge, N. He, Q. Wang, D. Wang // *Appl. Soil Ecol*. – 2015. – V. 86. – P. 19-29.
267. Yakovchenko, V. A biologically based indicator of soil quality / V. Yakovchenko, L.J. Sikora, D.D. Kaufman // *Biol Fertil Soils*. – 1996. – V. 21. – N. 4. – P. 245-251.