

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ - МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА**



**Монография**  
**НАИЛУЧШИЕ ДОСТУПНЫЕ**  
**ПОЧВО- И УГЛЕРОД-СБЕРЕГАЮЩИЕ**  
**ТЕХНОЛОГИИ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ,**  
**ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ**

(под ред. И.И. Васенева)

*Российский государственный аграрный  
университет – МСХА имени К.А. Тимирязева*

**Наилучшие доступные  
почво- и углерод-сберегающие  
технологии природопользования,  
экологического мониторинга  
и контроля**

Москва  
2023

УДК 519 : 631.58  
ББК 26.1 + 41.41  
Н 20

*Монография подготовлена в рамках исследований по российско-итальянскому проекту «Интеграция IoT датчиков и алгоритмов искусственного интеллекта для точного климатически сбалансированного сельского хозяйства и систем поддержки принятия решений» (грант Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2021-1030).*

*Рецензенты:*

доктор биол. наук, профессор **М.А. Мазиров**  
(РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева),  
доктор с.-х. наук, профессор **П.М. Сапожников**  
(МГУ имени М.В. Ломоносова)

**Авторы: Васнев И.И., Александров Н.А., Андреева И.В., Барахов А.В., Бауэр Т.В., Беленев С.А., Бовсун М.А., Брикманс А.В., Бузылев А.В., Бурачевская М.В., Васнев П.И., Василевская Л.Н., Габчая В.В., Гилёв А.М., Дудникова Т.С., Жигалева Я.С., Илюшкова Е.М., Козьменко С.В., Кузов Н.А., Лисина И.А., Манджиева С.С., Минкина Т.В., Нестерова О.В., Пагутин А.А., Рыбачук Н.А., Сакара Н.А., Семаль В.А., Серегин И.А., Спыну М.Т., Степанов А.В., Сушкова С.Н., Тихонова М.В., Черникова Н.В., Ярославцев А.М., Яцук А.В.**

Наилучшие доступные почво- и углерод-сберегающие технологии природопользования, экологического мониторинга и контроля / Под ред. И.И. Васнева. – М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023. – 240 с.

В работе обсуждаются актуальные вопросы развития, апробации, локализации и верификации наилучших по экологическим показателям и доступных с точки зрения затрат и материально-технического обеспечения почво- и углерод-сберегающих технологий земле- и природопользования, экологического мониторинга и контроля. Особое внимание уделяется системному анализу проблемных агроэкологических ситуаций и современным способам их эффективного решения. Приводятся результаты региональной адаптации, трансфера и локализации разрабатываемых авторами технологий к агроэкологическим и функционально-экологическим особенностям конкретного района, хозяйства, рабочего участка, поля, лесного квартала или акватории.

Представленные результаты прикладных агроэкологических и экологических исследований будут интересны профильным специалистам, аспирантам, студентам и преподавателям, специализирующимся в области агроэкологии, экологического мониторинга, разработки и внедрения наилучших доступных технологий и систем поддержки принятия решений по агроэкологической оптимизации земледелия и природопользования.

*Ключевые слова:* агроэкология, экология, наземные экосистемы, водные экосистемы, земледелие, качество земель, модели, мониторинг, оценка земель, типизация земель, СППР, цифровизация, IoT, наилучшие доступные технологии.

**ISBN 978-5-6049459-1-9**

© Авторы, 2023

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023

---

## Содержание

Введение .....	6
<b>1. Информационно-методическое обеспечение выбора наилучших доступных почво- и углерод-сберегающих агротехнологий .....</b>	<b>8</b>
1.1. Актуальные задачи информационно-методического обеспечения выбора наилучших доступных почво- и углерод-сберегающих агротехнологий .....	8
1.2. Автоматизированные системы агроэкологической оценки почв и земель .....	17
1.3. Агроэкологические СППР для оптимизации систем земледелия и наилучших доступных агротехнологий .....	30
1.4. Региональные агроэкологические геоинформационные системы .....	40
1.5. Геоинформационное обеспечение региональных систем агроэкологического мониторинга и СППР .....	50
<b>2. Почво- и углерод-сберегающие технологии с внесением биоугля .....</b>	<b>62</b>
2.1. Технология получения высокопористых углеродных материалов из растительного сырья для целей устойчивого развития .....	62
2.2. Оценка влияния различных доз внесения биоугля на урожайность сои сорта Скульптор в условиях Агроэкологического стационара РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева .....	89
2.3. Положительный опыт применения почво- и углерод-сберегающих агротехнологий с внесением биоугля в условиях Дальнего Востока России .....	99
2.4. Влияние биоугля на содержание подвижных форм свинца в агропочвах тяжелого гранулометрического состава .....	109
<b>3. Почво- и углерод-сберегающие технологии повышения продуктивности травостоя с использованием отходов промышленности и сельского хозяйства .....</b>	<b>116</b>
3.1. Агроэкологическая оценка эффективности утилизации перепелиного помета при восстановлении нарушенных дерново-подзолистых почв с формированием устойчивого травостоя .....	116
3.2. Экологическая оценка последствий фосфогипса на стабилизацию углеродного баланса регенерированных верхних горизонтов деградированных дерново-подзолистых почв .....	134

<b>4. Экологический мониторинг и оценка эмиссии парниковых газов в условиях наземных экосистем</b> . . . . .	147
4.1. Верификация по методу турбулентных пульсаций транспирации по данным IoT мониторинга лесных насаждений. . . . .	147
4.2. Агроэкологическая оценка потенциала использования старопахотных земель с применением IT-технологий на основе системы поддержки принятия решений. . . . .	156
4.3. Агроэкологические особенности содержания и распределения подвижной серы и меди в почвах ампелоценозов Южного берега Крыма и Автономного края Воеводина Республики Сербия. . . . .	166
4.4 Экологическая оценка пространственного варьирования и сезонной динамики потоков N <sub>2</sub> O и CH <sub>4</sub> из почвы в условиях города . . . . .	203
<b>5. Экологический мониторинг и оценка эмиссии парниковых газов в условиях водных экосистем.</b> . . . . .	215
5.1. Стихийные гидрологические явления как пример климатических изменений . . . . .	215
5.2. Специфика измерений эмиссии парниковых газов в ходе морских экспедиций . . . . .	226
5.3. Гранулометрический состав и органическое вещество аквапочв Уссурийского залива . . . . .	234

---

## Принятые в работе сокращения и обозначения

БД	– база данных
БПЛА	– беспилотный летательный аппарат
ГИС	– геоинформационная система
ЛИССОЗ	– локальная информационно-справочная система агроэкологической оптимизации земледелия
НСБД	– нормативно-справочная база данных
ОДП	– основные диагностические показатели
ПП	– почвенный покров
ППК	– почвенный поглощающий комплекс
РАСКАЗ	– региональная автоматизированная система комплексной агроэкологической оценки почв и земель
СПШ	– структура почвенного покрова
СППР	– система поддержки принятия решений
ЦЧР	– Центрально-Черноземный регион России (синоним ЦЧЗ – Центрально-Черноземная зона России)
IoT	– Интернет вещей (в данном контексте технологические решения по использованию пространственно удаленных источников агроэкологической информации с помощью Интернет)

---

## Введение

В условиях характерного для XXI столетия ускоренного развития глобальных изменений климата и биоты, процессов деградации почвенного покрова и сокращения пахотнопригодных земельных ресурсов с плодородными почвами, нарушений нормального функционирования природоохранной инфраструктуры наземных и водных экосистем чрезвычайно остро стоит вопрос разработки, региональной адаптации, трансфера и локализации к агроэкологическим и функционально-экологическим особенностям конкретного района, хозяйства, рабочего участка, поля, лесного квартала или акватории наилучших по экологическим показателям и доступных с точки зрения затрат и материально-технического обеспечения почво- и углерод-сберегающих технологий земле- и природопользования, экологического мониторинга и контроля.

В коллективной монографии, подготовленной при поддержке и, преимущественно, по результатам исследований по проекту «Интеграция IoT датчиков и алгоритмов искусственного интеллекта для точного климатически сбалансированного сельского хозяйства и систем поддержки принятия решений» (грант Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2021-1030), представлены сгруппированные по прикладной и информационно-методической направленности прототипы целого ряда наилучших доступных технологий в области повышения и восстановления плодородия почв, экологических функций базовых компонентов экосистем, современных методов их исследования, мониторинга и экологического контроля.

Представленные работы прошли обсуждение на Международной конференции «Климат, плодородие почв и агротехнологии» (Самара, июнь 2023 г.), 3-й Международной конференции по исследованию сельскохозяйственных и пищевых технологий (I-CRAFT, Адана, Турция, октябрь 2023 г.), серии круглых столов Открытого международного Форума-Вебинара «Почво- и углерод-сберегающие климатические проекты в АПК России и мира» (Москва, ноябрь 2023 г.), Международной метеорологической конференции ETICUM 2023 (Нови Сад, Сербия, декабрь

2023 г.) и содержат описание получивших положительную апробацию результатов комплексных экологических исследований, проводимых ведущими специалистами и молодыми учеными Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева, Дальневосточного федерального университета и Южного федерального университета на представительных зональных объектах в условиях пяти федеральных округов России.

В проведении исследований последних лет, результаты которых вошли в состав данной работы, самое активное участие принимали преподаватели, сотрудники, студенты и аспиранты кафедры экологии Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, которым авторы выражают глубокую благодарность.

---

# **1. Информационно-методическое обеспечение выбора наилучших доступных почво- и углерод-сберегающих агротехнологий**

## **1.1. Актуальные задачи информационно-методического обеспечения выбора наилучших доступных почво- и углерод-сберегающих агротехнологий**

*И.И. Васнев*

**Аннотация:** Систематизированы основные агроэкологические проблемы устойчиво рентабельного и экологически безопасного развития интенсивных агротехнологий на фоне ускоренного развития агрогенной деградации почв, глобальных изменений климата и биоты, адаптивно-ландшафтных систем земледелия и информационных технологий. Рассмотрены актуальные задачи информационно-методического обеспечения агроэкологически обоснованного выбора и оперативной корректировки наилучших по эколого-экономическим требованиям, доступных в условиях конкретного района и хозяйства почво- и углерод-сберегающих агротехнологий.

Характерное для Евразийского региона поступательное повышение среднегодовой температуры воздуха и осадков постепенно изменяет агроклиматический потенциал сельского хозяйства. Общий тренд на повышение среднемесячных температур теплого периода [Цифровые технологии..., 2022] определяет постепенный рост суммы активных температур вегетационного периода [Di Paola e.a., 2018], создавая потенциально благоприятные условия для развития растениеводства в условиях достаточного обеспечения выращиваемых культур доступными запасами почвенной влаги.

Менее однозначные и часто негативные изменения многолетней и сезонной динамики осадков [Shukla e.a., 2019] сопровождаются дальнейшим усилением неоднородности и непредсказуемости сезонной динамики запасов продуктивной влаги в почве [Васнев и др., 2019]. В последние годы часто наблюдается повышение интенсивности и длительности ливне-

вых осадков с увеличением засушливых периодов между ними, что приводит не только к активизированной эрозии и потерям урожая на участках с повышенной концентрацией стока, но и значительному снижению запасов потенциально продуктивной влаги на основной площади сельскохозяйственных земель.

В результате изменения активности континентальных антициклонов, в традиционно засушливых степных и части лесостепных районов Поволжья, Южного Предуралья и Западной Сибири увеличилась длительность сильных затяжных засух и суховеев [Укрепление..., 2019; Доклад..., 2020].

Участившиеся периоды крайне неблагоприятных погодных условий резко усиливают экологические и экономические риски интенсивного сельскохозяйственного производства, что определяет востребованность ускоренного развития, адаптации и внедрения эффективных технологий агроэкологического мониторинга почв, количественного прогнозирования наиболее проблемных агроэкологических ситуаций, гибкого планирования землепользования с вариативным применением наилучших доступных агротехнологий, адаптированных к почвенно-агроэкологическим условиям конкретного региона, хозяйства, рабочего участка и вегетационного периода.

Приоритетные задачи ускоренного и массового внедрения в сельское хозяйство России уже хорошо проявивших себя в условиях инновационно ориентированных хозяйств наилучших (экологически сбалансированных почво- и углерод-сберегающих) и реально доступных (по условиям текущей экономической эффективности, доступности высококачественных семян районированных сортов, наличии соответствующей техники, удобрений, средств защиты растений, кредитов) агротехнологий существенно усложнены не только сложившимися в настоящее время условиями производства и реализации сельскохозяйственной продукции, но и высоким разнообразием земель с широким распространением эрозии, несбалансированных потерь гумуса и других агрогенно активизированных процессов деградации почв.

Активное развитие водной, воздушной и плужной эрозии [Мавлянова, Кулов, Жоошов, 2016] существенно ухудшает качество не только почв, но и лежащих ниже по склону водных экосистем (рис. 1.1.1).



Рис. 1.1.1. Агроэкологические последствия ускоренного развития агрозенной эрозии на пахотных склоновых землях

В случае исходно небогатых гумусом старопашотных почв агрогенная эрозия часто сопровождается резким снижением содержания органического углерода верхних почвенных горизонтов, их сильным обесструктурированием и переуплотнением (рис. 1.1.2), что в свою очередь отрицательно сказывается на снижении запасов продуктивной (доступной растениям) почвенной влаги.

Одновременно качественно ухудшаются основные агрофизические и технологические функции почв, возрастает сопротивление при обработке, затрудняется работа уборочной техники, увеличиваются удельные затраты топлива и износ машин.

В результате сезонной агрогенной цементации [Козловский, 2003] на поверхности смытых почв часто формируется плотная корка, что приводит к дополнительным потерям влаги ливневых осадков и значительной части поливных вод, тем самым существенно снижая продуктивный влагозапас почв и, как правило, определяемую им агроклиматически обеспеченную урожайность большинства сельскохозяйственных культур в условиях засушливых районов России [Цифровые технологии..., 2022].

В условиях растущего дефицита влаги, ускоренной агрогенной эрозии и дегумификации почв неизбежно обостряются характерные для засушливых районов России проблемы локального вторичного засоления, осолонцевания, деградации почвенной структуры и поглощающего комплекса, истощения доступных для растений запасов макро-, мезо- и микроэлементов питания [Демидов, Ахмадов, 2016; ФАО..., 2021].

Связанное с ускоряющимися в XXI веке глобальными изменениями климата и широким распространением экологически несбалансированных по углероду и основным элементам питания систем земледелия значительное сокращение площади устойчиво высокопродуктивных и наиболее пригодных для интенсивных агротехнологий сельскохозяйственных земель в ряде случаев может серьезно ограничивать реальный потенциал дальнейшего социально-экономического развития сельских территорий и регионов в целом – вследствие значительного снижения агроэкологического качества, экологических функций и связанных с ними экосистемных сервисов, доминирующих на сельскохозяйственных землях агрогенно деградированных почв.

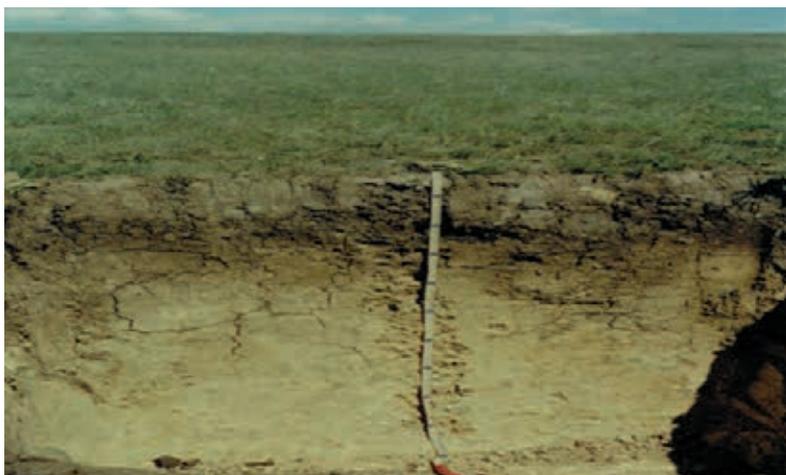
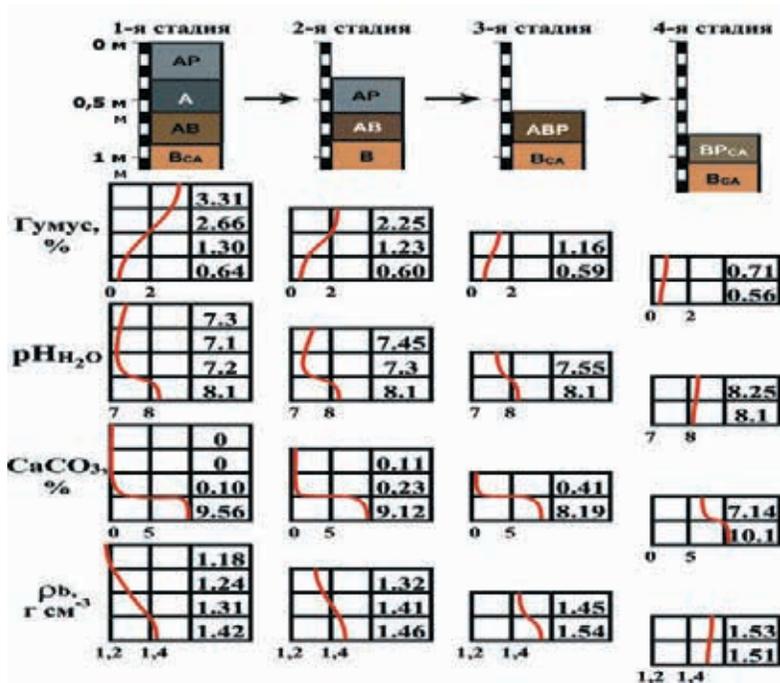


Рис. 1.1.2. Агрогенно-эрозионная деградация показателей плодородия почв (содержания гумуса, pH, плотности сложения) на примере черноземов

В основе активно развиваемого в последние годы информационно-методического обеспечения выбора и корректировки наилучших доступных почво- и углерод-сберегающих агротехнологий лежат:

1) Регионально адаптированные рамочные автоматизированные системы агроэкологической оценки почв и земель, включая потенциальное (устойчивое, самовоспроизводимое) и реальное (эффективное, актуальное) плодородие почв, их несущую способность для работы сельскохозяйственных машин с разной плотностью нагрузки на поверхность и способность «связывать-дезактивировать» различные загрязнители, возбудителей болезни и вредителей;

2) Настраиваемые на агроэкологические требования конкретной культуры и сорта, региональные особенности агроклимата и почв агроэкологические динамические модели продукционного процесса;

3) Ориентированные на оперативное выявление и анализ наиболее распространенных и значимых для конкретного региона проблемных агроэкологических ситуаций сельскохозяйственного землепользования smart-системы агроэкологического мониторинга с оперативным анализом разномасштабных данных дистанционного зондирования, функционально интерпретируемых и уточняемых с использованием IoT-датчиков суточной и сезонной динамики агроэкологического состояния почв и посевов;

4) Самообучающиеся системы поддержки принятия решений (СППР) по агроэкологически рациональному выбору культуры, сорта, рабочего участка, локализации и оперативной корректировке гибких элементов применяемых агротехнологий – с учетом агроэкологических особенностей почв рабочего участка, анализируемых в рамках агроэкологического мониторинга и/или прогнозируемых погодных условий вегетационного периода выращиваемых культур (сортов), дифференцированных по их основным фенологическим стадиям агроэкологических требований и вариативно прогнозируемой для этих условий агроэкологической и экономической эффективности гибких технологических операций;

5) Региональные геоинформационные системы агроэкологической оценки и районирования земель с легко доступным в «облаке» функциональным дружественным интерфейсом интерактивного обмена агроэкологической и почвенной информацией с зарегистрированными пользователями, которые получают возможность использования на практике результатов работы, связанных с региональной ГИС модулей агроэкологической оценки посевов, почв и земель, агроэкологического мониторинга, моделирования и прогнозирования продукционного процесса, выбора и корректировки наилучших доступных сортов и адаптируемых для них агротехнологий.

Разноплановое обострение на фоне глобальных изменений климата, технологий и запросов региональных рынков агроэкологических проблем обуславливает необходимость регулярного серьезного анализа и внесения корректив в приоритетные задачи современного земледелия и агроэкологии – с учетом актуальной динамики агроэкологических вызовов XXI века:

➤ ускоренного распространения агрогенной деградации почв и насущной необходимости внедрения почвосберегающих агротехнологий;

➤ повышенной динамики проблемных агроэкологических ситуаций на фоне растущей региональной дифференциации положительных и негативных особенностей проявления агроэкологических последствий глобальных изменений климата и необходимости их замедления в результате внедрения почвозащитных углерод-сберегающих агротехнологий;

➤ повышенной внутрипольной дифференциации агроэкологического качества земель и экологической необходимости внедрения прецизионных углерод-сберегающих агротехнологий для получения качественной сельскохозяйственной продукции пониженного углеродного следа;

➤ высокой динамики и значительной неопределенности текущих запросов глобального и регионального рынка сельскохозяйственной продукции, с формированием экологических требований на продукцию с невысоким углеродным следом;

➤ ускоренное накопление узко локализованных отходов промышленности и сельского хозяйства с необходимостью разработки и верификации пригодных для широкого внедрения

агротехнологий их экологически безопасной и экономически рентабельной утилизации;

➤ объективно высокой неоднородности экономических и технологических условий ведения сельского хозяйства, выбора и корректировки сортов и наилучших доступных технологий – с учетом реальной возможности рентабельной реализации продукции.

*Работа выполнена при поддержке проекта № 075-15-2021-1030 Министерства науки и высшего образования России.*

### **Список использованной литературы**

1. *Васнев И.И.* Анализ лимитирующих агроэкологических факторов урожайности и качества твердой пшеницы в засушливых условиях / Васнев И.И., Бесалиев И.Н., Мальчиков П. Н., Шутарева Г.И., Джанчаров Т.М., Морев Д.В., Ярославцев А.М., Курашов М.Ю. // *Достижения науки и техники АПК.* – 2019. – №12 (т. 33). – С. 30–37.

2. *Демидов В.* Восстановление засоленных почв Таджикистана на примере засоленных почв Вахшской долины / Демидов В., Ахмадов Х. // *Продовольственная безопасность в Евразийском регионе: Сборник тематических исследований.* – М.: Евразийский центр по продовольственной безопасности, 2016. – С. 29–48.

3. *Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета).* – СПб.; Саратов: Амирит, 2020. – 120 с.

4. *Козловский Ф.И.* Теория и методы изучения почвенного покрова. – М.: ГЕОС, 2003. – 535 с.

5. *Мавлянова Н.* Предлагаемые меры по уменьшению ирригационной эрозии на территории Кыргызстана / Мавлянова Н., Кулов К., Жоошов П. // *Продовольственная безопасность в Евразийском регионе: сборник тематических исследований.* – М.: Евразийский центр по продовольственной безопасности, 2016. – С. 49–70.

6. *Укрепление продовольственной безопасности и создание устойчивых продовольственных систем в Евразии: достижения и перспективы / Под ред. С.А. Шобы.* – М.: Евразийский центр по продовольственной безопасности, 2019. – 89 с.

7. *ФАО и Евразийский центр по продовольственной безопасности.* 2021. Устойчивое управление почвенными ресурсами в Евразийском регионе. Рим, ФАО. <https://doi.org/10.4060/b5827ru>

8. Цифровые технологии агроэкологического мониторинга и оптимизация земледелия / Под ред. И.И. Васенева. – М.: РГАУ-МСХА, 2022. – 240 с.

9. *Di Paola A., Caporaso L., Bombelli A., Di Paola F., Vasenev I., Nesterova O.V., Castaldi S., Valentini R.* The expansion of wheat thermal suitability of Russia in response to climate change // *Land Use Policy* – V. 33. – 2018. – P. 70–77.

10. *Shukla P.R., Skea J., Slade R., van Diemen R., Haughey E., Malley J., Pathak M., Portugal Pereira, J.* (eds.) 2019. Technical Summary. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.* URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/07/03\\_Technical-Summary-TS\\_V2.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/07/03_Technical-Summary-TS_V2.pdf).

*Автор: Васенев И.И., РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,  
vasenev@rgau-msha.ru .*

## **Current issues of information and methodological support for choosing the best available soil and carbon-saving agricultural technologies**

*I.I. Vasenev*

**Abstract:** The main agroecological problems of sustainable cost-effective and environmentally safe development of intensive agro-technologies against the background of accelerated development of agrogenic soil degradation, global climate and biota changes, adaptive landscape systems of agriculture and information technologies are systematized. The current issues of information and methodological support for agroecologically sound choosing and operational correcting the best soil- and carbon-saving agro-technologies according to ecological and economic requirements and available in a particular area and farm are considered.

## 1.2. Автоматизированные системы агроэкологической оценки почв и земель

*И.И. Васенев*

**Аннотация:** Представлен сводный алгоритм комплексной оценки агроэкологического качества агрогенно измененных почв и земель, включающий, согласно рекомендации Международного союза наук о почве (IUSS), рамочные алгоритмы трех основных этапов оценки: частной логистической агроэкологической оценки (агро-)экологического состояния и/или функционального качества почв (земель) – по их фазовым переменным (отдельным диагностическим параметрам); функциональной (факторной) агроэкологической оценки качества почв и земель – по интегрированию результатов частной агроэкологической оценки; интегральной агроэкологической оценки качества почв и земель – по интегрированию результатов функциональной (факторной) оценки на уровне условно гомогенного элементарного ареала почв или гетерогенного по составу почв ареала агроландшафта (рабочего участка).

Характерные для последних десятилетий периодическая смена землепользователей, высокая динамика рыночного спроса и ускоренное обновление основного ассортимента материально-технического обеспечения систем земледелия повышают актуальность мультипликативной оценки агроэкологического качества почв (земель), поливариантного нормативного прогнозирования и проектирования их использования – в быстро меняющихся агроэкологических, технологических и экономических условиях.

Для минимизации агроэкологических и экономических рисков ведения интенсивного сельскохозяйственного землепользования активно создаются и развиваются комплексные агроэкологические системы мониторинга и оценки экологического состояния и функционального качества земель, позволяющие учитывать местные особенности почвенного покрова и агроландшафта.

Эффективность работы таких систем в значительной мере определяется качеством разработки основных элементов ин-

формационно-методического обеспечения *такой* оценки [Агроэкологическая оценка..., 2012]:

➤ целевого определения рационального набора анализируемых в процессе оценки агроэкологических функций почв и земель – в соответствии с рамками поставленной задачи, особенностями региона, применяемых агротехнологий и почвенного покрова объекта оценки;

➤ использования минимально необходимого и достаточно набора реально доступных основных диагностических показателей (ОДП) почв и земель – для характеристики каждой из анализируемых и прогнозируемых на объекте оценки агроэкологических функций;

➤ выбора рациональных (достаточно, но не избыточно информативных и детализированных) шкал уверенно воспроизводимой квантификации-ранжирования анализируемых в процессе оценки данного объекта ОДП агроэкологических функций;

➤ разработки эффективного алгоритма анализа в модели агроэкологической оценки почв (земель) – с установлением обоснованных зависимостей их анализируемых функций от отдельных почвенно-агроэкологических характеристик и использованием оптимальных методов интегрирования и интерпретации получаемых частных и общих результатов оценки;

➤ принятия во внимание известных закономерностей провинциально-генетического, литолого-геоморфологического и агроэкологического разнообразия строения, состава, структурной организации и функционирования почв, пространственного варьирования почвенных характеристик и местных особенностей структуры почвенного покрова – в соответствии с масштабом анализируемого объекта.

Сводный алгоритм комплексной оценки агроэкологического качества агрогенно измененных почв и земель, согласно рекомендации Международного союза наук о почве (IUSS) [Vasenev, 2015] включает в себя рамочные алгоритмы трех основных этапов оценки:

❖ алгоритмы частной логистической агроэкологической оценки (агро-) экологического состояния и/или функционального качества почв (земель) – по их фазовым переменным (отдельным диагностическим параметрам);

❖ алгоритмы функциональной (факторной) агроэкологической оценки качества почв и земель – по интегрированию результатов их частной агроэкологической оценки в рамках гибко регулируемых функционально-диагностических групп параметров оценки, результатам функционального моделирования или анализа педотрансферных функций;

❖ алгоритмы интегральной агроэкологической оценки качества почв и земель – по интегрированию результатов их функциональной (факторной) агроэкологической оценки на уровне условно гомогенного элементарного ареала почв или гетерогенного по составу почв ареала агроландшафта (поля или рабочего участка), включающего ограниченный набор разных видов (разновидностей или даже родов, подтипов) почв (земель).

Частные оценки агроэкологического качества почв (земель) на уровне анализа отдельных диагностических параметров оценки определяются по районированным логистическим уравнениям зависимости анализируемого показателя качества почв (земель) от одного параметра их текущего или прогнозируемого состояния, аппроксимированным для интервалов «критических – оптимальных» значений этого параметра (рис. 1.2.1).

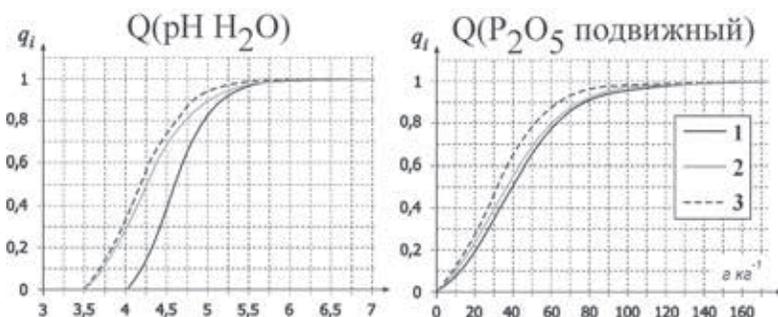


Рис. 1.2.1. Примеры графиков частной оценки агроэкологического качества почв при анализе потенциального плодородия выщелоченных черноземов (1), серых лесных суглинистых (2) и супесчаных (3) почв в ЦЧР

Данный алгоритм частной агроэкологической оценки почв отражает хорошо известную из практики неравномерность (непрямую – на графике рис. 1.2.1) поведения основных агроэкологических функций почв и земель на отрезке изменения их основных диагностических параметров (ОДП) от оптимальных до критических значений.

Как правило, ускоренные изменения агроэкологического качества почв (в рассматриваемом на рис. 1.2.1 случае – их потенциального плодородия на примере двух типов и двух вариантов гранулометрического состава почв) наблюдаются только при более-менее значительном удалении значения их основных диагностических параметров от своих оптимальных значений, и замедленные – в области функции, близкой к оптимальным значениям ОДП (рис. 1.2.1).

На этом относительно «устойчивом» участке агроэкологического функционирования качество почвы отличается повышенной устойчивостью к инициированному извне или продуцируемому самой почвой изменению ее ОДП, т.е. почва сравнительно легко сопротивляется внешним нарушениям, функционально компенсируя сравнительно незначительные изменения своих функциональных характеристик (ОДП) от их оптимальных для данной почвы и анализируемой функции значений.

При существенных нарушениях оптимального агроэкологического состояния почв (диагностирующего их устойчивое функционирование), способность почв сопротивляться внешним «возмущениям» (приводящим к изменениям их агроэкологически значимых параметров) резко ослабляется, что приводит к изменению режима функционирования.

При переходе значений агроэкологических ОДП через их регионально и типологически обусловленные пороговые значения почвы (земли) попадают в неустойчивое (кризисное) состояние. В этих условиях даже небольшие негативные изменения ОДП сопровождаются значительным ухудшением качества агроэкологического функционирования почв, и они ускоренно приближаются к критическому состоянию неспособности выполнения своей агроэкологической функции.

Формирование и модификации-детализации регионально и функционально дифференцированной матрицы критических и

оптимальных значений основных диагностических параметров почв (эталонов оценки) проводится с использованием методических руководств и ведомственных инструкций, зональных и региональных моделей плодородия почв и земель, областных и типовых систем земледелия и защиты растений, статистических сборников, научных публикаций, полевых опытов и экспериментов [Агроэкологическая оценка..., 2012].

Комплексная агроэкологическая оценка качества почв (земель) состоит из двух этапов: функциональной (факторной) и интегральной агроэкологической оценки. В них используются мультипликативные формулы расчета, соответственно, среднегармонических и среднегеометрических значений, а также, при наличии статистически верифицированных локализованных решений, регионально-типологические педотрансферные функции – построенные на основе адаптированных к местным условиям механических или функциональных моделей почвенно-гидрофизических, агрофизических, экогеохимических процессов или продукционного процесса культуры (сорта).

Активное использование в системах агроэкологической оценки почв методов динамического моделирования и анализа педотрансферных функций пока, к сожалению, часто ограничено небольшим набором гидрофизических (агрофизических) функций почв (земель), модели которых верифицированы для условий определенного региона и типа почв и земель.

Возможности дальнейшего расширения сферы их применения при массовой агроэкологической оценке почв определяются уровнем развития и наполнения регионально дифференцированных информационных баз знаний, включающих адаптированные к условиям конкретных типов почв и земель версии педотрансферных/ агроэкологических функций с актуальной верификацией регионально-типологических коэффициентов рамочных уравнений почвенно-агроэкологического моделирования.

Как правило, анализ агроэкологического качества почв и земель производится сразу по нескольким их основным агроэкологическим функциям (факторам оценки). К наиболее популярным (часто анализируемым) агроэкологическим факторам оценки почв и земель относятся:

(А) Агрохимические агроэкологические функции эффективного обеспечения сельскохозяйственных культур доступными им формами макро-, мезо- и микроэлементов питания (с учетом их мобильности в различных условиях влажности, емкости и состава почвенного поглощающего комплекса, кислотно-щелочного и окислительно-восстановительного режимов);

(В) Агрофизические агроэкологические функции обеспечения устойчиво благоприятных условий для работы сельскохозяйственных машин (с учетом гранулометрического и структурно-агрегатного состава почв, их плотности и реологических характеристик);

(С) Геоэкологические агроэкологические функции зависимости эффективности обработки и использования сельскохозяйственных земель от их пространственной неоднородности (с учетом выраженного внутрипольного варьирования основных диагностических параметров агроэкологического качества почв);

(D) Агро-морфогенетические агроэкологические функции зависимости потенциального плодородия почв от имеющих повышенную агроэкологическую значимость базовых характеристик их морфогенетического профиля (эродированности, оглеения, засоления, осолонцевания, подщелачивания, подкисления, слитизации, коркообразования и т.д.), поддающихся мелиоративному улучшению;

(Е) Геохимические агроэкологические функции зависимости буферной устойчивости почв к загрязнению от базовых характеристик почвенного поглощающего комплекса почв (емкости, насыщенности, состава ППК, гранулометрического и минералогического состава почв), их гумусового (содержание, состав, качество гумуса) и микробного состояния;

(F) Санитарно-экологические агроэкологические функции зависимости вида и эффективности допустимого использования земель от уровня их загрязнения (тяжелыми металлами, остаточными количествами и метаболитами пестицидов, радионуклидами, нефтепродуктами и т.д.), засорения (семенами, корневищами и т.п. сорняков) и заражения (патогенными мезо- и микроорганизмами);

(G) Агроклиматические агроэкологические функции обеспечения развития сельскохозяйственных растений, их продукционного процесса и формирования урожая светом, теплом и вла-

гой (с учетом их интегральных показателей по сезону, влияния сезонной динамики на фенологические фазы развития растений и лимитирующего воздействия неблагоприятных для их развития погодных условий и метеорологических явлений);

(Н) Гидрофизические агроэкологические функции устойчивого обеспечения растений доступной влагой (с учетом их дифференцированных по сортам, фенологическим стадиям и температурным условиям потребностей в воде, особенностей организации почвенного покрова и строения профиля почв, гранулометрического состава, порозности и основной гидрофизической характеристики их пахотных и подпахотных горизонтов, сезонной суммы и динамики осадков, испаряемости...).

При решении конкретных оценочно-аналитических или прогнозно-конструктивных задач набор анализируемых агроэкологических функций (факторов агроэкологической оценки) настраивается в соответствии с заданной целью, задаваемыми условиями и реально доступной информацией по ОДП. Современные автоматизированные системы агроэкологической оценки почв (земель) допускают значительные модификации набора используемых при их анализе параметров и факторов агроэкологической оценки, действуя в качестве рамочных (framework) моделей. Примером такой системы является **РАСКАЗ** [2005] – **Региональная автоматизированная система комплексной агроэкологической оценки земель.**

Используемый в РАСКАЗ базовый алгоритм функциональной оценки качества почв и земель использует формулу среднегармонических значений частных агроэкологических оценок (1.2.1), поскольку она позволяет максимально учитывать лимитирующее влияние параметров, находящихся в первом-втором минимуме, которые обычно и определяют текущее агроэкологическое состояние земель.

$$Q = \frac{m \prod (q_i^n)}{\sum \left( \frac{\prod (q_i^n)}{q_i^n} \right)}, \quad (1.2.1)$$

где  $q_i$  – частная агроэкологическая оценка  $i$ -го диагностического параметра;  $m$  – число проанализированных параметров;  $n$  – индекс их устойчивости.

Для прикладного ранжирования, визуализации и прикладного использования результатов функциональной оценки агроэкологического качества почв и земель разрабатываются интерпретационные таблицы, один из вариантов которой представлен на рисунке 1.2.2. Цветная окраска ее клеток по методу светофора (от зеленого к красному) способствует быстрому визуальному восприятию качественного ранга полученной оценки.

Индекс устойчивости  $n$  призван отразить реальное разнообразие потенциальной устойчивости-изменчивости различных диагностических параметров (агроэкологических характеристик) почв (земель) – в пределах интервала их допустимого варьирования. Для интегральной агроэкологической оценки качества почв (земель) однородного почвенного покрова и рабочего участка используют формулу среднегеометрических значений [Vasenev, 2015].

Для интегральной агроэкологической оценки поля (рабочего участка) с неоднородным почвенным покровом используется величина средневзвешенной интегральной оценки его отдельных контуров, с поправкой на относительное значение коэффициента неоднородности земель КН (1.2.2–1.2.6).

$$Q = \frac{КН * \sum_{j=1}^k (Q_j * S_j)}{\sum_{j=1}^k S_j} \quad (1.2.2)$$

где  $Q$  – интегральная агроэкологическая оценка поля (рабочего участка);

$Q_j$  – интегральная агроэкологическая оценка отдельных видов контуров поля (рабочего участка);

$S_j$  – площадь контуров почв  $j$ -ого вида (рода, типа), в  $км^2$ ;

$k$  – число видов контуров (видов, родов, подтипов... почв), учитываемых на обследуемой территории;

Фактор	Агроэкологические градации фактора по значениям оценки					
	1–0.96	0.95–0.76	0.75–0.51	0.50–0.26	0.25–0.01	0.0
A.	ЗЕМЛИ высокой	ЗЕМЛИ повышенной	ЗЕМЛИ средней	ЗЕМЛИ низкой	ЗЕМЛИ очень низкой	ЗЕМЛИ непродуктивные
продуктивности						
B.	с очень хорошими	с хорошими	со сравнительно хорошими	с плохими	с очень плохими	с крайне плохими
условиями обработки						
C.	однородные	слабо-	средне-	сильно-	непригодные для использования	
				неоднородные		под пашню
						в хозяйстве
D.	не требующие	требующие незначительного	требующие значительного	требующие очень значительного	требующие капитальной мелиорации	
мелиоративного улучшения						
E.	высокой	повышенной	средней	низкой	очень низкой	лишенные
устойчивости к загрязнению						
F.		условно-	не-	мало-	условно-	не-
благополучного санитарно-экологического состояния				пригодные для сельскохозяйственного использования		
G.	очень		довольно		очень	крайне
благоприятными				неблагоприятными		
агроклиматическими условиями						
H.	очень хорошим	хорошим	довольно хорошим	плохим	очень плохим	крайне плохим
режимом продуктивного влагозапаса						
Q <sub>Σ</sub>	Оптимального	Хорошего	Удовлетворительного	Неудовлетворительного	Очень плохого	Критического
АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ						

Рис. 1.2.2. Интерпретационная шкала факторов агроэкологической оценки качества почв и земель

$$KH = \frac{(KH_K - K_T)}{(KH_K - K_O)} \quad (1.2.3)$$

где  $KH$  – коэффициент агроэкологической неоднородности поля (рабочего участка);

$KH_K, KH_O, KH_T$  – критическое, оптимальное, текущее абсолютные значения коэффициента неоднородности почвенного покрова;

$$KH_T = KP_N KK_T \quad (1.2.4)$$

где  $KP_T$  – коэффициент расчлененности почвенного покрова;

$KK_K$  – коэффициент контрастности почвенного покрова;

$$KP_T = \frac{d * \sum_{j=1}^k L_j}{\sum_{j=1}^k S_j} \quad (1.2.5)$$

где  $d = 1$  км – коэффициент пересчета единиц измерения;

$L_j$  – длина границ почвенных контуров  $j$ -го вида, в км;

$$KK_T = \frac{1}{3 * y} \sum (|Q_{2i} - Q_{1i}| + |Q_{2i} - Q_{3i}| + |Q_{1i} - Q_{3i}|) \quad (1.2.6)$$

где  $y$  – число проанализированных групп параметров с групповыми оценками  $Q_j$ .

Проведенная данным образом агроэкологическая оценка почв (земель) конкретного хозяйства и рабочего участка отражает их провинциально-генетические особенности (рис. 1.2.3), что позволяет:

➤ более объективно судить об агроэкологическом качестве земель – даже в условиях неоднородного почвенного покрова участка земель;

➤ выявлять актуальные агроэкологические проблемы земледользования со сравнительной количественной оценкой приоритетности и рационального масштаба корректировки лимитирующих агроэкологических факторов и диагностических параметров агроэкологического качества земель;

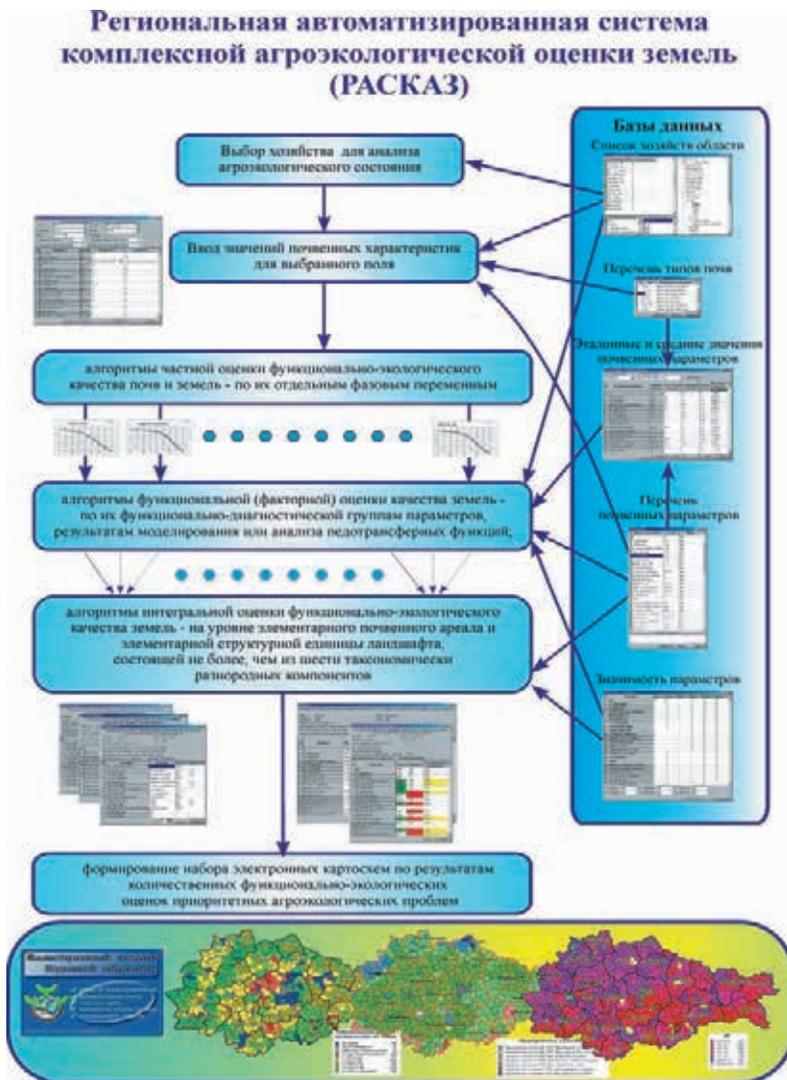


Рис. 1.2.3. Блок-схема работы программы РАСКАЗ на объектах Курской области [Васнев, Бузылев, 2010]

➤ проводить поисковое и нормативное агроэкологическое прогнозирование дальнейшего развития и вариативного решения проблемных агроэкологических ситуаций – с учетом прогнозируемого изменения определяющих их агроэкологических факторов (см. рис. 1.2.2);

➤ повысить эффективность принимаемых управленческих и технологических решений – за счет предварительного вариативного моделирования их последствий.

Региональная автоматизированная система агроэкологической оценки земель РАСКАЗ [РАСКАЗ, 2005] позволяет проводить редакцию вводимой информации и распечатку форм исходных данных и результатов. Допускает работу квалифицированного пользователя в режиме вариативного анализа («консультации») с возможностью локализации и оперативного уточнения-корректировки базы эталонов, редактирования набора анализируемых ОДП и изменения их функциональных (факторных) групп в рамках одной модели оценки.

Это упрощает адаптацию РАСКАЗа к решению новых оценочных и прогнозно-аналитических задач. Хорошая совместимость программы со стандартными электронными базами данных облегчает ее использование для расчетов больших массивов региональной информации (см. рис. 1.2.3), с трансформацией первичной информации в относительные и сопоставимые между собой агроэкологические оценки исходно разнородных по своей природе и единицам измерения почвенных характеристик – для проведения их сравнительно-агроэкологического анализа и системного прогнозирования положительного последствия планируемых агротехнологических решений.

### **Список использованной литературы**

1. Агроэкологическая оценка земель и оптимизация землепользования / Черногоров А.Л., Чекмарев П.А., Васенев И.И., Гогмачадзе Г.Д. – М.: Издательство Московского университета, 2012. – 268 с.

2. *Васенев И.И., Бузылев А.В.* Автоматизированные системы агроэкологической оценки земель. – М.: Издательство ТСХА, 2010. – 174 с.

3. Региональная автоматизированная система комплексной агроэкологической оценки земель (РАСКАЗ). Программа для ЭВМ. Авторы: Васенев И.И., Хахулин В.Г., Бузылёв А.В. Свидетельство № 2005610897 (от 14.04.05).

4. *Vasenev I.* Soil and Land Use Planning. // Task Force: Soil Matters – Solutions Under Foot. – GeoEcology Essays. CATENA VERLAG, 2015. – P. 100–104.

*Автор: Васенев И.И., РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,  
vasenev@rgau-msha.ru .*

## **Automated systems for soil and land agroecological assessment**

*I.I. Vasenev*

**Abstract:** A consolidated algorithm for the integrated assessment of the agroecological quality of agrogenically modified soils and lands is presented, including, according to the recommendation of the International Union of Soil Sciences (IUSS), framework algorithms for three main stages of assessment: particular logistic agroecological assessment of the (agro-)ecological state and/or functional quality of soils (lands) – according to their phase variables (individual diagnostic parameters); functional (factorial) agroecological assessment of soil and land quality – by integrating the results of its particular agroecological assessment; integrated agroecological assessment of soil and land quality – by integrating the results of its functional (factorial) assessment at the level of a conditionally homogeneous elementary soil area or a heterogeneous soil area of an agricultural landscape (work site).

### **1.3. Агроэкологические СППР для оптимизации систем земледелия и наилучших доступных агротехнологий**

*И.И. Васенев*

**Аннотация:** Представлено систематизированное описание операционно-алгоритмической схемы агроэкологической системы поддержки принятия решений (СППР) для оптимизации систем земледелия и вариативной корректировки наилучших доступных агротехнологий. Рассмотрена функциональная (информационно-аналитическая) блок-схема структуры рамочной агроэкологической СППР для оптимизации адаптивных систем земледелия и наилучших доступных агротехнологий. Представлена иллюстративная блок-схема анализа проблемных агроэкологических ситуаций на уровне хозяйства и рабочего участка с использованием регионально адаптированной агроэкологической СППР и локальной геоинформационной системы, созданной для хозяйства.

В условиях все более широкого распространения базовых элементов адаптивно-ландшафтных и даже прецизионных (точных) систем земледелия с дифференцированным по полям севооборотов и в пределах рабочих участков применением гибких по составу используемых форм удобрений, с ростом интереса к использованию традиционных и инновационных форм компостов, биогумуса, органо-минеральных и био-органоминеральных удобрений, удобрений и мелиорантов контролируемого пролонгированного действия растет интерес к развитию для применения в условиях крупных хозяйств своих агроэкологических систем поддержки принятия решений (СППР) для периодической корректировки-оптимизации систем земледелия и наилучших доступных агротехнологий [Цифровые технологии..., 2022].

В большинстве сельскохозяйственных районов лесостепных и степных регионов России невозможно эффективно предотвращать эрозию и потери продуктивной влаги без регулярного проведения противоэрозионных мероприятий, включая: оставление высокой стерни и/или мульчи из пожнивных остатков, периодически углубленную вспашку, чизелевание или кротова-

ние, полосное размещение культур или залуженные междурядья, узкие, широкие лесные полосы или почвозащитные валы-террасы – а они пока не имеют массового распространения.

Относительно невелико количество хозяйств, регулярно проводящих известкование кислых почв или, наоборот, применяющих гипсование для нейтрализации неблагоприятной для растений щелочной реакции среды, предотвращения осолонцевания почв и борьбы с растущими пятнами солонцеватых почв, применяющих современные технологии восстановления плодородия агрогенно эродированных и деградированных почв.

В то же время во всех сельскохозяйственных регионах страны уже накоплен положительный опыт эффективного применения практически всех выше отмеченных видов современных почво- и углерод-сберегающих агротехнологий. Необходима его поэтапная систематизация с разработкой агроэкологически обоснованных рекомендаций по дальнейшему распространению этого опыта в хозяйства с аналогичными или очень близкими почвенно-агроэкологическими и агротехнологическими условиями.

На его основе необходимо развивать рамочные и самообучающиеся системы поддержки принятия решений по агроэкологически рациональному выбору культуры, сорта, рабочего участка, локализации/оперативной корректировке гибких элементов применяемых наилучших доступных агротехнологий – с учетом агроэкологических особенностей почв конкретного участка, фиксируемых в рамках агроэкологического мониторинга и/или прогнозируемых погодных условий вегетационного периода, дифференцированных по основным фенологическим стадиям агроэкологических требований выращиваемых культур (сортов) и вариативно прогнозируемой для этих условий агроэкологической и экономической эффективности проведения гибких технологических операций (рис. 1.3.1).

В основу расчетов могут быть положены зарегистрированные алгоритмы программ ЛИССОЗ [2005] и АКОРД-Р [2012], адаптируемые к агроэкологическим условиям регионов применения, регионально-типологическим особенностям почв, агроэкологическим требованиям выращиваемых культур и сортов, агроклиматическим условиям конкретного или расчетного вегетационного периода.

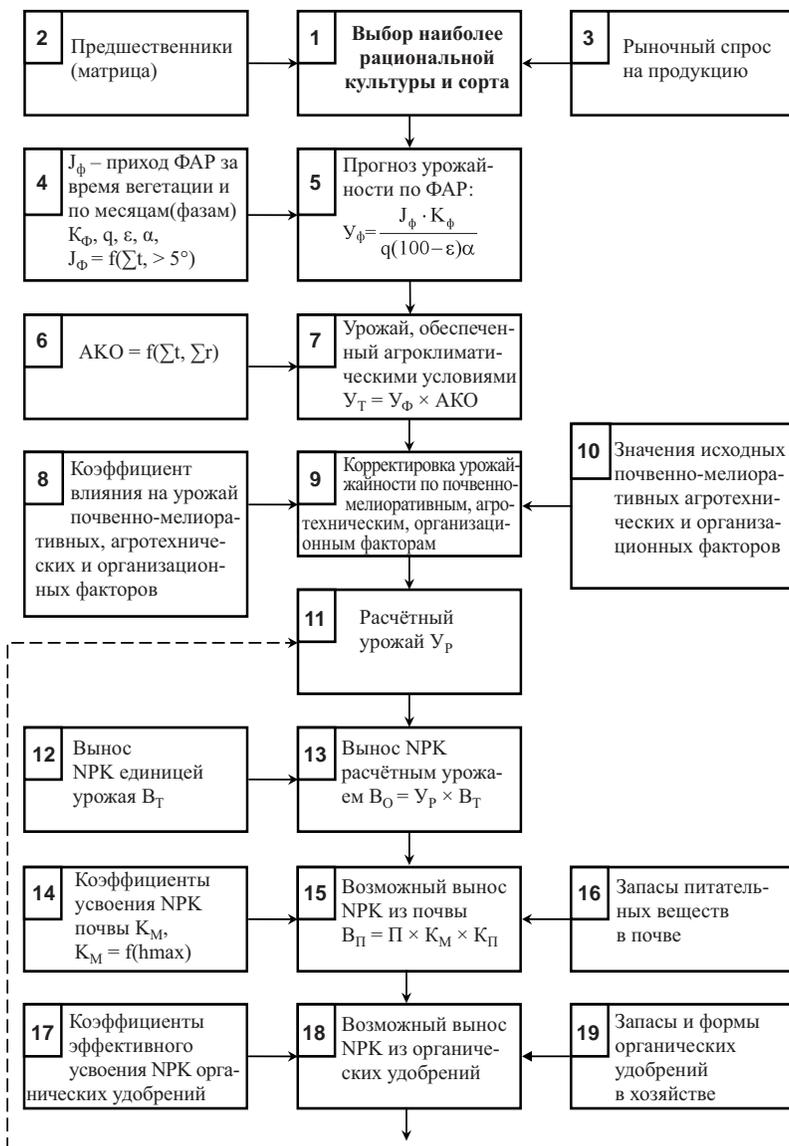


Рис. 1.3.1. Операционно-алгоритмическая схема агроэкологической СППР для оптимизации систем земледелия и наилучших доступных агротехнологий (начало)

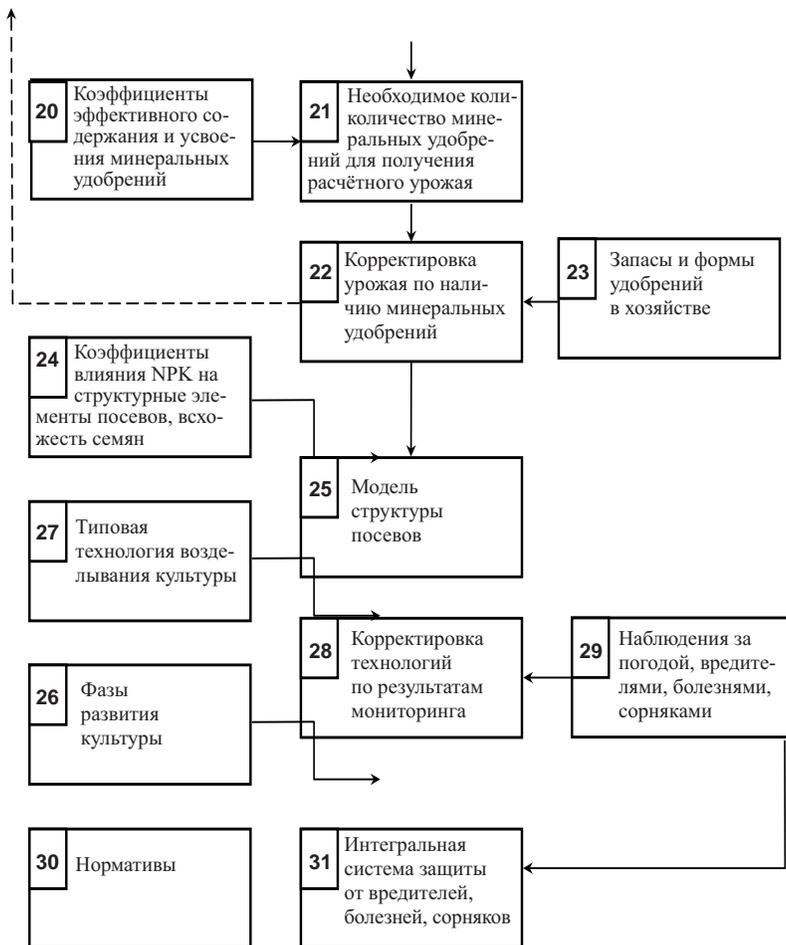


Рис. 1.3.1. Операционно-алгоритмическая схема агроэкологической СППР для оптимизации систем земледелия и наилучших доступных агротехнологий (окончание)

Приход ФАР рассчитывается по ГРИД-модели суммы активных температур с учетом экспозиции и крутизны склона конкретного участка. При расчете запасов продуктивной почвенной влаги учитываются усредненные осадки и гидрофизические характеристики исследуемых почв с возможностью их последующей детализацией.

При расчетах прогнозируемой урожайности, эффективности применяемых удобрений и технологических затрат в условиях конкретного рабочего участка используются создаваемые для региона нормативно-справочные базы данных (НСБД) и паспорта полей с агроэкологической характеристикой почв и рабочих участков (рис. 1.3.2).

Для этого привлекаются данные региональной агроклиматической базы данных и цифровой модели рельефа, создаваемых в региональной агроэкологической ГИС, агроэкологические характеристики и требования анализируемой культуры (желательно, и сорта) и компьютерного агроклиматического справочника – обрабатываемые по алгоритму (1.3.1).

$$Y_j = 10^6 \times \sum(F_i \times d_i) \times K_f / (Q_j \times L_j (100 - \varepsilon_j)), \quad (1.3.1)$$

где:  $Y_j$  – потенциальная урожайность культуры, обеспеченная приходом ФАР за ее вегетационный период в условиях данного рабочего участка, ц/га;

$F_i$  – приход ФАР за  $i$ -й месяц, кдж/га;

$d_i$  – относительная длительность вегетации культуры в  $i$ -м месяца (НСБД);

$K_f$  – редактируемый коэффициент использования ФАР посевом, %;

$Q_j$  – калорийность урожая  $j$ -й культуры, кдж/кг ((НСБД));

$L_j$  – сумма частей в отношении основной продукции к побочной (НСБД);

$\varepsilon_j$  – стандартная влажность культуры  $j$ , %;

$j$  – номер культуры;

$$F_i = a_{Fi} + b_{Fi} \times y \times (S_{>10^\circ\text{C}}) \quad (1.3.1a)$$

где:  $a_{Fi}$ ,  $b_{Fi}$  – константы из региональной агроэкологической нормативно-справочной базы данных (НСБД);

## Локальная информационно-справочная система по оптимизации земледелия (ЛИССОЗ)

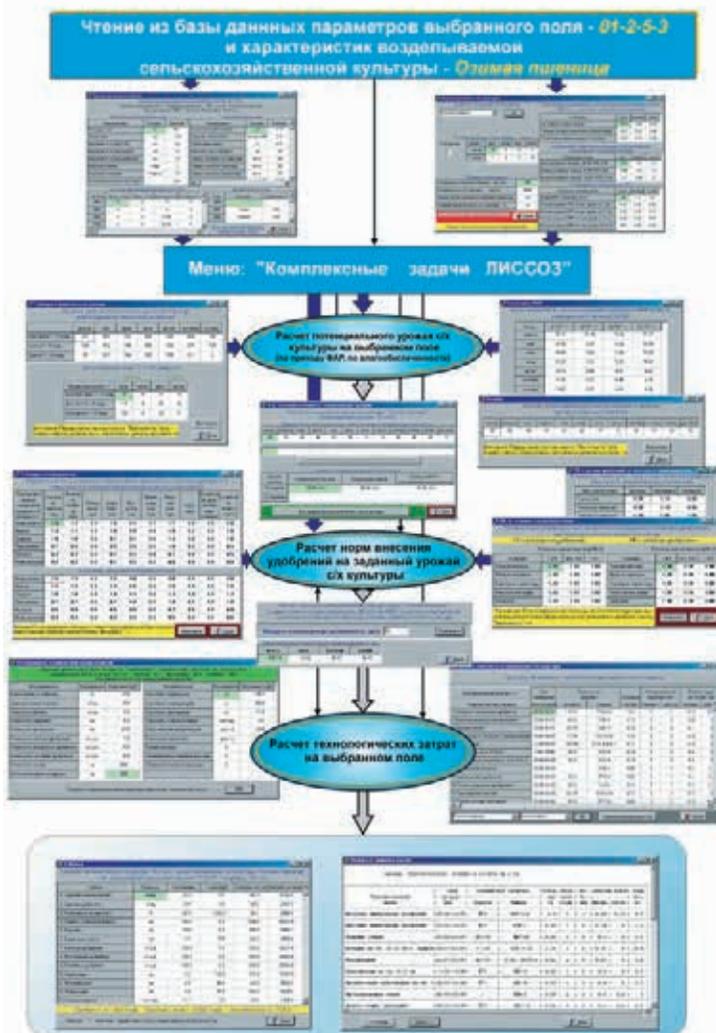


Рис. 1.3.2. Функциональная (информационно-аналитическая) блок-схема структуры рамочной агроэкологической СППР для оптимизации адаптивных систем земледелия и наилучших доступных агротехнологий

$$y = 1 + 0.010 \times b \quad \text{– для северной экспозиции;} \quad (1.3.16)$$

$$y = 1 - 0.014 \times b \quad \text{– для южной экспозиции;}$$

$$y = 1.0 \quad \text{– для восточной или западной экспозиции;}$$

$b$  – крутизна склона, град.;

$S_{>10^{\circ}\text{C}}$  – сумма температур более  $10^{\circ}\text{C}$  за  $i$ -й месяц;  $i = \{4, 10\}$  – номер месяца.

**Расчет потенциальной урожайности по 2-му лимиту плодородия** (влагообеспеченности культуры) выполняется на основе экспериментальных или расчетных данных по сезонной динамике продуктивной влаги и общим запасам продуктивной влаги за период вегетации – согласно алгоритму (1.3.2).

$$Y_{jw} = 10^5 \times W_j / (K_j \times L_j \times (100 - \varepsilon_j)), \quad (1.3.2)$$

где:  $Y_{jw}$  – потенциальная урожайность культуры, обеспеченная общим запасом продуктивной влаги за период вегетации в условиях данного рабочего участка, ц/га;

$K_j$  – коэффициент водопотребления, мм га / ц продукции (НСБД).

В расчетах используются адаптированные к условиям региона педотрансферные функции сезонной динамики продуктивной влаги, учитывающие ее зависимости от сезонного и регионального распределения осадков, испаряемости и радиационного баланса территории конкретного рабочего участка, оцениваемого в данном случае.

**Расчет урожайности с учетом ресурсных и лимитирующих почвенных условий** (3-й и 4-й лимиты плодородия) выполняется на основе уточненных данных агроклиматически обеспеченной урожайности, с учетом основных ресурсных и лимитирующих показателей почв из агроэкологической БД по земельным участкам, региональных БД агроэкологических характеристик и требований культур и почвенно-агроэкологических нормативно-справочных БД (НСБД) информационно-аналитического модуля агроэкологической ГИС – согласно алгоритму (1.3.3).

$$Y_{jr} = Y_{jw} \times (B_s / 100) \times K_{s6} \times K_{sl} \quad (1.3.3)$$

где  $Y_{jr}$  – потенциальная урожайность культуры, обеспеченная общим запасам продуктивной влаги за период вегетации с уче-

том агроэкологических особенностей почв в условиях данного рабочего участка, ц/га;

$B_s$  – обобщенный балл бонитета s-о типа (подтипа, рода) почвы (НСБД);

$K_{сб}$  – поправочный коэффициент на базовые свойства почв (алгоритмы 1.3.3а, 1.3.3б);

$K_{сл}$  – коэффициент снижения урожайности за счет лимитирующих факторов почв (эрозии, подкисления, засоления и т.п. – алгоритм 1.3.3в).

$$K_{сб} = m \Pi(K_{сбi}) / \sum(\Pi(K_{сбi}) / K_{сбi}) \quad (1.3.3а)$$

где  $m$  – число проанализированных  $i$ -ых параметров;

$$K_{сбi} = 1 + (\Delta B_{ср} / B_{ср}) \times (P_{sti} - P_{срi}) / \Delta P_{ср} \quad (1.3.3б)$$

где  $\Delta B_{ср}$  и  $B_{ср}$  – среднерегionalный интервал варьирования и среднерегionalное значение бонитета s-ой почвы;

$\Delta P_{ср}$ ,  $P_{sti}$  и  $P_{срi}$  – среднерегionalный интервал варьирования, текущее и среднерегionalное значение  $i$ -ого параметров s-ой почвы (НСБД).

$$K_{сл} = \min(K_{сли}) \quad (1.3.3в)$$

где  $K_{сли}$  для проанализированных  $i$ -ых параметров s-ой почвы получаются в результате сопоставления данных по участку с нормативными значениями из соответствующих таблиц региональной НСБД.

Агроэкологическая оптимизация перспективного и ежегодно планируемого размещения сельскохозяйственных культур, районированных сортов и гибридов требует количественного учета их агроэкологических требований и соответствующих им показателей агроэкологического качества земель доступных участков, что позволяет существенно повысить эффективность локализованных к ним агротехнологий (рис. 1.3.3) и существенно снизить до приемлемых значений экологические риски земледелия – с учетом результатов агроэкологической оценки предшественников, рельефа, агроклиматически и почвенно-агроэкологической обеспеченности урожайности сорта.

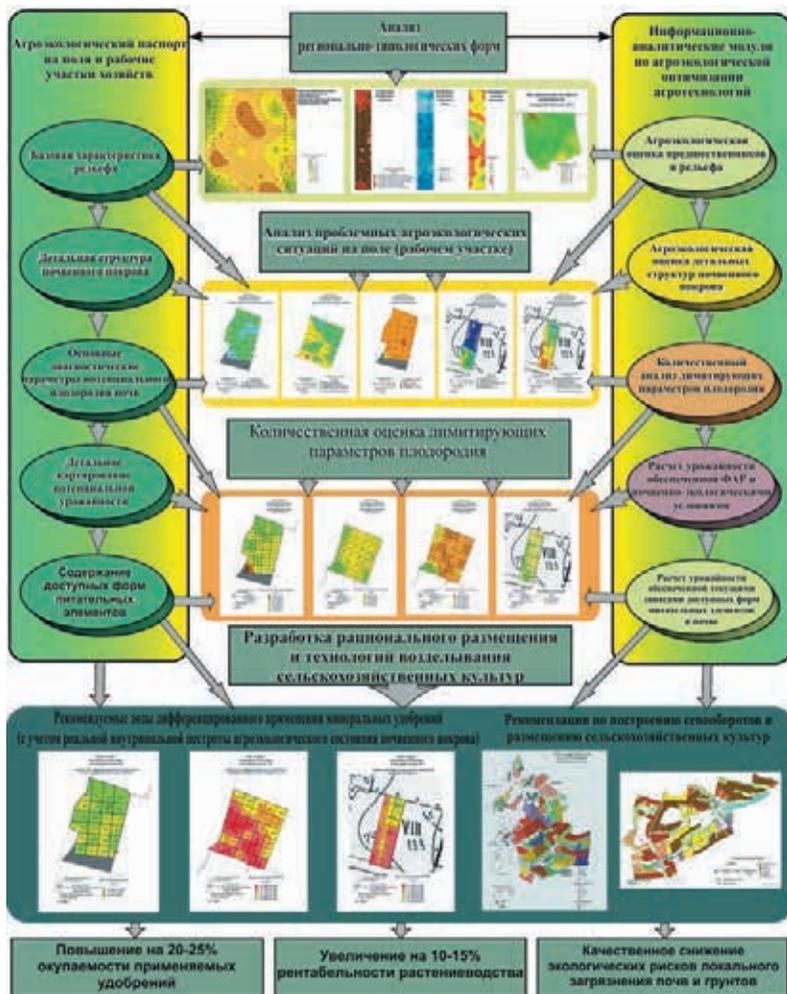


Рис. 1.3.3. Иллюстративная блок-схема анализа проблемных агроэкологических ситуаций на уровне хозяйства и рабочего участка с использованием регионально адаптированной агроэкологической СППР и локальной ГИС

## **Список использованной литературы**

1. Автоматизированный комплекс агроэкологической оптимизации районированных систем земледелия «АКОРД-Р»: Программа для ЭВМ. Авторы: Васенев И.И., Бузылёв А.В., Васенев В.И. Свидетельство о регистрации № 2012612944 (от 9.06.2012).

2. Локальная информационно-справочная система по оптимизации земледелия в хозяйстве – ЛИССОЗ / Васенёв И.И., Руднев Н.И., Хахулин В.Г., [и др.]. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005610898. – 2005.

3. Цифровые технологии агроэкологического мониторинга и оптимизация земледелия / Под ред. И. И. Васенева. – М.: РГАУ-МСХА, 2022. – 240 с.

*Автор: Васенев И.И., РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,  
vasenev@rgau-msha.ru .*

## **Agroecological DSS to optimize farming systems and the best available agricultural technologies**

*I.I. Vasenev*

**Abstract:** A systematic description of the operational and algorithmic scheme of the agroecological decision support system (DSS) for optimizing farming systems and variable correction of the best available agricultural technologies is presented. A functional (information and analytical) block diagram of the structure of the agroecological framework DSS for optimizing adaptive farming systems and the best available agricultural technologies is considered. An illustrative flowchart for the analysis of problematic agroecological situations at the farm and work site level using a regionally adapted agroecological DSS and a local geoinformation system created for the farm is presented.

#### 1.4. Региональные агроэкологические геоинформационные системы

*И.И. Васенев*

**Аннотация:** Рассмотрены современные факторы и приоритетные задачи развития региональных агроэкологических ГИС с целевой функцией прогноза урожайности выращиваемых культур. Описаны агроэкологические пакеты базовых и специализированных электронных карт и картосхем региональной геоинформационной системы агроэкологической оценки качества земель. Обсуждается информационно-методическая основа взаимодействия ГИС с регионально адаптированными системами поддержки принятия решений по агроэкологической оптимизации выбора и корректировки почво- и углерод-сберегающих агротехнологий на уровне региона, района, хозяйства и поля.

Региональные агроэкологические геоинформационные системы (ГИС) становятся платформой функционально-целевой интеграции/систематизации регионально адаптированного информационно-методического обеспечения, необходимого для агроэкологической оптимизации земледелия и агротехнологий в условиях ускоряющихся глобальных изменений климата, рынка продукции и технологий, потенциально доступных для предприятий АПК России [Цифровые технологии..., 2022]. Важной целевой задачей развития региональных и локальных агроэкологических ГИС стал долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный поисковый и нормативный прогноз потенциальной урожайности основных сельскохозяйственных культур и, желателно, сортов (табл. 1.4.1).

Повышенная актуальность специализированного геоинформационного обеспечения для агроэкологической оценки сельскохозяйственных земель обусловлена высокой динамикой текущей структуры их использования, функционального качества и экологического состояния земель, быстрым обновлением современной селекционно-сортовой, материально-технической и технологической базы сельскохозяйственного производства, рыночного спроса и научно-информационного обеспечения АПК [Укрепление..., 2019].

Таблица 1.4.1. Современные факторы и задачи развития региональной агроэкологической ГИС с целевыми функциями прогноза урожайности выращиваемых культур

Основные факторы активизации социально-экономического спроса	Целевые задачи развития и функции региональной агроэкологической ГИС
<ul style="list-style-type: none"><li>– Технологическая революция и модернизация АПК;</li><li>– Рост рентабельности и капитализации землепользования сельхозтоваропроизводителей;</li><li>– Возрастание «цены» реализации агроэкологических рисков землепользования;</li><li>– Востребованность нормативных агроэкологических прогнозов для эффективного планирования землепользования;</li><li>– Растущий спрос на программы агроэкологической оптимизации земледелия и агротехнологий.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Агроэкологическая типизация земель и структур почвенного покрова;</li><li>– Разработка районированных шкал и нормативов агроэкологической оценки земель для прогноза урожайности;</li><li>– Разработка, верификация, локализация местных алгоритмов и моделей оценки земель для прогноза урожайности;</li><li>– Агроэкологическое нормирование и создание автоматизированных систем агроэкологической оценки земель для экспертизы проектов землепользования;</li><li>– Геоинформационно-методическое обеспечение агроэкологической оптимизации землепользования.</li></ul>

Геоинформационный анализ агроэкологического качества полевых и земельных участков предполагает системное исследование, обобщение, пространственно-временную интерполяцию, экстраполяцию и прикладную агроэкологическую интерпретацию разноплановой информации по характеристике агроклимата, эрозии и другим процессам деградации почв, составу и структуре почвенного покрова, гидрофизическим, агрофизическим, агрохимическим параметрам почв, типу микро- и мезо- рельефа, почвообразующих пород, грунтовых вод, структуре земельных угодий и севооборота, текущим агротехнологиям и /или истории землепользования.

Вся доступная землеоценочная информация поэтапно интегрируется в единую региональную агроэкологическую геоинформационную систему оценки земель. Ее геоинформационную основу составляют тематические пакеты базовых и специализированных электронных карт и картосхем:

а) базового административного землеустройства на уровне районов;

б) агроклиматического районирования земель по среднегодовому количеству осадков, сумме активных температур, вегетационному периоду основных сельскохозяйственных культур

тур, основным агроклиматическим рискам растениеводства и степени неоднородности микроклимата;

в) базовых слоев рельефа (в масштабе 1:200 000) с указанием преобладающих типов мезорельефа – с количественным ранжированием их показателей по влиянию на агроэкологическое качество земель и указанием ареалов распространения проблемных геоморфологических ситуаций;

г) почвообразующих пород – с указанием ареалов преобладания основных типов пород, глубины залегания подстилающих пород и процентного участия неплодородных пород, оказывающих серьезное влияние на агроэкологическое качество почв и земель;

д) доминирующих структур почвенного покрова (СПП) – с выделением агроэкологических групп основных мезо- и микрокомбинаций в структуре почвенного покрова и указанием преобладающих соотношений между их компонентами;

е) основных ресурсных факторов агроэкологического качества почв – включая среднесезонные запасы продуктивной влаги, текущее содержание и запасы гумуса и доступных форм макро- и микроэлементов питания, с элементами эскизного районирования территории по основным почвенно-гидрофизическим и почвенно-агрохимическим группам земель;

ж) лимитирующих факторов агроэкологического состояния земель – включая эрозию, агрофизическую и агрохимическую деградацию почв, их фитосанитарное состояние, основные виды загрязнения и агротехногенной деградации, риски сезонного иссушения, переуплотнения и т.п.

Почвенно- и/или ландшафтно-географическая координация объектов агроэкологической оценки обеспечивает корректное сопоставление данных по объекту оценки разных лет и источников информации между собой и с соответствующими нормативными данными (шкалами оценки).

Последние могут иметь провинциально-генетическую, литолого-геоморфологическую, агротехнологическую дифференциацию и, в идеале, быть районированы в соответствии с системой агроэкологического районирования природного или административного региона [Агроэкологическая оценка..., 2012; Цифровые технологии..., 2022].

Точная идентификация объекта анализа в системе административно-хозяйственной организации территории может ав-

томатически обеспечить воспроизведение его точной привязки на всех выходных формах анализа и при формировании соответствующих записей в агроэкологических базах данных и паспортах (если они были заведены).

Часто она также является наиболее функциональным «ключом» к определению точного почвенно- и ландшафтно-географического адреса объекта – при формировании в базе знаний редактируемой системы правил соответствия административно-хозяйственных территориальных единиц элементарным выделам агроэкологического районирования и привязанной к ним базы агроэкологических нормативов.

Выбор произвольного объекта анализа в настроенной на конкретный регион агроэкологической ГИС предусматривает быстрое автоматическое определение его основных агроэкологических (почвенно-географических, ландшафтных, агроклиматических и т.п.) координат.

Идентификация структурно-иерархической организации объекта анализа автоматически выбирает или сужает исходную базу выбора используемого при его анализе набора алгоритмов. Окончательное определение ряда включенных в анализ конкретного объекта алгоритмов оценки происходит при выборе раскрывающихся в ГИС меню актуального перечня решаемых (комплексных или автономных) оценочных или прогностических задач, включенных в их решение факторов оценки и основных диагностических показателей оценки этих факторов.

Динамический анализ агроэкологического качества земель требует поэтапного развития агроэкологических моделей продукционного процесса, миграции и трансформации почвенных растворов органического углерода, элементов питания и поллютантов по профилю почвы и за его пределами, трансферных функций преобразования доступной информации в основные диагностические параметры качества почв и земель.

Первоочередными задачами становятся агроэкологическая типизация почв/структур почвенного покрова, формирование районированной системы агроэкологических нормативов оценки почв и земель (с дифференциацией по основным сельскохозяйственным культурам и группам сортов), разработка, региональная верификация и локализация основных алгоритмов и моделей оценки, создание геоинформационных прогнозно-ана-

литических подсистем агроэкологической оценки земель и оптимизации земледелия рамочного типа – с легко реализуемой возможностью их детализации и модификации.

Повышенная актуальность разработки и районирования базовых элементов рамочной агроэкологической ГИС с целевыми функциями прогноза потенциальной урожайности основных сельскохозяйственных культур (рис. 4.1.1) обусловлена необходимостью оперативного решения комплексных задач оптимального размещения культур, проектирования и корректировки агротехнологических операций.

В условиях быстрого нарастания информатизации и глобализации сельскохозяйственного производства ясно выражена мировая тенденция к повышению уровня методологической универсализации, технологической унификации и функциональной детализации создаваемого информационно-аналитического обеспечения для агроэкологической оценки земель различного территориального уровня.

Разработанная в Лаборатории агроэкологического мониторинга, моделирования и прогнозирования экосистем (ЛАМП) РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в рамках выполнения проекта компании Барилла [Васенев и др., 2019] рамочная агроэкологическая ГИС с целевой функцией поискового и вариативного прогноза агроклиматически и почвенно-агроэкологически обеспеченной потенциальной урожайности твердой пшеницы развивается на языке python и представляет собой одностраничное веб приложение (находится в «облаке»).

В качестве http сервера выступает связка из gunicorn и nginx. Генерация статических элементов html осуществляется микрофреймворком Flask. Исходные данные для расчетов хранятся в системе управления базами данных MariaDB. Обновление интерфейса в реальном времени реализуется набором Javascript библиотек React.js и Plotly (основан на D3.js). Для оформления элементов интерфейса используются отдельные элементы CSS библиотеки Twitter Bootstrap. За обновление интерактивной карты отвечает библиотека MapBox GL JS.

Базовым элементом региональной агроэкологической ГИС в условиях нарастающих глобальных изменений климата становится агроклиматический модуль геоинформационной системы (рис. 1.4.1), разрабатываемый на основе системного анализа



Рис. 1.4.1. Стартовый интерфейс региональной агроэкологической ГИС с функцией прогнозирования урожайности твердой пшеницы

данных дистанционного зондирования с периодической локальной корректировкой результатов регионально распределенных смарт-систем агроэкологического мониторинга с оперативным анализом данных суточной и сезонной динамики агроэкологического состояния почв и посевов на наиболее агроэкологически представительных и проблемных участках.

Информационную основу рамочных региональных агроэкологических ГИС в рамках их взаимодействия с регионально адаптированными системами поддержки принятия решений по агроэкологической оптимизации выбора и корректировки почво- и углерод-сберегающих агротехнологий составляет систематизированная в специализированных базах данных информация для решения основных прогнозно-аналитических и проектно-технологических задач на уровне региона, района и отдельного хозяйства:

а) агроэкологические требования выращиваемых в регионе культур и их районированных сортов;

б) методические разработки по количественному анализу актуального влияния лимитирующих агроэкологических факторов на производственный процесс и урожайность;

в) технологические карты по основным сельскохозяйственным культурам – с выделением обязательных и факультативных операций, ранжированием гибких элементов агротехнологии и указанием агроэкологических условий их дифференциации;

г) рациональная (минимально-достаточная) система установленных норм основных производственных затрат, оперативно уточняемых цен на статьи расхода и готовую продукцию.

К наиболее востребованным на практике прогнозно-аналитическим и проектно-технологическим задачам, решаемым в рамках агроэкологических ГИС, относятся:

■ проверка на абсолютные ограничения – возможность/невозможность применения рассматриваемого варианта землепользования, культуры, сорта, агротехнологии в условиях конкретного района, хозяйства или участка;

■ количественная и/или качественная оценка потенциальных прямых и косвенных, положительных и отрицательных результатов землепользования – например, урожайности, качества продукции, затрат на ее получение и/или последующее восстановление агрогенно деградированного качества почв (земель);

■ прогноз вероятного недобора урожая или возрастающих затрат – на основе системного анализа доступной агроклиматической и почвенно-агроэкологической информации согласно применяемому набору критериев и алгоритмов агроэкологической оценки;

■ расчет планируемых агротехнологических затрат (прямых, косвенных, стабильных, варьирующих) – с различным уровнем детальности для разных комбинаций «культура (сорт) – агротехнология – погодные условия»;

■ сравнительный анализ показателей экономической эффективности разных систем земледелия и наилучших доступных почво- и углерод-сберегающих агротехнологий – с учетом или без учета кредитной ставки и предполагаемых средств государственной поддержки.

Для количественной оценки прогнозируемых в текущем (следующем) году агроэкологических рисков земледелия используются адаптированные к условиям конкретного агроландшафта динамические или функциональные модели производственного процесса. Количественная оценка экологических рисков загрязнения и засоления получается с помощью адаптированных к местным условиям педодинамических моделей миграции и трансформации растворов и содержащихся в них веществ.

Применение динамических моделей позволяет имитировать дискретно-непрерывный характер природных явлений, с выявлением ряда «критических точек» нарушения непрерывности (например, иссушение почвы до уровня неподвижной влаги). С их помощью проводятся оценочные расчеты статей и основных составляющих балансовых моделей – учитывая процессы водной миграции, перемещения и трансформации основных элементов питания и веществ в почве и экосистеме (вода, углерод, азот, соли, пестициды и т.п.).

Агроэкологические модели оценки агроэкологического качества почв и земель, агроэкологических, гидрофизических и геохимических функций находят все более широкое применение и активно развиваются. В последние годы очень остро стоят вопросы региональной верификации и локализации различных моделей – для их адаптации и использования в новых условиях и на новых объектах, а также для решения с их помощью новых задач.

К доминирующим трендам современного развития агроэкологических моделей, связываемых с агроэкологическими ГИС, относятся:

а) повышение роли базовых почвенных и ландшафтных характеристик;

б) учет влияния провинциально-генетического разнообразия почв и земель;

в) активное использование функциональных моделей с полуколичественным и количественным описанием региональных закономерностей поведения агроэкологических функций;

г) широкое применение статистически обоснованных трансферных функций, оперативно рассчитывающих значения трудно определяемых переменных по массово и легко определяемым данным;

д) универсализация основных применяемых алгоритмов анализа данных;

е) создание гибких систем анализа с функцией самонастройки используемых в них алгоритмов на различных этапах агроэкологической оценки;

ж) применение современных программных средств визуализации данных и диалогового режима работы информационно-аналитических модулей;

з) совместное использование агроэкологических ГИС, автоматизированных систем оценки и пространственно организованных баз данных;

и) внедрение автоматизированных модулей агроэкологической оценки почв и земель в специализированные системы производственного мониторинга, автоматизированного проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия, их корректировки и агроэкологической оптимизации на уровне от хозяйства до целого региона.

Наличие интегрированных систем агроэкологического мониторинга, районирования и оценки почв (земель) с учетом их зонально-региональных особенностей, функционально-экологической систематизацией параметров оценки, районированной системы эталонов при автоматизированном анализе унифицированных алгоритмов оценки значительно повышает оперативность и вариативность разрабатываемых рекомендаций

по выбору наилучшего для данного участка сорта и агроэкологической оптимизации агротехнологии в условиях глобальных изменений климата, с выбором наилучшей доступной почво- и углерод-сберегающей агротехнологии, потенциально адаптируемой для условий конкретного поля и хозяйства.

### **Список использованной литературы**

1. Агроэкологическая оценка земель и оптимизация землепользования / Черногоров А.Л., Чекмарев П.А., Васенев И.И., Гогмачадзе Г.Д.– М.: Издательство Московского университета, 2012. – 268 с.

2. *Васенев И.И.* Анализ лимитирующих агроэкологических факторов урожайности и качества твердой пшеницы в засушливых условиях / Васенев И.И., Бесалиев И.Н., Мальчиков П. Н., Шутарева Г.И., Джанчаров Т.М., Морев Д.В., Ярославцев А.М., Курашов М.Ю. // *Достижения науки и техники АПК.* – 2019. – № 12 (т. 33). – С. 30–37.

3. Укрепление продовольственной безопасности и создание устойчивых продовольственных систем в Евразии: достижения и перспективы / Под ред. С.А. Шобы. – М.: Евразийский центр по продовольственной безопасности, 2019. – 89 с.

4. Цифровые технологии агроэкологического мониторинга и оптимизация земледелия / Под ред. И. И. Васенева. – М.: РГАУ-МСХА, 2022. – 240 с.

*Автор: Васенев И.И., РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,  
vasenev@rgau-msha.ru .*

### **Regional agroecological geoinformation systems**

*I.I. Vasenev*

**Abstract:** Modern factors and priority tasks of the development of regional agroecological GIS with the target function of forecasting the yield of cultivated crops are considered. Agroecological packages of basic and specialized electronic maps of the regional geoinformation system for agroecological assessment of land quality are described. The information and methodological basis for the interaction of GIS with regionally adapted decision support systems for agroecological optimization of the selection and adjustment of soil- and carbon-saving agrotechnologies at the regional, district, farm and field levels is discussed.

## **1.5. Геоинформационное обеспечение региональных систем агроэкологического мониторинга и СППР**

*И.И. Васенев*

**Аннотация:** Представлено систематизированное описание геоинформационного обеспечения агроэкологических задач. Изложено последовательное решение научно-изыскательских и проектных задач формирования региональных и локальных агроэкологических систем ГИС-обеспечения ведения адаптивно-ландшафтного земледелия и оптимизации наилучших доступных агротехнологий. Рассмотрены региональные базы данных и ГИС для агроэкологического районирования земель и перспективы развития информационного обеспечения агроэкологического моделирования и районирования.

### **1.5.1. Геоинформационное обеспечение агроэкологических задач**

Повышенная актуальность геоинформационно-методических вопросов ускоренной разработки, региональной адаптации-локализации и массового внедрения рамочных элементов ГИС-обеспечения адаптивно-ландшафтных систем земледелия разного уровня (рис. 1.5.1) обусловлена необходимостью оперативного решения сложных задач системного анализа и визуализации географически привязанной и тематически разноплановой информации – при проектировании и текущей корректировке ключевых элементов адаптивно-ландшафтных систем земледелия, агротехнологических карт и/или вариантов агротехнологий, обеспечивающих устойчиво оптимальную рентабельность и минимальные риски производства в хозяйстве.

Специализированное региональное геоинформационное обеспечение для проектирования и освоения адаптивно-ландшафтных систем земледелия ориентировано на решение проектных и оперативных задач оптимизации агротехнологий земледелия в рамках определенного административного (или природно-хозяйственного) региона, включает рационально адаптированные алгоритмы оптимизационных решений (учитывающие местную специфику хозяйств и рабочих участков региона) и содержит необходимую нормативно-справочную

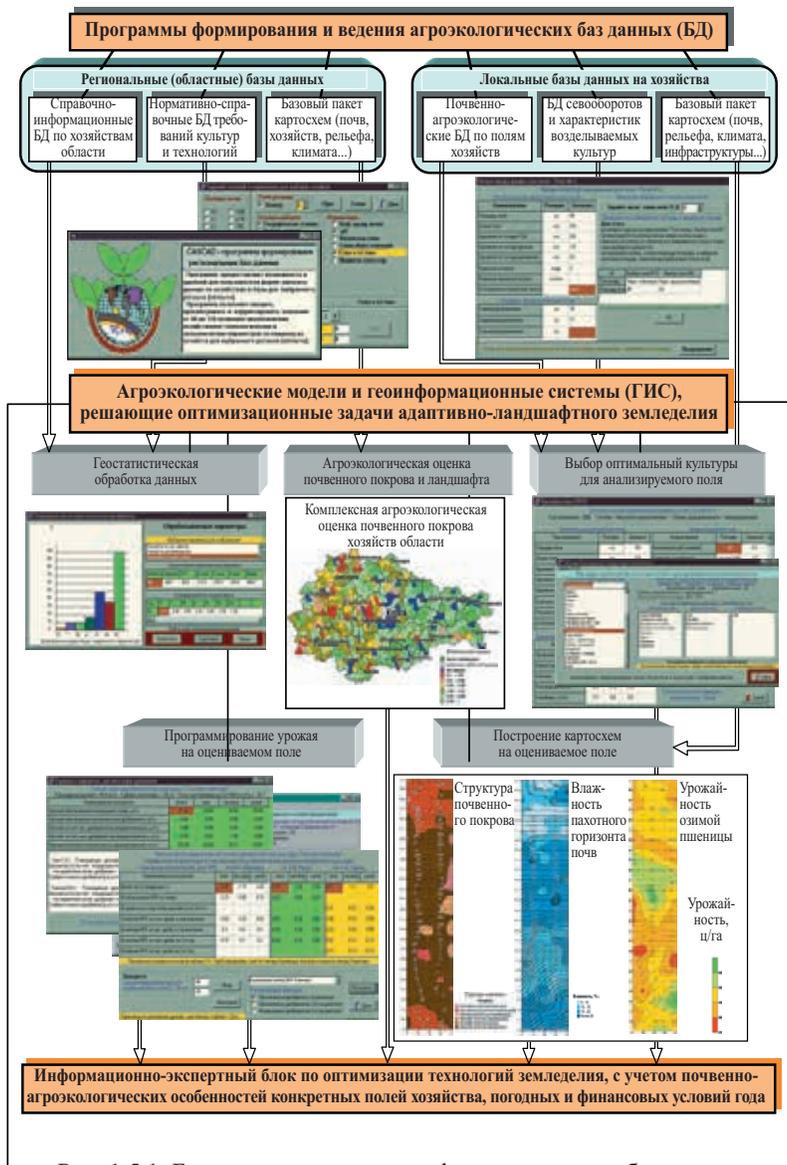


Рис. 1.5.1. Базовые элементы геоинформационного обеспечения адаптивно-ландшафтных систем земледелия разного уровня

информацию для эффективного решения оптимизационных и проектных задач в условиях конкретных хозяйств региона и инструментарий для ее оперативной корректировки и занесения.

Геоинформационное обеспечение задач проектирования и освоения адаптивно-ландшафтных систем земледелия на уровне хозяйства включает: (а) базовый пакет оцифрованных картосхем землеустройства, рельефа, агроклимата, почвенного покрова, природоохранной и производственной инфраструктуры хозяйства; (б) БД почвенно-агроэкологической информации по полям (рабочим участкам) хозяйства, отраженным на карте землеустройства и почвенно-ландшафтной карте; (в) информационно-аналитические модули автоматизированного решения проектных и оперативных задач адаптивно-ландшафтного земледелия; (г) базовые модули общей системы управления базами данных, обеспечивающие оперативную запись, корректировку, обмен, считывание, выборку, представление, распечатку и визуализацию информации (рис. 1.5.1).

### **1.5.2. Формирование региональных систем геоинформационного обеспечения агроэкологических задач.**

Формирование региональных систем ГИС-обеспечения адаптивно-ландшафтного земледелия подразумевает последовательное решение научно-изыскательских и проектных задач.

Подбор, оцифровка базового картографического материала охватывает среднемасштабные (1:200 000 – 1: 500 000) карты землепользования, рельефа, почвенного покрова и существующих схем районирования. При получении доступных оцифрованных карт проводится их проверка, корректировка и уточнение. Наряду с этим, создаются отдельные слои точечных объектов (в частности – станций и пунктов метеонаблюдений).

Формирование агроэкологических баз данных по хозяйствам области (региона) предусматривает уточнение стандартной (рабочей) структуры БД и ее заполнение – по картам землепользования, архивным материалам Бюро Земкадастра (Земпроекта), статистической отчетности, генерализованным почвенным и агрохимическим картам, региональным обзорам.

Верификация базовых расчетных алгоритмов и структуры нормативно-справочных БД – с учетом агроэкологических осо-

бенностей земель региона, основного набора выращиваемых культур, их агроэкологических требований и технологий их выращивания.

Формирование нормативных баз данных включает региональные БД агроэкологических требований культур, электронный агроклиматический справочник, районированные БД используемых в аналитических алгоритмах геоинформационного обеспечения агрохимических, агрофизических, агроэкологических и экономических нормативов и коэффициентов.

Формирование расчетных агроэкологических карт, прогнозов, оценок, систем районирования земель, нормативов, используемых в информационно-аналитических модулях регионального и локального геоинформационного обеспечения адаптивно-ландшафтных систем земледелия. При создании карт активно используются логические или алгебраические операции со слоями базового картографического материала и данными агроэкологических БД – в системах растровых ГИС-приложений.

Создание основных форм ввода-вывода табличной и картографической информации – основывается на формате данных анализируемой информации, основном перечне прогнозируемых агроэкологических проблем и плановых технологических решений, согласовывается со структурой полей хозяйства (отделения, бригады, поля, участки ...) и технологией автоматизированного формирования и обновления их содержания.

Решение технологических вопросов автоматизированного обновления табличной и картографической информации, обмена агроэкологическими данными с сопряженными системами регионального и локального уровня.

### **1.5.3. Формирование локальных систем геоинформационного обеспечения агроэкологических задач.**

Формирование локальных систем ГИС-обеспечения адаптивно-ландшафтного земледелия подразумевает последовательное выполнение ряда научно-изыскательских и проектных операций.

Подбор и оцифровка базового картографического материала включает крупномасштабные (от 1:10 000 до 1: 25 000) карты землеустройства, рельефа (изолинии на топографической или

землеустроительной карте), почвенного покрова (почвенная или почвенно-ландшафтная карта), дорожной сети и производственной инфраструктуры (с топографической, землеустроительной карты), разномасштабные материалы дистанционного зондирования. При необходимости проводится инструментальное уточнение координат точек и границ – с помощью спутникового навигатора. На их основе в локальной ГИС выполняется согласование (расчетная корректировка) основных границ и привязок исходно разнородного картографического материала.

Создание производных карт агроэкологических условий:

- крутизны, экспозиции и формы склонов – по изолиниям рельефа;
- агроклимата – на основе карт рельефа и региональной БД по климату.

Формирование первичной агроэкологической базы данных по полям и рабочим участкам хозяйства (агрландшафтными выделам на его территории). Уточнение-детализация стандартной (рамочной) структуры базы данных и ее заполнение – по материалам целевых полевых обследований, почвенных и агрохимических карт, предыдущих землеустроительных и мелиоративных проектов, планов освоения и ведения систем земледелия, технологических карт, книг истории полей и опроса специалистов.

Верификация и уточнение (с учетом особенностей хозяйств) расчетных алгоритмов и нормативно-справочных БД для агроэкологической типизации земель и адаптивно-ландшафтного землеустройства;

Создание проектных агроэкологических карт:

- агроэкологической типизации земель – на основе карт рельефа, климата, почв (почвенно-ландшафтной карты), данных дистанционного зондирования и полевых обследований (первичного, основного и проблемных ситуаций), алгоритмов расчета и первичной агроэкологической БД по полям и участкам хозяйства;
- нового землеустройства, с выделением полей и рабочих участков – на основе карты агроэкологической типизации земель, специализации хозяйств, требований выращиваемых в хозяйстве культур, регламентов земледелия и консультаций со специалистами и руководителями хозяйства.

Уточнение структуры и заполнение-корректировка агроэкологической БД проекта – по обновленной системе полей (рабочих участков) хозяйства (на основе обновленных карт землеустройства проекта, агроэкологической типизации земель, структуры и материалов первичной агроэкологической БД, материалов полевых обследований и специальных расчетов).

Создание оценочных агроэкологических карт:

– агрохимического состояния земель (содержания гумуса, подвижных форм NPK и, по дополнительным показаниям, экологически лимитирующих мезо- и микроэлементов, основных диагностических показателей почвенного поглощающего комплекса – кислотности или щелочности, солонцеватости, ...) – на основе карты землеустройства, табличных материалов почвенно-агрохимического обследования;

– фитосанитарного состояния земель и посевов (включая общий уровень засоренности и доминирующие виды сорняков, текущее и/или потенциальное распространение вредителей и болезней) – на основе карты землеустройства, табличных материалов фитосанитарного обследования, специальных расчетов и текущих наблюдений.

Адаптация к условиям и задачам исследуемого хозяйства основных форм ввода и вывода информации, местных нормативов и коэффициентов – на основе стандартных форм рамочной структуры локальных систем ГИС-обеспечения адаптивно-ландшафтных систем земледелия, районированной системы нормативов, опроса специалистов, местных особенностей хозяйства и ретроспективного решения основных расчетно-аналитических задач.

Формирование электронной книги истории полей (участков) на основе первичной агроэкологической БД по полям и рабочим участкам хозяйства в соответствии с новой системой полей и рабочих участков и с привлечением профильных специалистов хозяйства, агрохимических паспортов участков и рукописных книг истории полей.

Отработка технологии автоматизированного проектирования базового размещения севооборотов по полям и участкам хозяйства и их оперативной корректировки – на основе проектной агроэкологической БД по рабочим участкам хозяйства,

электронной агроэкологической книги истории полей, системного алгоритма оптимизации выбора севооборота и культуры для условий конкретного рабочего участка, нормативно-справочных баз данных и аналитических модулей расчета урожайности, оптимальных доз удобрений, выбора и адаптации агротехнологий и расчета технологических затрат.

Отработка технологии автоматизированного подбора и адаптации к условиям рабочих участков базовых агротехнологий – на основе баз данных агроэкологических требований культур, проектной агроэкологической БД по полям и рабочим участкам хозяйства, БД агротехнологий, модулей расчета урожайности, применения удобрений, выбора и адаптации агротехнологий, и расчета технологических затрат.

Отработка регионально адаптированных технологий агроэкологически обоснованного автоматизированного проектирования, сезонной оптимизации систем обработки почв, применения удобрений и средств защиты растений (с учетом локальных особенностей участка) – на основе агроэкологических баз данных и алгоритмов их анализа, с дополнением частных информационно-аналитических модулей оперативной оптимизации систем обработки почв и применения средств защиты растений и данных компьютерной книги истории полей.

Создание агроэкологически обоснованных проектных карт наилучших доступных почво- и углерод-сберегающих агротехнологий:

- структуры севооборотов – на основе карты землеустройства, проектной агроэкологической БД и автоматизированного проектирования размещения севооборотов по полям и рабочим участкам;

- мелиорации земель – на основе карты землеустройства, проектной агроэкологической БД и алгоритмов анализа проблемных ситуаций;

- ежегодного размещения культур – на основе структуры севооборотов и алгоритмов их оперативной корректировки-выбора культуры;

- наилучших доступных агротехнологий – на основе карты размещения культур, проектной БД, алгоритмов автоматизированного подбора-адаптации к условиям рабочих участков базовых агротехнологий;

– применения удобрений – на основе карты севооборотов, проектной БД и алгоритмов оперативной оптимизации применения удобрений;

– планового и, в случае необходимости, оперативного применения средств защиты растений – на основе карты размещения культур, проектной базы данных и алгоритмов автоматизированного проектирования и оперативной оптимизации применения средств защиты растений в условиях конкретного участка;

– планируемой и реальной урожайности культур – на основе карты полей, проектной БД и книги истории полей;

– планируемых/реальных затрат и рентабельности земледелия – на основе карты культур, проектной базы данных, алгоритмов автоматизированного проектирования-анализа агротехнологий, книги истории полей.

Отработка технологии автоматизированного анализа рентабельности производства на рабочих участках хозяйства – с учетом агроэкологических особенностей полей и участков, выращиваемых на них культур и сортов, применяемых агротехнологий, погодных условий года, выявленных в сезоне технологических нарушений и текущей системы цен – на основе данных предыдущих этапов анализа материалов локальной агроэкологической ГИС.

Согласование процедур обновления-обмена информацией с данными сопряженных информационно-справочных систем и программ (бухучета, статучета, специализированными системами текущего учета и планирования сельскохозяйственной деятельности).

#### **1.5.4. Региональные базы данных и ГИС для агроэкологического районирования земель.**

Региональные базы данных агроэкологического районирования земель обеспечивают систематизированную запись, хранение, геостатистическую обработку, импорт-экспорт, печать и визуализацию разноплановых данных в разрезе хозяйств, которая необходима для функционально-целевого анализа агроэкологического состояния земель на уровне области и района.

Исходные записи хозяйств структурируются по агроэкологическим факторам оценки земель и их основным диагностическим показателям для генерализованных почвенных выделов

(должны охватывать не менее 70–80% территории хозяйства). Они трансформируются в рабочие записи, содержащие не только первичную, но и оценочную информацию.

Основными атрибутами хозяйств в рабочей записи региональной агроэкологической базы данных являются:

- географические координаты, землеустроительная характеристика хозяйств;
- основные показатели рельефа, эрозии (сельскохозяйственных земель/пашни);
- среднеголетние данные урожайности и экономики растениеводства;
- средневзвешенные агроэкологические параметры и оценки земель;
- основные диагностические показатели генерализованных выделов почв.

Тематические подмассивы региональной базы данных формируются посредством генерализации и математической обработки картографических, статистических и архивных материалов.

Почвенно-агрохимический подмассив – посредством генерализации архивных материалов областных станций агрохимического обслуживания и Бюро Земкадастра (ЗемПроекта).

Подмассивы данных по общей характеристике земель и экономическим параметрам хозяйств создаются по официальным данным статотчетности.

Географические координаты хозяйств определяются по электронным или печатным картам среднего масштаба.

Для характеристики климата используются усредненные многолетние данные климатических справочников по метеостанциям и метеопунктам, расположенным на территории области и в непосредственной близости от ее границ, с последующей интерполяцией данных на территорию всех хозяйств области по методу крикинга в геостатистических программных пакетах типа.

Для характеристики урожайности (среднеарифметическая, минимумы, максимумы и 80%-ной обеспеченности) используются статистические данные за последние 10–20 лет. Агроэкологическая оценка почв рассчитывается с использованием автоматизированных программ оценки, адаптированных к условиям региона (например – РАСКАЗ).

Региональная ГИС агроэкологического районирования земель является ядром региональной системы геоинформационного обеспечения адаптивно-ландшафтного земледелия и формируется при систематизации серии базовых электронных карт и сопряженной с ними агроэкологической базы данных по хозяйствам региона. Создаваемые на их основе производные оценочные и прогнозные карты формируют картографическую основу агроэкологического районирования в виде электронного атласа агроэкологического состояния земель и используются для информационного и нормативного обеспечения локальных агроэкологических СППР по оптимизации систем земледелия и агротехнологий в хозяйстве.

#### **1.5.5. Перспективы развития информационного обеспечения агроэкологического моделирования и районирования.**

Агроэкологические задачи сегодняшнего сельского хозяйства с быстро растущей дифференциацией применяемых систем земледелия и наилучших доступных агротехнологий, ускоренным развитием эрозии, дегумификации и других деградиционных процессов почв – обуславливают высокую актуальность разработки и широкого использования автоматизированных систем комплексного агроэкологического анализа земель, региональных и локальных СППР агроэкологической оптимизации земледелия и землепользования, также опирающихся на данные по агроэкологической оценке земель.

Разработка ключевых элементов региональных агроэкологических ГИС мониторинга включает:

- ❖ электронные картосхемы землепользования сельских хозяйств;
- ❖ базы почвенно-агроэкологических данных по хозяйствам региона;
- ❖ базы данных агроэкологических требований культур и технологий;
- ❖ электронные атласы агроэкологического состояния земель;
- ❖ программы и модели аналитического блока обработки и визуализации информации, экспертной оценки агроэкологического состояния земель.

Формирование региональных электронных агроэкологических картосхем землепользователей-сельхозтоваропроизводи-

телей и отладка надежной связи их со специализированными базами данных и информационно-аналитическими модулями значительно облегчает проведение широкого спектра исследовательских и информационно-технологических операций.

На основе региональных ГИС агроэкологического мониторинга может успешно решаться целый спектр задач агроэкологического информационно-справочного обеспечения проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия и оптимизации наилучших доступных агротехнологий:

- ❖ агроэкологической паспортизации земель, обобщения и визуализации данных по основным агроэкологическим параметрам хозяйств;

- ❖ частной и интегральной агроэкологической оценки земель;

- ❖ выявления, анализа, моделирования, поискового и нормативного прогнозирования развития проблемных агроэкологических ситуаций на территории районов и области;

- ❖ информационного и картографического обеспечения локальных СППР по агроэкологической оптимизации земледелия, выбору и корректировке наилучших доступных агротехнологий в хозяйствах.

Разработка, адаптация и районирование локальных СППР для информационного обеспечения оперативного управления (оптимального выбора, корректировки) агротехнологиями на уровне конкретного хозяйства или поля и проектирования-корректировки элементов адаптивно-ландшафтных систем земледелия является одним из важнейших направлений информатизации сельского хозяйства, возрождая повышенный интерес к современному состоянию и агрогенной динамике почвенного покрова.

Подобные системы призваны решать задачи по выбору оптимальных для условий конкретного поля набора культур (сортов) и технологических приемов (различные варианты обработки, применения удобрений и т.п.) – с учетом агроэкологических особенностей почвенного покрова и земель каждого рабочего участка.

Применение локальных СППР агроэкологической оптимизации агротехнологий и систем земледелия (таких как ЛИССОЗ) позволяет оперативно использовать текущую информацию по агрогенному изменению наиболее агроэкологически значимых почвенных характеристик при решении целого ряда оптимизационных задач в условиях конкретного поля – тем самым зна-

чительно повышая точность получаемых оценок и прогнозов экономической эффективности технологических решений.

Информационно-аналитические модули СППР часто комбинируются с локальными ГИС, содержащими тематические слои рельефа, почвенного покрова, природоохранной и производственной инфраструктуры хозяйства, системы севооборотов, основных показателей текущего агроэкологического состояния земель. При этом может учитываться и внутрипольная пестрота почвенного покрова (в случае прецизионного, или точного, земледелия).

Применение на практике ГИС агроэкологического районирования и СППР агроэкологической оптимизации систем земледелия и агротехнологий, адаптированных к местным особенностям агроландшафта и возможностям хозяйства, позволяет:

- снизить зависимость доходов землепользователя от вероятных агроэкологических и экономических рисков сельскохозяйственного производства;
- повысить экономическую эффективность земледелия за счет выбора рациональной культуры (сорта) и оперативной корректировки агротехнологий;
- снизить опасность загрязнения и деградации базовых компонентов окружающей среды;
- повысить качество планирования и анализа результатов земледелия и производственной деятельности хозяйств в целом.

*Автор: Васнев И.И., РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,  
vasenev@rgau-msha.ru .*

## **Geoinformation support for regional agroecological monitoring systems and DSS**

*I.I. Vasenev*

**Abstract:** A systematic description of geoinformation support for agroecological tasks is presented. The consistent solution of scientific research and design tasks of the development of regional and local agroecological GIS to ensure the management of adaptive landscape farming and the optimization of the best available agricultural technologies is presented. Regional databases and GIS for agroecological zoning of lands and prospects for the development of information support for agroecological modeling and zoning are considered.

---

## 2. Почво- и углерод-сберегающие технологии с внесением биоугля

### 2.1. Технология получения высокопористых углеродных материалов из растительного сырья для целей устойчивого развития

*Бауэр Т.В., Минкина Т.В., Сушкова С.Н., Манджиева С.С.,  
Барахов А.В., Козьменко С.В., Дудникова Т.С.,  
Бурачевская М.В., Черникова Н.В.*

**Аннотация:** Постоянные антропогенные выбросы диоксида углерода привели к рекордным концентрациям его в атмосфере и усилили глобальное потепление, поставив экосистему Земли под угрозу. Производство биоугля и его секвестрация в почве являются многообещающими способами смягчения глобального потепления. Данная работа посвящена разработке и оптимизации технологии получения высокоуглеродистых материалов на основе сельскохозяйственных отходов растениеводства. При использовании лабораторной пиролизной установки получены опытные партии образцов биочара из лузги семян подсолнечника в широком диапазоне рабочих условий пиролиза. Выполнена отработка температурных режимов (300, 500, 700, 900°C), скоростей нагрева (5, 10, 15, 20, 25 °C/мин) до конечной температуры и длительности пиролиза (15 и 75 мин) для формирования требуемых характеристик пористости сорбента. Установлено, что наилучшими структурными характеристиками и ароматичностью обладает биоуголь, полученный при скорости нагрева 15°C/мин до конечной температуры 700 °C и времени выдержки 75 мин.

Эффективным решением снижения выбросов парниковых газов, устранения влияния промышленных объектов на накопление загрязняющих веществ, сокращения массы органических отходов от производства сельскохозяйственной продукции является разработка технологий переработки биомассы в биоугли из отходов растениеводства для снижения углеродного следа и обеспечения экологических стандартов в агропроизводстве.

Разработка и внедрение новых ресурсосберегающих технологий для повышения качества и безопасности почвенных экосистем отвечает целям устойчивого развития Генеральной ассамблеи ООН. К числу данных технологий относится карбонизация возобновляемой биомассы. В результате сухого пиролиза – высокотемпературного (350–1000 °С) обугливания органической биомассы в бескислородной среде получают биоуголь [European Biochar Foundation (EBC), 2020, IBI, 2015].

Продукт представляет из себя твердый, стабильный, богатый углеродом и очень ароматичный материал с пористой структурой, высокой удельной поверхностью и высокой способностью удерживать воду и питательные вещества [Wang et al., 2024]. Внесение в почву биоугля способствует улучшению физического, биологического и химического состояния почв, уменьшению эмиссии парниковых газов из почв [Bera et al., 2016; Ajema, 2018; Blanco-Canqui, 2017; Srivastava, 2017; Suliman et al., 2017; Omondi, 2016].

Карбонизированные материалы оказывают положительное влияние на почвенное плодородие, рост и развитие растений [Ahmed et al., 2016; Zhang et al., 2016; Agegnehu et al., 2017]. Оценка времени сохранения углерода биоугля в почвах варьируется от сотен до тысяч лет, тогда как углерод биомассы сохраняется в течение нескольких десятилетий [Lehmann, Gaunt, Rondon, 2006; Lehmann, 2009]. Поэтому внесение биоугля, полученного из биомассы, уменьшает возврат углерода в атмосферу в виде углекислого газа. Таким образом, при условии, что параллельно выделяющиеся газы, а также продукты, выделяющиеся в экосистему при производстве, транспортировке и хранении биоугля, не компенсируют указанного положительного влияния, внесение биоуглей способствует снижению парникового эффекта [Wang et al., 2024].

Большое внимание уделяется исследованию применения биоугля для ремедиации и восстановления загрязненных почв [Anbalagan et al., 2023; Burachevskaya et al., 2023; Fu et al., 2022]. За последние годы были разработаны различные *in-situ* и *ex-situ* технологии реабилитации почв, применяемые как для неорганических, так и органических соединений, получившие широкое распространение.

Методы восстановления почв в результате загрязнения ПАУ подразделяются на следующие основные типы [Kuppusamy et al., 2017; Lawal, 2017; Sakshi et al., 2019]: физические (извлечение растворителем, термодесорбция, микроволновое нагревание, витрификация, электрокинетические процедуры и т. д.); химические (окисление с использованием реагентов и фотокаталитическая деградация); биологические (биоремедиация с использованием микроорганизмов, компостирование, фиторемедиация и т.д.). Выбор конкретного метода зависит от вида загрязнителя, типа почвы, анализа рисков, связанных с прогнозированием возможных побочных эффектов [Khodadoust et al., 2000]. Физические и химические методы традиционно рассматриваются в качестве высоко эффективных и действенных, вместе с тем, энергоемких и дорогостоящих, и кроме того, способных приводить к образованию вторичного загрязнения [Qu et al., 2022; Cao et al., 2022; Cameselle, Gouveia, 2018]. Именно поэтому более распространены химические и биологические методы.

Для почв, загрязненных ТМ, основными подходами являются: выемка и отсыпка, химическая обработка, электрокинетическая экстракция, промывка, термическая обработка, инкапсуляция, асфальтовое покрытие, фиторемедиация, биоремедиация [Dermont et al., 2008; Копчик, 2014; Liu et al., 2018; Sharma et al., 2018]. Однако эти методы не считаются экологически чистыми и экономически эффективными [Tuetal., 2020].

Отдельного внимания заслуживают подходы, связанные с внесением различных мелиорантов. Так, внесение минеральных сорбентов, в том числе глинистых минералов [Zotiadis et al., 2012; Liang et al., 2014; Sun et al., 2016; Wu et al., 2016; Xu et al., 2017], достаточно эффективно для почв, загрязненных ТМ. Основной принцип внесения различных минеральных добавок основан на их сорбции и, как следствие, стабилизации неорганических загрязнителей. Имобилизация или стабилизация загрязненной почвы является многообещающей стратегией для снижения подвижности и биодоступности ТМ [Khalid et al., 2017].

ТМ могут быть иммобилизованы в почве путем реакций комплексообразования, осаждения и адсорбции. Эти процессы вызывают перераспределение ТМ из почвенного раствора в твердые частицы, что ограничивает их миграцию и биодоступность в почве. В то же время, различные природные сорбенты,

например, кремниевые породы, способны не только сорбировать ТМ и усиливать устойчивость произрастающих на таких почвах растений к загрязнителям, но оказывают существенное положительное влияние на физические свойства почв [Матыченков и др., 2002], а также микробиологическую активность [Kozlov et al., 2019], что делает их потенциально эффективными для восстановления почв, загрязненных ТМ и ПАУ. Применение органических добавок считается дешевым и лучшим вариантом для очистки почвы от различных поллютантов [Lan et al., 2022].

В последнее время предлагаются различные углеродные сорбенты из растительного сырья, позволяющие очищать почву от ионов ТМ. Разработка новых видов биоуглей из ежегодно возобновляемого сырья (лузга подсолнечника, рисовая шелуха и стерня, скорлупа грецких орехов и т.д.) для очистки почвы является актуальным как в научном, так и в практическом применении из-за его низкой стоимости, высокой стабильности и большого потенциала удаления загрязняющих веществ [Cheng et al., 2021; Feng et al., 2021].

Разработка и внедрение новых ресурсосберегающих технологий возделывания сельскохозяйственных культур и реабилитации почв, направленных на предотвращение негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду, являются в настоящее время приоритетными и актуальными. Пиролиз является наиболее перспективным методом, поскольку обеспечивает одновременную утилизацию биомассы и производство биоугля при относительно низком давлении и в бескислородной среде с низкой эмиссией в окружающую среду оксидов азота и серы ( $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ ) [Foong et al., 2020].

Биоуголь относится к конкурентоспособному стабилизатору/ иммобилизатору поллютантов в почвах [Tan et al., 2020]. Он характеризуется большой площадью удельной поверхности, высокими значениями рН, пористой структурой, разнообразными функциональными группами и высокой химической и биологической стабильностью [Wang et al., 2018a; Wu et al., 2020], которые способствуют прочной иммобилизации ТМ в загрязненной почве [Bolan et al., 2021; Man et al., 2021; Yuan et al., 2021].

На свойства биоугля влияют тип сырья и условия получения, включая температуру и продолжительность пиролиза [Yaashikaa

et al., 2020]. Физические и химические свойства биоугля зависят от таких факторов, как скорость нагрева, давление в печи, газовая атмосфера и тип предварительной и/или последующей обработки биоугля [Lietal., 2023; Muzykaetal., 2023]. Физические характеристики биоугля, такие как площадь удельной поверхности и размер/объем/распределение пор контролируются температурой производственного процесса [Ahmadetal., 2014].

Пиролиз при высокой температуре ( $> 550$  °C) позволяет получать биоуголь с большой площадью удельной поверхности ( $>400$  м<sup>2</sup>/г) и высокой ароматичностью, но с меньшим количеством функциональных групп, например, -COOH, -OH [Ralebitso-Senior et al., 2016]. На структурные характеристики получаемого биоугля наряду с конечной температурой пиролиза оказывает значительное влияние скорость нагрева и время выдержки биомассы [Song, Guo, 2012]. Следовательно, подбор оптимальной скорости нагрева является важной задачей при разработке технологии получения углеродистых сорбционных материалов.

Цель работы состояла в разработке технологии получения высокопористых углеродсодержащих сорбционных материалов (биосорбентов) на основе отходов растительного происхождения для восстановления загрязненных почв и депонирования углерода.

В качестве исходного сырья для создания углеродистых биосорбентов были использованы отходы переработки подсолнечника (лузга), выращенного на территории Ростовской области. Данный вид отходов в регионе является перспективным сырьем для получения сорбентов, в среднем их величина составляет более 350 тысяч т/год [Российский статистический ежегодник, 2020], и эта цифра в связи с интенсификацией производства масличных культур растет ежегодно. Однако этот огромный потенциал используется лишь частично [Li et al., 2011; Zou et al., 2015] из-за отсутствия экономических и эффективных технологий утилизации отходов. Часть отходов идет на производство биотоплива или получение тепловой энергии [Hayes, 2013; Cui, et al., 2019], используется в качестве корма для КРС, но большая доля уходит в отвал, что экономически невыгодно и приводит к экологическим последствиям.

Более ценный продукт с высокой добавленной стоимостью может быть получен путем преобразования биомассы в эффектив-

ный адсорбент для удаления загрязняющих веществ из окружающей среды [Vassilev et al., 2013]. Лузга подсолнечника по своему химическому составу является хорошим сырьем для получения углеродсодержащих пористых сорбентов, поскольку основную его часть составляют целлюлоза (до 30%) и лигнин (до 25%), легко поддающиеся модификации с целью придания полисахаридной матрице сорбционных свойств (Сиволобова и др., 2017).

С целью установления оптимального сочетания значений основных факторов, влияющих на получение биоуглей с заданными свойствами, проводили серию экспериментов при скорости нагрева 5, 10, 15, 20, 25°C/мин до конечной температуры 300, 500, 700, 900°C и выдержки при конечной температуре в течение 15 и 75 мин. Для этого исходную биомассу трижды промывали водопроводной водой и один раз дистиллированной водой с целью удаления примесей (водорастворимых полифенолов и полисахаридов).

После этого лузгу сушили при температуре 105°C в сушильном шкафу в течение 3 часов до полного высыхания. Затем исходное сырье массой по 100г загружали в специально изготовленную лабораторную пиролизную установку (объем 2,2 л) – реторту из нержавеющей стали толщиной свыше 2 мм, которую герметично закрывали крышкой с приваренным штуцером для отвода газов и помещали в муфельную печь, подавая в реторту азот (чистота > 99,99%) для создания инертной атмосферы. Реторту нагревали со скоростью подъема температуры 5-25 °C/мин до 300-900 °C и выдерживали при конечной температуре нагрева в течение 15-75 минут.

После завершения процесса пиролиза реторту охлаждали до комнатной температуры, извлекали и взвешивали полученные образцы биоугля и определяли их физико-химические, структурные и текстурные характеристики (табл. 2.1.1, 2.1.2), являющиеся основными показателями эффективности их применения. Выход получения биосорбента рассчитан на сухую массу исходного сырья по следующей формуле:

$$\frac{M_6}{M_c \cdot \left(1 - \frac{W_c}{100}\right)} \cdot 100, \% \quad (2.1.1)$$

где  $M_6$  – масса биоугля после пиролиза, г;  $M_c$  – масса сухого исходного сырья, г;  $W_c$  – влажность исходного сырья, %.

Таблица 2.1.1. Текстурные характеристики образцов биоуглей, полученных при различных условиях пиролиза

Конечная температура, °С	Время выдержки при конечной температуре, мин.	Скорость нагрева, °С/мин	Удельная площадь поверхности S <sub>в</sub> (м <sup>2</sup> /г)	Выход продукта, %	Объем пор V (см <sup>3</sup> /г)			Средний размер пор, нм	
					V <sub>общ</sub>	V <sub>макро</sub>	V <sub>мезо</sub>		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
300	15	5	0,57	53,62	0,07	0,05	0,02	0,00	9,46
300	15	10	0,64	52,81	0,09	0,05	0,03	0,01	9,42
300	15	15	0,72	51,30	0,09	0,04	0,03	0,02	9,49
300	15	20	0,96	49,64	0,11	0,06	0,03	0,02	9,45
300	15	25	1,02	49,12	0,11	0,06	0,04	0,01	9,40
300	75	5	2,68	45,50	0,39	0,18	0,16	0,05	8,52
300	75	10	2,85	43,72	0,44	0,20	0,18	0,06	8,36
300	75	15	3,09	42,69	0,43	0,21	0,17	0,05	8,15
300	75	20	3,43	41,30	0,44	0,24	0,16	0,04	7,96
300	75	25	3,86	42,13	0,49	0,26	0,17	0,06	7,68
500	15	5	5,07	43,72	0,23	0,06	0,13	0,04	7,02
500	15	10	5,42	42,51	0,29	0,07	0,17	0,05	6,83
500	15	15	6,11	42,87	0,30	0,09	0,16	0,05	6,56
500	15	20	7,62	40,58	0,38	0,09	0,23	0,06	6,53
500	15	25	8,02	40,50	0,43	0,12	0,27	0,04	6,29
500	75	5	24,68	36,27	0,52	0,11	0,25	0,16	4,17
500	75	10	27,91	34,12	0,61	0,14	0,30	0,17	4,09
500	75	15	36,02	33,50	0,95	0,22	0,47	0,26	3,97
500	75	20	39,07	33,87	0,87	0,18	0,40	0,29	3,79

Таблица 2.1.1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
500	75	25	43,29	32,61	0,96	0,23	0,46	0,27	3,52
700	15	5	89,43	37,40	0,44	0,11	0,18	0,15	5,48
700	15	10	96,32	36,98	0,42	0,08	0,21	0,13	5,36
700	15	15	102,47	36,34	0,58	0,13	0,24	0,21	5,12
700	15	20	112,93	34,56	0,66	0,11	0,30	0,25	4,86
700	15	25	120,68	34,07	0,70	0,09	0,30	0,31	4,69
700	75	5	291,98	31,10	1,18	0,12	0,47	0,59	2,59
700	75	10	328,19	31,60	1,36	0,10	0,60	0,66	2,36
700	75	15	412,67	30,54	1,71	0,06	0,76	0,89	2,19
700	75	20	394,07	28,71	1,63	0,11	0,74	0,78	2,36
700	75	25	381,03	26,73	1,46	0,14	0,63	0,69	2,51
900	15	5	96,71	36,26	0,47	0,16	0,19	0,12	5,62
900	15	10	103,56	35,92	0,54	0,12	0,28	0,14	5,48
900	15	15	108,15	35,67	0,59	0,16	0,25	0,18	5,35
900	15	20	106,38	34,68	0,73	0,18	0,32	0,23	5,19
900	15	25	116,46	33,87	0,81	0,13	0,37	0,31	4,98
900	75	5	296,12	29,76	1,27	0,18	0,59	0,50	4,58
900	75	10	342,49	28,89	1,43	0,15	0,71	0,57	4,76
900	75	15	370,92	28,60	1,52	0,14	0,78	0,60	4,34
900	75	20	356,93	26,74	1,37	0,13	0,71	0,53	4,85
900	75	25	339,02	26,08	1,29	0,16	0,64	0,49	5,62

Таблица 2.1.2. Элементный состав образцов биоуглей, полученных при различных условиях пиролиза

Конечная температура, °С	Время выдержки при конечной температуре, мин.	Скорость нагрева, °С/мин	%							Н/С	О/С	(N+O)/C
			С	N	H	O	Зола	общая				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
300	15	5	37,92	1,91	4,72	46,69	8,76	1,48	0,92	0,97		
300	15	10	38,16	1,88	4,69	46,34	8,93	1,46	0,91	0,95		
300	15	15	38,65	1,82	4,64	46,09	8,80	1,43	0,90	0,94		
300	15	20	38,93	1,84	4,61	45,11	9,51	1,41	0,87	0,91		
300	15	25	39,32	1,76	4,63	44,51	9,78	1,40	0,85	0,89		
300	75	5	42,78	1,47	3,97	38,91	12,87	1,11	0,68	0,71		
300	75	10	42,96	1,42	3,91	38,78	12,93	1,08	0,68	0,71		
300	75	15	43,17	1,37	3,78	38,65	13,03	1,04	0,67	0,70		
300	75	20	43,80	1,43	3,56	38,10	13,11	0,97	0,65	0,68		
300	75	25	44,02	1,39	3,50	38,13	12,96	0,95	0,65	0,68		
500	15	5	51,17	1,41	3,36	31,68	12,38	0,78	0,46	0,49		
500	15	10	51,63	1,42	3,34	31,15	12,46	0,77	0,45	0,48		
500	15	15	51,86	1,45	3,31	31,10	12,28	0,76	0,45	0,47		
500	15	20	52,43	1,40	3,28	30,52	12,37	0,75	0,44	0,46		
500	15	25	52,97	1,36	3,20	28,39	14,08	0,72	0,40	0,42		
500	75	5	59,41	1,24	2,35	21,81	15,19	0,47	0,28	0,29		
500	75	10	60,57	1,29	2,29	20,09	15,76	0,45	0,25	0,27		
500	75	15	62,90	1,22	2,18	18,62	15,08	0,41	0,22	0,24		
500	75	20	63,12	1,09	2,21	18,06	15,52	0,42	0,21	0,23		

2. Почво- и углерод-сберегающие технологии с внесением биоугля

Таблица 2.1.2. (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
500	75	25	63,96	1,13	2,14	17,06	15,71	0,40	0,20	0,22
700	15	5	65,93	1,19	1,78	16,78	14,32	0,32	0,19	0,21
700	15	10	66,12	1,23	1,81	16,40	14,44	0,33	0,19	0,20
700	15	15	66,57	1,16	1,74	16,18	14,35	0,31	0,18	0,20
700	15	20	66,83	1,21	1,69	15,65	14,62	0,30	0,18	0,19
700	15	25	67,06	1,17	1,64	15,35	14,78	0,29	0,17	0,19
700	75	5	74,98	0,75	1,31	7,68	15,28	0,21	0,08	0,09
700	75	10	75,51	0,71	1,23	6,79	15,76	0,19	0,07	0,08
700	75	15	77,18	0,67	1,18	5,94	15,03	0,18	0,06	0,07
700	75	20	76,40	0,61	1,09	5,83	16,07	0,17	0,06	0,06
700	75	25	73,50	0,53	1,01	7,85	17,11	0,16	0,08	0,09
900	15	5	67,13	0,95	1,12	15,78	15,02	0,20	0,18	0,19
900	15	10	67,40	1,02	1,07	15,56	14,95	0,19	0,17	0,19
900	15	15	68,01	1,05	1,02	14,80	15,12	0,18	0,16	0,18
900	15	20	68,56	0,94	0,96	14,26	15,28	0,17	0,16	0,17
900	15	25	68,91	0,90	0,92	13,47	15,80	0,16	0,15	0,16
900	75	5	80,99	0,32	0,45	1,70	16,54	0,07	0,02	0,02
900	75	10	78,16	0,43	0,35	4,15	16,91	0,05	0,04	0,04
900	75	15	80,09	0,33	0,28	2,23	17,07	0,04	0,02	0,02
900	75	20	79,18	0,27	0,21	2,79	17,55	0,03	0,03	0,03
900	75	25	78,40	0,21	0,16	3,17	18,06	0,02	0,03	0,03

Определение площади удельной поверхности ( $S_{\text{ВЕТ}}$ ) и пористости (объем микро- ( $V_{\text{микро}}$ ), мезо- ( $V_{\text{мезо}}$ ), макропор ( $V_{\text{макро}}$ ) и суммарный объем пор ( $V_{\text{общ}} \approx V_{\text{микро}} + V_{\text{мезо}} + V_{\text{макро}}$ ) образцов биосорбентов выполнено на волюметрическом анализаторе «ASAP 2020» по методу низкотемпературной адсорбции азота. Расчет поверхности и параметров пористости осуществлен методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) по  $N_2$  в диапазоне равновесных значений  $P/P_0=0,05-0,33$ . Распределение пор по размеру было рассчитано с помощью метода теории функционала плотности NLDFT (density functional theory) [Landers et al., 2013].

Элементный состав образцов биоугля (С, Н, N) определялся методом сухого сжигания с использованием элементного анализатора CHN (ТОС-L CPN Shimadzu, Япония). Содержание зольности (общей золы) измеряли путем сжигания образцов в муфельной печи при температуре 650 °С в течение 3 часов (ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171–97)), а содержание кислорода рассчитывалось по разнице масс [Aslam et al., 2017]:

$$O \% = 100\% - (C \% + H \% + N \% + \text{зола общая} \%), \quad (2.1.2)$$

Элементный состав биоугля был использован для расчета атомных соотношений Н/С, О/С и (О + N)/С [Chen et al., 2008].

Условия пиролиза (температура, скорость нагрева и время выдержки сырья) оказали существенное влияние на выход, структуру и свойства полученных экспериментальных образцов биоуглей (табл. 2.1.1, 2.1.2). С повышением температуры и времени пиролиза выход биоуглей уменьшался с 53,62% до 18,08% (табл. 2.1.1). Однако при повышении температуры пиролиза с 700 до 900°С снижение выхода биоугля было не столь выражено, как при более низких температурах.

Минимальные значения массы полученного биоугля установлены при температуре пиролиза 900°С и 75 мин термической обработке луги. Среди рассматриваемых показателей скорость нагрева оказала меньшее влияние на изменение массы выхода конечного продукта, а температура – большее (табл. 2.1.1). К аналогичным выводам в исследованиях пришли авторы [Keiluweit et al. 2010; Uchimiya et al., 2011].

При низкой конечной температуре обработки (300°С) показатели структурных характеристик биоуглей весьма низкие

( $S_{\text{ВЕТ}}$  0,57-3,86 м<sup>2</sup>/г;  $V_{\text{общ}}$  0,07-0,49 см<sup>3</sup>/г;  $V_{\text{микро}}$  0,00-0,06 см<sup>3</sup>/г;  $V_{\text{мезо}}$  0,02-0,18 см<sup>3</sup>/г;  $V_{\text{макро}}$  0,04-0,26 см<sup>3</sup>/г), что свидетельствует о низкой эффективности сорбентов, получаемых при данной температуре (табл. 1.2.1). Показатели структурных характеристик возрастают с увеличением конечной температуры пиролиза и времени выдержки, и достигают максимума при скорости нагрева 15 °С, конечной температуре 700 °С и 75 мин выдержки ( $S_{\text{ВЕТ}}$  394,07 м<sup>2</sup>/г;  $V_{\text{общ}}$  1,63 см<sup>3</sup>/г;  $V_{\text{микро}}$  0,78 см<sup>3</sup>/г;  $V_{\text{мезо}}$  0,74 см<sup>3</sup>/г;  $V_{\text{макро}}$  0,11 см<sup>3</sup>/г). При увеличении конечной температуры пиролиза до 900 °С наблюдается снижение удельной площади поверхности, общего объема пор и их распределения ( $S_{\text{ВЕТ}}$  370,92 м<sup>2</sup>/г;  $V_{\text{общ}}$  1,52 см<sup>3</sup>/г;  $V_{\text{микро}}$  0,60 см<sup>3</sup>/г;  $V_{\text{мезо}}$  0,78 см<sup>3</sup>/г;  $V_{\text{макро}}$  0,14 см<sup>3</sup>/г), однако средний размер пор увеличивается почти в два раза (до 4,34 нм). Это свидетельствует о том, что при достаточно высокой температуре пиролиза (900 °С) происходит разрушение пористой структуры сорбента на отдельные микроблоки, что негативно сказывается на его сорбционных характеристиках [Yang et al., 2023]. Повышенная температура также может быть причиной увеличения диаметра пор за счет слияния соседних мелких пор в более крупные поры [Saghir et al., 2022].

Элементный состав образцов биоугля также тесно связан с условиями пиролиза (табл. 1.2.2). С повышением температуры, времени пиролиза и скорости нагрева последовательно увеличивается содержание С, а содержание N, H и O уменьшается. Так, содержание С в биоугле, полученном при температуре пиролиза 300°С, составляет 37,92-44,02% в зависимости от времени выдержки образца и скорости нагрева до конечной температуры. При максимальной температуре пиролиза (900°С) данный показатель значительно выше и варьирует от 67,30 до 81,31%. Содержание N, H и O в полученных образцах при самой низкой температуре пиролиза составило 1,91-1,37%; 3,50-4,72%; 38,10-46,69%, при 900 °С – 0,21-1,05%; 30,16-1,12%; 0,90-15,78%, соответственно (табл. 1.2.2). Увеличение содержания углерода повышением температуры пиролиза является результатом повышения степени карбонизации биоугля, а снижение содержания N, H и O связано с непрерывным разложением и улетучиванием соединений, содержащих в своем составе данные элементы (гемицеллюлоза, целлюлоза, лигнин и др.) [Ippolito et al., 2020; Usman et al., 2015].

Так, наибольшее содержание азота (2,17%) наблюдалось в биоугле, полученном при температуре пиролиза 350°C [Zhao et al., 2017] и снижалось при повышении температуры до 550°C за счет удаления азота из сложных органических соединений [Chowdhury et al., 2016].

Соотношения Н/С и О/С в полученных образцах биоуглей влияют на их стабильность и ароматичность. При повышении температурных режимов пиролиза, скорости нагрева и времени выдержки биомассы отмечается снижение атомных соотношений Н/С, О/С и (N + O)/С (табл. 2), что указывает на то, что при низких значениях данных показателей пиролиза биоугли имеют в своем составе еще большое количество исходных органических остатков [Ning et al., 2022]. Максимальное соотношение Н/С (1,48) характерно для образца, полученного при минимальных выбранных значениях температуры (300°C), скорости нагрева (5°C/мин) и времени (15 мин) пиролиза, а минимальное (0,02), наоборот, при максимальных (900°C, 25,5°C/мин и 75 мин). Данное снижение соотношения Н/С с повышением параметров пиролиза указывает на высокую степень ароматичности структуры биоугля [Qian et al., 2016; Yakout, 2017]. Аналогичные тенденции в снижении отмечаются для соотношения О/С (с 0,92 до 0,01) и (N + O)/С (с 0,97 до 0,01).

Зольность полученных образцов биоуглей из лузги подсолнечника увеличилась с повышением температуры пиролиза, что свидетельствует об образовании и накоплении минеральных элементов в биоуглях в процессе пиролиза [Waqas et al., 2018]. Как показано в таблице 2, зольность биоуглей более интенсивно возрастала между температурами пиролиза 300 и 500 °С, а затем незначительно увеличивалась, когда температура пиролиза превышала 500 °С и время выдержки 60 мин. Это согласуется с исследованиями [Heetal., 2018], которые выявили, что содержание общей золы может значительно измениться в пределах 300 – 450 °С и менее заметно при температуре выше 450 °С.

Таким образом, исходя из данных анализа структурной характеристики и элементного состава полученных биоуглей установлено, что наилучшими свойствами обладает биосорбент, изготовленный при скорости нагрева 15 °С/мин до 700 °С и времени выдержки 75 мин. Он обладает оптимальным соотношением ми-

кро-, мезо- и макропор, а также высокой удельной площадью поверхности, что делает его потенциально эффективным средством в борьбе с загрязнением тяжелыми металлами.

Для биоугля из лузги подсолнечника, полученного при оптимальных условиях пиролиза (700 °С, время выдержки 75 мин и скорость нагрева 15 °С/мин), были проведены дополнительные анализы, определяющие состав, сорбционные свойства и морфологию поверхности с использованием таких инструментальных методов, как XRF, SEM, XRD, FTIR, TGA. Результаты были сравнены с показателями коммерческого биоугля, произведенного пиролизом древесины березы на ретортных установках, ГОСТ 7657-84 (1976) марка А, сорт 1 (температура пиролиза 550 °С, производитель ООО «ИВЧАР»).

Биочар, изготовленный из древесины, имеет больший объем мезо- ( $V_{\text{мезо}} 0,74 \text{ см}^3/\text{г}$ ) и макропор ( $V_{\text{макро}} 1,31 \text{ см}^3/\text{г}$ ) и площадь удельной поверхности ( $S_{\text{ВЕТ}} 598 \text{ м}^2/\text{г}$ ) по сравнению с биоуглем из лузги подсолнечника, полученным при оптимальных условиях пиролиза (табл. 1). Объемы микропор обоих видов различаются незначительно.

Содержание макро- и микроэлементов в исследуемых образцах определено методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на «Спектроскане Макс GV».

Морфология сорбентов изучена с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) (микроскоп Carl Zeiss EVO-40 XVP). Съемка проводилась в стандартных для непроводящих и малоконтрастных образцов условиях (низкий вакуум, 15 кВ, повышенная эмиссия).

Метод порошковой рентгеновской дифракции (XRD) применен для установления степени кристалличности сорбентов. Измерения проведены на дифрактометре Brucker D2 Phaser в диапазоне от 20° до 90° с шагом 0.01°, время на каждый шаг – 0.2 сек. Для каждого образца выполнено по 5 проходов на каждый образец в режиме накопления интенсивности. Материал анода Cu, используемый детектор – LYNXEYE/SSD160.

Измерения ИК-Фурье спектров (FTIR) сорбентов осуществлялись на спектрометре ФСМ-1202 в геометрии на пропускание с использованием DTGS-детектора. Спектры регистрировались в диапазоне от 4000 до 400  $\text{см}^{-1}$  с разрешением 4  $\text{см}^{-1}$  и 100 скани-

рований. Таблетку 200 мг KBr диаметром 13 мм использовали в качестве эталонного образца. Исследуемые образцы массой 0,06 мг (биоуголь из древесины), 0,25 мг (биоуголь из лузги подсолнечника), KBr измельчали и прессовали в таблетки общей массой 200 мг.

Термическую стабильность углеродистых материалов исследовали с помощью синхронного термического анализа, включающего в себя термогравиметрический анализ (TGA) и дифференциальную сканирующую калориметрию (DSC), который проводили на термоанализаторе STA 449 F5 Jupiter фирмы Netzsch. Для проведения анализа образцы биосорбентов помещали в корундовые тигли. Измерения проводились при температуре 27–800 °С при расходе воздуха 70 мл/мин.

Результаты элементного состава показали отсутствие загрязнения сорбентов ТМ и металлоидами (табл. 2.1.3), которое от-

Таблица 2.1.3. Элементный состав углеродистых сорбентов

Элемент	Биочар из лузги подсолнечника	Биочар из древесины
TiO <sub>2</sub> (%)	0,39	0,26
CaO (%)	5,24	21,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,19	26,30
SiO <sub>2</sub> (%)	3,76	8,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%г)	3,42	4,17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	20,93	9,40
K <sub>2</sub> O (%)	24,36	3,94
MgO (%)	4,21	3,47
V (мг/кг)	н/о	н/о
Cr (мг/кг)	24,72	19,01
Mn (мг/кг)	295,13	407,66
Co (мг/кг)	10,94	6,52
Ni (мг/кг)	15,12	20,10
Cu (мг/кг)	24,31	23,47
Zn (мг/кг)	29,76	27,70
Sr (мг/кг)	55,68	31,07
Pb (мг/кг)	0,45	0,09

ражается в отсутствии превышений максимально допустимого уровня (МДУ, 1987) элементов для кормовых трав. В биоугле из лузги подсолнечника отмечено высокое содержание фосфора (20,93 %  $P_2O_5$ ) и калия (24,36 %  $K_2O$ ), а в древесном биоугле – повышенное содержание кальция (21,55 %  $CaO$ ).

### *Морфология поверхности углеродистых сорбентов*

Образец древесного биоугля состоит из цилиндрических гранул размером 0,5-3 мм. Микроскопическое исследование показало, что он неоднороден по своему дисперсному и морфологическому составу и содержит как ромбоэдрические осколки длиной до 20-25 мкм (рис. 2.1.1 б вставка), так и частицы размером в несколько сотен микрон (рис. 2.1.1 а).

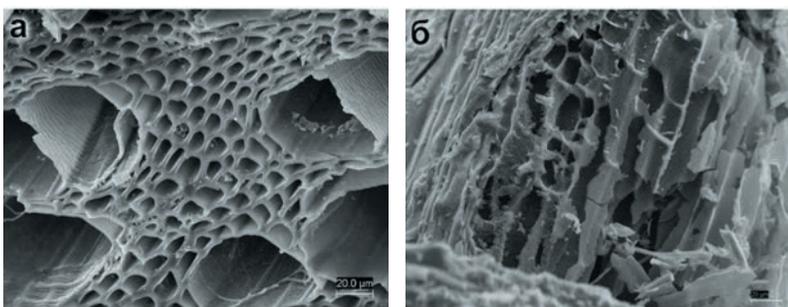


Рис. 2.1.1. СЭМ микрофотографии биочара из древесины (а) и биочара из лузги подсолнечника (б)

Крупные частицы представляют собой ситообразные структуры со сквозными цилиндрическими отверстиями диаметром примерно 10-20 мкм и 1-2 мкм. Данные образования по своей форме и строению повторяют капиллярную структуру древесины, из которой они были получены в результате неполного сгорания исходного сырья.

Образец биоугля из шелухи подсолнечника (рис. 2.1.1б), как и образец из древесного биоугля, повторяет структуру растительного сырья, из которого он был получен. Он состоит из продольных ячеек, размером от 40 до 100 мкм, ориентированных вдоль продольной оси зерновки. Стенки ячеек – гладкие, име-

ют толщину 4-5 мкм и множество округлых пор диаметром 1-2 мкм. Так же встречаются фрагменты и осколки неправильной формы, размером от 10 до 200 мкм.

### *Порошковая рентгеновская дифракция (XRD)*

Методом XRD исследованы кристаллические структуры биоуглей (рис. 2.1.2). В биоугле из лозги подсолнечника обнаружен пик при  $2\theta = 24,40^\circ$ , а также два других пика при  $2\theta = 30,57^\circ$  и  $42,67^\circ$ . Первый пик относится к кварцевой фазе, а два других пика к кальцитовой фазе [Song et al., 2019]. Спектр древесного биоугля показал пики при  $2\theta = 22^\circ$  и  $2\theta = 41^\circ$ .

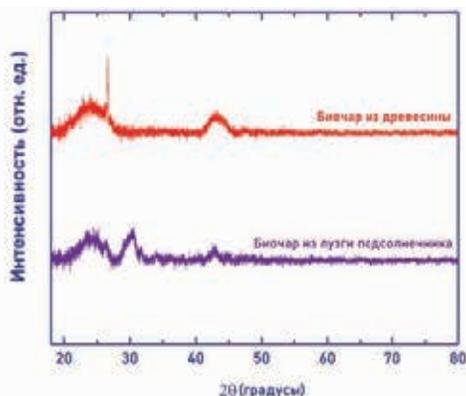


Рис. 2.1.2. Рентгеновские дифрактограммы углеродистых сорбентов  
Инфракрасная спектроскопия (поглощения)

Биоуголь из древесины содержал те же фазы, что и образец биоугля из лозги подсолнечника, а также была обнаружена фаза кристаллической целлюлозы (пики при  $2\theta = 22^\circ$  и  $2\theta = 41^\circ$ ).

В ИК-спектре древесного биочара (рис. 2.1.3) наблюдался высокий и широкий пик около  $3100-3600\text{ см}^{-1}$ , который был приписан валентным колебаниям гидроксильных функциональных групп или адсорбированной воды (Kamarulzaman, 2020). Узкие пики при  $2918$  и  $2846\text{ см}^{-1}$ , вероятно, связаны с асимметричными и симметричными валентными колебаниями алифатических C-H групп целлюлозы соответственно. Пик между  $1570$  и  $1476\text{ см}^{-1}$  можно отнести к валентным колебаниям C = C и

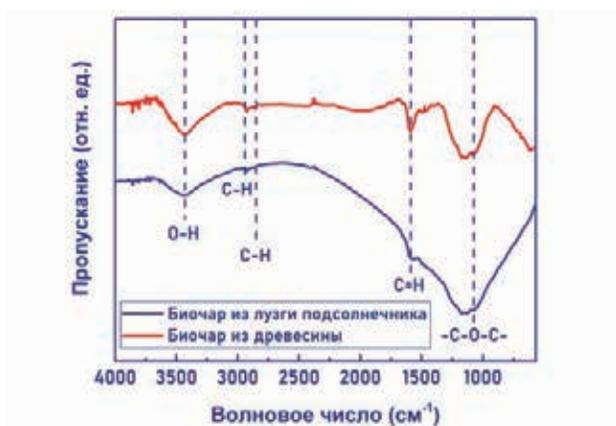


Рис. 2.1.3. ИК-спектры углеродистых сорбентов

деформационным колебаниям ( $sp^3$ ) C-H соответственно. Высокий и широкий пик в области  $900\text{--}1250\text{ см}^{-1}$  был отнесен к -COC- симметричному растяжению [Benarbia et al., 2015] или фенольным функциональным группам и простым эфирам [Li, Chen, 2018]. В ИК-спектре биоугля, полученного из лузги подсолнечника (рис. 2.1.3), наблюдается сильный пик при  $3100\text{--}3600\text{ см}^{-1}$  (валентные колебания OH и адсорбированной воды) и при  $900\text{--}1250\text{ см}^{-1}$ , который связан с колебаниями связей к C-O-C.

### *Термогравиметрический анализ*

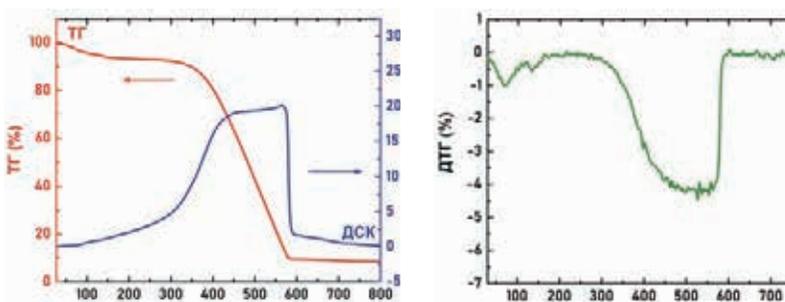
На рисунке 2.1.4 представлены результаты синхронного термического анализа углеродистых сорбентов в токе воздуха в интервале температур от 27 до  $800^\circ\text{C}$ .

Результаты СТА древесного биоугля показали, что при нагревании образца в диапазоне  $95\text{--}100^\circ\text{C}$  с поверхности сорбента удаляются гигроскопическая вода и сорбированные газы, а также различные летучие низкомолекулярные органические соединения (кривая ТГА). Это отображается на графике ДСК как эндотермический процесс и на кривой ДТГ для данного диапазона температур. Потеря веса образца на этой стадии составила 10%. При нагревании биоугля до  $250\text{--}300^\circ\text{C}$  начинается

постепенное горение остаточных фрагментов лигнина и целлюлозы [Yang et al., 2007], которое усиливалось при 390-400°C за счет окисления аморфным углеродом основного компонента биоугля. Этот экзотермический процесс наблюдался на кривой ДСК. Это сопровождалось значительной и наиболее интенсивной потерей массы (рис. 2.1.4), которая при достижении 600 °С составила 84 %. Общая потеря массы образца составила 96%.

Результаты ТГА биоугля из лузги подсолнечника показали, что при температуре около 105-110 °С основные потери массы связаны с десорбцией влаги с поверхности сорбента (рис. 2.1.4). Также испаряются некоторые остаточные летучие органические соединения, такие как, например, нафталин в диапазоне <150°C. Потеря веса образца на этом этапе составила примерно 6%, что немного меньше, чем у древесного биоугля. Следующая стадия

Биочар из лузги подсолнечника



Биочар из древесины

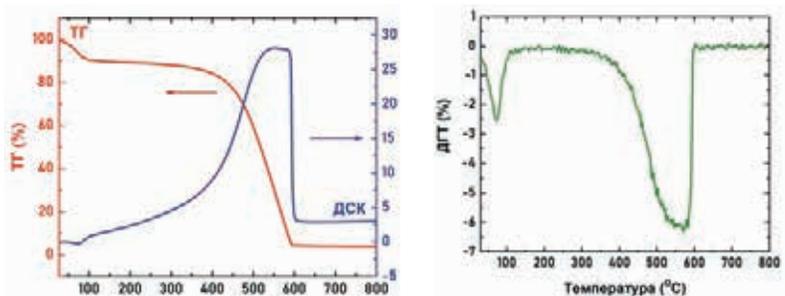


Рис. 2.1.4. Результаты синхронного термического анализа углеродистых сорбентов

разложения биоугля приурочена к интервалу 350-580°C и связана с процессом окисления углерода. Этот процесс был экзотермическим и сопровождался выделением большого количества энергии, наблюдаемой на кривой ТГА (рис. 2.1.4). На этом этапе была зарегистрирована самая сильная потеря веса, составившая примерно 80%. Общая потеря массы при одновременном термическом анализе биоугля из лузги подсолнечника составила 92%.

Таким образом, на основе исследования 4 температурных режимов (300 °С, 500 °С, 700 °С, 900 °С) и различного времени выдержки при конечной температуре (15 и 75 мин) и скорости нагрева (5, 10, 15, 20, 25°C/мин) разработана технология получения биочара из лузги подсолнечника с заданным балансом микро-, мезо- и макропор и высокой площадью удельной поверхности. Наилучшими структурными характеристиками и ароматичностью обладает биоуголь, полученный при скорости нагрева 15°C/мин до конечной температуры 700 °С и времени выдержки 75 мин.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, «Эффективность и механизмы биodeградации ПАУ и связывания углерода в загрязненных почвах с использованием иммобилизованной синергической микробиоты», соглашение No 075-15-2023-587

### Список использованной литературы

1. ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97) Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности (с Изменением № 1). – Взамен ГОСТ 11022-90; введ. 1997-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2006. – 8 с.
2. ГОСТ 7657-84 Уголь древесный. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
3. 123-4/281-8-87 Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. – М.: Государственный агропромышленный комитет СССР; Главное управление ветеринарии, 1987. – 4 с.
4. *Котчик Г.Н.* Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. – 2014. – №. 7. – С. 851-868.
5. *Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Аммосова Я.М.* Влияние кремниевых удобрений на растения и почву // Агрохимия. – 2002. – №. 2. – С. 86-93.

6. Российский статистический ежегодник. 2020: Статистический сборник. – М.: Росстат, 2020. – 700 с.

7. Сиволобова Н.О., Грачева Н.В., Жашуева К.А., Сикорская А.В. Адсорбционные материалы на основе лузги подсолнечника // Инженерный вестник Дона. – 2017. – Т. 44. – №. 1 – С. 1-8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4035](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4035)

8. EBC. Certification of the carbon sink potential of biochar, Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. Version 1.0E of 1st June 2021.

9. IBI. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. Version 2.1. International Biochar Initiative. – 2015.

10. Agegnehu G., Srivastava A.K., Bird M.I. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review // Applied Soil Ecology. – 2017. – Vol. 119. – P. 156-170.

11. Ahmad M., Rajapaksha A.U., Lim J.E., Zhang M., Bolan N., Mohan D., Vithanage M., Lee S.S., Ok Y.S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review // Chemosphere. – 2014. – Vol. 99. – P. 19-33.

12. Ahmed A., Jiby K., Vijaya R. Biochar influences on agricultural soils, crop production and the environment—a review // Environmental Reviews. – 2016. – Vol. 24. – P. 495-502.

13. Ajema L. Effects of biochar application on beneficial soil organism review // International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 5. – No. 5. – P. 9-18.

14. Anbalagan S., Jeevanantham S., Suresh K. Biochar as sustainable strategy for remediation and regeneration of heavy metal-contaminated soil // BioChar: Applications for Bioremediation of Contaminated Systems / ed. by R.T. Kapoor, M.P. Shah: Berlin.: De Gruyter, 2023. pp. 417-430.

15. Aslam Z., Khalid M., Naveed M., Shahid M., Aon M. Evaluation of green waste and poplar twigs biochar produced at low and high pyrolytic temperature for efficient removal of metals from water // Water, Air, & Soil Pollution. – 2017. – Vol. 228. – No. 11. – P. 432-446.

16. Benarbia A., Elidrissi A., Mohamed A., Tabaght F. E., Tahani A., Ouassini K. Kinetic thermal degradation of cellulose, polybutylene succinate and a green composite: comparative study // World Journal of Environmental Engineering. – 2015. – Vol. 3. – No. 4. – P. 95-110.

17. Bera T., Collins H.P., Alva A.K., Purakayastha T.J., Patra A.K. Biochar and manure effects on soil biochemical properties under corn production // Applied Soil Ecology. – 2016. – Vol. 107. – P. 360-367.

18. Blanco-Canqui H. Biochar and soil physical properties // Soil Science Society of America Journal. – 2017. – Vol. 81. – P. 687-711.

19. Bolan N., Hoang S.A., Beiyuan J., Gupta S., Hou D., Karakoti A., Joseph S., Jung S., Kim K.-H., Kirkham M. Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage // International Materials Reviews. – 2022. – Vol. 67. – No. 2. – P. 150-200.

20. Burachevskaya M., Minkina T., Bauer T., Lobzenko I., Fedorenko A., Mazarji M., Sushkova S., Mandzhieva S., Nazarenko A., Butova V. Fab-

rication of biochar derived from different types of feedstocks as an efficient adsorbent for soil heavy metal removal // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – No. 1. doi:10.1038/s41598-023-27638-9.

21. *Cameselle C., Gouveia S.* Electrokinetic remediation for the removal of organic contaminants in soils // *Current Opinion in Electrochemistry*. – 2018. – Vol. 11. – P. 41-47.

22. *Cao Y., Yuan X., Zhao Y., Wang H.* In-situ soil remediation via heterogeneous iron-based catalysts activated persulfate process: A review // *Chemical Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 431. – P. 133833

23. *Chen B., Zhou D., Zhu L.* Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures // *Environmental science & technology*. – 2008. – Vol. 42. – No. 14. – P. 5137-5143.

24. *Chen M., Xu P., Zeng G., Yang C., Huang D., Zhang J.* Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: applications, microbes and future research needs // *Biotechnology advances*. – 2015. – Vol. 33. – No. 6. – P. 745-755.

25. *Cheng N., Wang B., Wu P., Lee X., Xing Y., Chen M., Gao B.* Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 273. – P. 116448.

26. *Chowdhury Z.Z., Karim M.Z., Ashraf M.A., Khalid K.* Influence of carbonization temperature on physicochemical properties of biochar derived from slow pyrolysis of durian wood (*Durio zibethinus*) sawdust // *BioResources*. – 2016. – Vol. 11. – No. 2. – P. 3356-3372.

27. *Cui X., Yang J., Shi X., Lei W., Huang T., Bai C.* Pelletization of sunflower seed husks: evaluating and optimizing energy consumption and physical properties by response surface methodology (RSM) // *Processes*. – 2019. – Vol. 7. – No. 9. – P. 591-611.

28. *Dermont G., Bergeron M., Mercier G., Richer-Lafleche M.* Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications // *Journal of hazardous materials*. – 2008. – Vol. 152. – No. 1. – P. 1-31.

29. *Feng Q., Wang B., Chen M., Wu P., Lee X., Xing Y.* Invasive plants as potential sustainable feedstocks for biochar production and multiple applications: A review // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2021. – Vol. 164. – P. 105204.

30. *Foong S.Y., Liew R.K., Yang Y., Cheng Y.W., Yek P.N.Y., Wan Mahari W.A. Lee X.Y., Han C.S., Vo D.-V.N., Le Q.V., Aghbashlo M., Tabatabaei M., Sonne C., Peng W., Lam S.S.* Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 389. – P. 124401.

31. *Fu T., Zhang B., Xing G., Cui S. Guan C.-Y., Zhang Y., Zhang B., Peng Y.* Recent progresses, challenges, and opportunities of carbon-based

materials applied in heavy metal polluted soil remediation // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 856. – No. 1. – P. 158810. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.158810.

32. *Hayes D.J.M.* The role of catalysis for the sustainable production of bio-fuels and bio-chemicals. 1st edition. By K. Triantafyllidis, A. Lap-par, M. Stöcker. – NY, USA: New York, 2013. – 608 p.

33. *He X., Liu Z., Niu W., Yang L., Zhou T., Qin D., Niu Z., Yuan Q.* Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of gas and biochar obtained from pyrolysis of crop residues // *Energy*. – 2018. – Vol. 143. – P. 746-756.

34. *He Z., Shentu J., Yang X., Baligar V.C., Zhang T., Stoffella P.J.* Heavy metal contamination of soils: sources, indicators and assessment // *Journal of Environmental Indicators*. – 2015. – Vol. 9. – P. 17-18.

35. *Ippolito J.A., Cui L., Kammann C., Wrage-Mönnig N., Estavillo J.M., Fuertes-Mendizabal T., Cayuela M.L., Sigua G., Novak J., Spokas K., Borchard N.* Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review // *Biochar*. – 2020. – Vol. 2. – No. 4. – P. 421-438.

36. *Keiluweit M., Nico P.S., Johnson M.G., Kleber M.* Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) // *Environmental science & technology*. – 2010. – Vol. 44. – No. 4. – P. 1247-1253.

37. *Khalid S., Shahid M., Niazi N.K., Murtaza B., Bibi I., Dumat C.* A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – Vol. 182. – P. 247-268.

38. *Khodadoust A.P., Bagchi R., Suidan M.T., Brenner R.C., Sellers N.G.* Removal of PAHs from highly contaminated soils found at prior manufactured gas operations // *Journal of hazardous materials*. – 2000. – Vol. 80. – No. 1-3. – P. 159-174.

39. *Kozlov A.V., Kulikova A.H., Selitskaya O.V., Uromova I.P.* Stability of microbiological activity of the sod-podsolic soil when applying diatomite and zeolite // *Tomsk State University Journal of Biology*. – 2019. – Vol. 46. – P. 26-47.

40. *Kuppasamy S., Thavamani P., Venkateswarlu K., Lee Y.B., Naidu R., Megharaj M.* Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: Technological constraints, emerging trends and future directions // *Chemosphere*. – 2017. – Vol. 168. – P. 944-968.

41. *Lan D., Zhu H., Zhang J., Li S., Chen Q., Wang C., Wu T., Xu M.* Adsorptive removal of organic dyes via porous materials for wastewater treatment in recent decades: A review on species, mechanisms and perspectives // *Chemosphere*. – 2021. – P. 133464.

42. *Landers J., Gor G.Y., Neimark A.V.* Density functional theory methods for characterization of porous materials // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2013. – Vol. 437. – P. 3-32.

43. *Lawal A.T.* Polycyclic aromatic hydrocarbons. A review // *Cogent Environmental Science*. – 2017. – Vol. 3. – No. 1. – P. 1339841.

44. *Lehmann J.* Biological carbon sequestration must and can be a win-win approach // *Climatic Change*. – 2009. – Vol. 97. – No. 3. – P. 459-463.
45. *Lehmann J., Gaunt J., Rondon M.* Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. – 2006. – Vol. 11. – No. 2. – P. 403-427.
46. *Li S., Chen G.* Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures // *Waste Management*. – 2018. – Vol. 78. – P. 198-207.
47. *Li X., Xing W., Zhuo S., Zhou J., Li F., Qiao S.Z., Lu G.Q.* Preparation of capacitor's electrode from sunflower seed shell // *Bioresource technology*. – 2011. – Vol. 102. – No. 2. – P. 1118-1123.
48. *Li Y., Gupta R., Zhang Q., You S.* Review of biochar production via crop residue pyrolysis: Development and perspectives // *Bioresource Technology*. – 2023. – Vol. 369. – P. 128423.
49. *Liang X., Han J., Xu Y., Sun Y., Wang L., Tan X.* In situ field-scale remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and palygorskite // *Geoderma*. – 2014. – Vol. 235. – P. 9-18.
50. *Liu L., Li W., Song W., Guo M.* Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability // *Science of the total environment*. – 2018. – Vol. 633. – P. 206-219.
51. *Man Y., Wang B., Wang J., Slany M., Yan H., Li P., El-Naggar A., Shaheen S.M., Rinklebe J., Feng X.* Use of biochar to reduce mercury accumulation in *Oryza sativa* L: A trial for sustainable management of historically polluted farmlands // *Environment International*. – 2021. – Vol. 153. – P. 106527.
52. *Muzyka R., Misztal E., Hrabak J., Banks S.W., Sajdak M.* Various biomass pyrolysis conditions influence the porosity and pore size distribution of biochar // *Energy*. – 2023. – Vol. 263. – P. 126128.
53. *Ning X., Liang W., Wang G., Xu R., Wang P., Zhang J., Guo X., Jiang C., Li J., Wang C.* Effect of pyrolysis temperature on blast furnace injection performance of biochar // *Fuel*. – 2022. – Vol. 313. – P. 122648.
54. *Omondi M.* Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data // *Geoderma*. – 2016. – Vol. 274. – P. 28-34.
55. *Qian L., Zhang W., Yan J., Han L., Gao W., Liu R., Chen M.* Effective removal of heavy metal by biochar colloids under different pyrolysis temperatures // *Bioresource technology*. – 2016. – Vol. 206. – P. 217-224.
56. *Qin G., Niu Z., Yu J., Li Z., Ma J., Xiang P.* Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology // *Chemosphere*. – 2021. – Vol. 267. – P. 129205.
57. *Qu J., Tian X., Zhang X., Yao J., Xue J., Li K., Zhang B., Wang L., Zhang Y.* Free radicals-triggered reductive and oxidative degradation of highly chlorinated compounds via regulation of heat-activated persulfate by low-molecular-weight organic acids // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2022. – Vol. 310. – P. 121359.

58. *Ralebitso-Senior T. Komang, Orr C.H.* Biochar Application: Essential Soil Microbial Ecology. 1st edition. By T. Komang Ralebitso-Senior and C.H. Orr. – NY, USA: New York, 2016. – 344 p.

59. *Razali N., Kamarulzaman N.Z.* Chemical characterizations of biochar from palm oil trunk for palm oil mill effluent (POME) treatment // *Materials Today: Proceedings.* – 2020. – Vol. 31. – P. 191-197.

60. *Saghir S., Pu C., Fu E., Wang Y., Xiao Z.* Synthesis of high surface area porous biochar obtained from pistachio shells for the efficient adsorption of organic dyes from polluted water // *Surfaces and Interfaces.* – 2022. – Vol. 34. – P. 102357.

61. *Sakshi, Singh S.K., Haritash A.K.* Polycyclic aromatic hydrocarbons: soil pollution and remediation // *International Journal of Environmental Science and Technology.* – 2019. – Vol. 16. – No. 10. – P. 6489-6512.

62. *Sharma S., Tiwari S., Hasan A., Saxena V., Pandey L.M.* Recent advances in conventional and contemporary methods for remediation of heavy metal-contaminated soils // *3 Biotech.* – 2018. – Vol. 8. – No. 4. – P. 216-234.

63. *Song H., Wang J., Garg A., Lin X., Zheng Q., Sharma S.* Potential of novel biochars produced from invasive aquatic species outside food chain in removing ammonium nitrogen: Comparison with conventional biochars and clinoptilolite // *Sustainability.* – 2019. – Vol. 11. – No. 24. – P. 7136-7154.

64. *Song W., Guo M.* Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures // *Journal of analytical and applied pyrolysis.* – 2012. – Vol. 94. – P. 138-145.

65. *Srivastava A.K.* The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review // *Applied Soil Ecology.* – 2017. – Vol. 119. – P. 156-170.

66. *Suliman W., Harsh J.B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.M., Dallmeyer, I., Garcia-Perez, M.* The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil // *Science of the Total Environment.* – 2017. – Vol. 574. – P. 139-147.

67. *Sun L., Wu Q., Liao K., Yu P., Cui Q., Rui Q., Wang D.* Contribution of heavy metals to toxicity of coal combustion related fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in *Caenorhabditis elegans* with wild-type or susceptible genetic background // *Chemosphere.* – 2016. – Vol. 144. – P. 2392-2400.

68. *Tan L., Ma Z., Yang K., Cui Q., Wang K., Wang T., Wu G.L., Zheng J.* Effect of three artificial aging techniques on physicochemical properties and Pb adsorption capacities of different biochars // *Science of the Total Environment.* – 2020. – Vol. 699. – P. 134223.

69. *Tu C., Wei J., Guan F., Liu Y., Sun Y., Luo Y.* Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil // *Environment international.* – 2020. – Vol. 137. – P. 105576.

70. *Wang B., Gao B., Wan Y.* Entrapment of ball-milled biochar in Calcium alginate beads for the removal of aqueous Cd (II) // *Journal of industrial and engineering chemistry.* – 2018. – Vol. 61. – P. 161-168.

71. *Uchimiya M., Chang S.C., Klasson K.T.* Screening biochars for heavy metal retention in soil: role of oxygen functional groups // *Journal of Hazardous Materials.* – 2011. – Vol. 190. – No. 1-3. – P. 432-441.

72. *Usman A.R.A., Abduljabbar A., Vithanage M., Ok Y.S., Ahmad M., Ahmad M., Elfaki J., Abdulazeem S.S., Al-Wabel M.I.* Biochar production from date palm waste: Charring temperature induced changes in composition and surface chemistry // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.* – 2015. – Vol. 115. – P. 392-400.

73. *Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G.* An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges // *Fuel.* – 2013. – Vol. 105. – P. 19-39.

74. *Wang B., Gao B., Wan Y.* Entrapment of ball-milled biochar in Calcium alginate beads for the removal of aqueous Cd (II) // *Journal of industrial and engineering chemistry.* – 2018. – Vol. 61. – P. 161-168.

75. *Wang P., Wang S., Chen F., Zhang T., Kong W.* Preparation of two types plant biochars and application in soil quality improvement // *Science of The Total Environment.* – 2024. – Vol. 906.– P. 167334.

76. *Waqas M., Nizami A.S., Aburiazaiza A.S., Barakat M.A., Ismail I.M.I., Rashid M.I.* Optimization of food waste compost with the use of biochar // *Journal of environmental management.* – 2018. – Vol. 216. – P. 70-81.

77. *Wu P., Wang Z., Wang H., Bolan N.S., Wang Y., Chen W.* Visualizing the emerging trends of biochar research and applications in 2019: a scientometric analysis and review // *Biochar.* – 2020. – Vol. 2. – No. 2. – P. 135-150.

78. *Wu Y.J., Zhou H., Zou Z.J., Zhu W., Yang W.T., Peng P.Q., Zeng M., Liao B.-H.* A three-year in-situ study on the persistence of a combined amendment (limestone+ sepiolite) for remedying paddy soil polluted with heavy metals // *Ecotoxicology and Environmental Safety.* – 2016. – Vol. 130. – P. 163-170.

79. *Wuana R.A., Okieimen F.E.* Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation // *International Scholarly Research Notices.* – 2011. – Vol. 2011. – P. 1-20.

80. *Xu Y., Liang X., Xu Y., Qin X., Huang Q., Wang L., Sun Y.* Remediation of heavy metal-polluted agricultural soils using clay minerals: a review // *Pedosphere.* – 2017. – Vol. 27. – No. 2. – P. 193-204.

81. *Yaashikaa P.R., Kumar P.S., Varjani S., Saravanan A.* A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy // *Biotechnology Reports.* – 2020. – Vol. 28. – P. e00570.

82. *Yakout S.M.* Physicochemical characteristics of biochar produced from rice straw at different pyrolysis temperature for soil amendment and removal of organics // *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences.* – 2017. – Vol. 87. – No. 2. – P. 207-214.

83. *Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C.* Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis // *Fuel.* – 2007. – Vol. 86. – No. 12-13. – P. 1781-1788.

84. *Yang G., Zheng X., Wang K., Sun Y., Xi Y., Dan Z., Chen L.* The effect of pyrolysis temperature on the N conversion of biochar derived from the residue of *Chlorella vulgaris* after lipid extraction // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2023. – Vol. 169. – P. 105810.

85. *Yuan C., Gao B., Peng Y., Gao X., Fan B., Chen Q.* A meta-analysis of heavy metal bioavailability response to biochar aging: Importance of soil and biochar properties // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 756. – P. 144058.

86. *Zhang D., Yan M., Niu Y., Liu X., van Zwieten L., Chen D., Bian R., Cheng K., Li L., Joseph S., Zheng J., Zhang X., Zheng J., Crowley D., Fillet T.R., Pan G.* Is current biochar research addressing global soil constraints for sustainable agriculture? // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2016. – Vol. 226. – P. 25-32.

87. *Zhao S.X., Ta N., Wang X.D.* Effect of temperature on the structural and physicochemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material // *Energies*. – 2017. – Vol. 10. – No. 9. – P. 1293-1308.

88. *Zotiadis V., Argyraki A., Theologou E.* Pilot-scale application of attapulgitic clay for stabilization of toxic elements in contaminated soil // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2012. – Vol. 138. – No. 5. – P. 633-637.

89. *Zou Z., Tang Y., Jiang C., Zhang J.* Efficient adsorption of Cr (VI) on sunflower seed hull derived porous carbon // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 3. – No. 2. – P. 898-905.

## **Technology for producing highly porous carbon materials from plant raw materials for sustainable development purposes**

***Bauer T.V., Minkina T.M., Sushkova S.N., Mandzhieva S.S.,  
Barakhov A.V., Kozmenko S.V., Dudnikova T.S.,  
Burachevskaya M.V., Chernikova N.V.***

**Abstract.** Continuous anthropogenic emissions of carbon dioxide have led to its record concentrations in the atmosphere and intensified global warming, putting the Earth's ecosystem at risk. The production of biochar and its sequestration in soil are promising ways to mitigate global warming. This study is devoted to developing and optimising technology for the production of high-carbon materials based on agricultural crop wastes. Using a laboratory pyrolysis unit, pilot batches of biochar samples from sunflower seed husks were obtained in a wide range of pyrolysis operating conditions. Temperature regimes (300, 500, 700, 900 °C), heating rates (5, 10, 15, 20, 25 °C/min) to the final temperature and pyrolysis duration (15 and 75 min) for the formation of the required characteristics of the sorbent porosity were tested. It was found that the best structural characteristics and aromaticity is exhibited by biochar obtained at a heating rate of 15 °C/min to the final temperature of 700 °C and a holding time of 75 min.

## 2.2. Оценка влияния различных доз внесения биоугля на урожайность сои сорта Скульптор в условиях Агроэкологического стационара РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

*Жигалева Я.С., Тихонова М.В., Илюшкова Е.М.*

**Аннотация:** В ходе опыта по моделированию условий приближения к углеродной нейтральности была проведена посадка сои сорта Скульптор с внесением различных доз биоугля (3 кг/м<sup>2</sup>, 1 кг/м<sup>2</sup> и контроль). В статье приведены полученные результаты по влиянию данного фактора на биометрию и урожайность растений.

Одними из наиболее актуальных задач, которые стоят в настоящее время перед всем мировым сообществом, являются борьба с изменениями климата и сохранение и увеличение плодородных земель, способных обеспечить продуктами питания все возрастающее население планеты. Биоуголь – это способ возвращения углерода, содержание которого в атмосферном воздухе стремительно возрастает, обратно в почвы, из которых он также стремительно исчезает. Современные методы ведения сельского хозяйства, включая обработку почвы и обильное использование химических удобрений и пестицидов, приводят к тому, что большая часть органического почвенного углерода разлагается до СО<sub>2</sub>. Таким образом, до одной трети избыточного углекислого газа в атмосферу поступает из почв.

Растения поглощают углекислый газ из воздуха во время фотосинтеза и превращают его в углеводы и различные молекулы на основе углерода в процессе формирования биомассы. Каждый год растения поглощают и удерживают около 60 гигатонн углерода. Если мы предотвратим разложение части этой биомассы, преобразовав ее в биоуголь, и используем его для повышения плодородия почв, то сможем решить проблемы изменения климата и продовольственной безопасности.

Биоуголь является многоцелевой почвенной добавкой для решения двух ключевых глобальных проблем – деградации почвы и изменения климата. Уникальные свойства биоугля заключают-

ся в природе его углеродной структуры, которая более устойчива в почве, чем структура органического вещества, не подвергшегося осаждению. При правильном изготовлении и применении биоچار может сохраняться в грунте в течение сотен лет.

Эта характеристика дает биоуглю сравнительное преимущество перед альтернативными методами поглощения углерода в почве, как с точки зрения продолжительности хранения, так и с точки зрения совместимости с традиционными операциями по обработке почвы.

Параллельно с эффектом связывания углерода, применение биоугля способствует улучшению качества почвы и повышению продуктивности сельскохозяйственных культур.

Идея о том, что уголь можно использовать для улучшения плодородия почв, возникла в результате открытия и исследования почв Терра прета в бассейне Амазонки. Терра прета необычны по ряду причин. Большая часть тропических почв не накапливают органический углерод в виду климатических особенностей региона и являются крайне бедными и неподходящими для культивирования сельскохозяйственных растений с неглубокой корневой системой. Умирающая биомасса разлагается непосредственно на  $\text{CO}_2$  в течение нескольких недель. В результате тропические почвы имеют оттенки желтого, оранжевого или красного цвета. Терра прета же черная, очень богатая углеродом и питательными веществами для растений почва. Данный эффект был достигнут в результате того, что ещё в древности, по некоторым данным, до нашей эры, проживающие на этих землях индейские племена стали вносить в до этого неплодородные почвы конечный продукт компостных куч, состоящих из угля и биологических отходов. Частицы угля из Терра прета очень малы, большинство из них составляют от 10 до 20 микрометров, а те, что находятся в верхнем горизонте почвы, агрегируются с глинистыми частицами и богатым разнообразием минералов и подвижных органических веществ. Терра прета одновременно удивительно плодородна и удивительно устойчива, особенно учитывая ее расположение в тропической среде [Glaser и др., 2002].

Таким образом можно сделать вывод о том, что подобные почвы, в частности богатые глинистой фракцией и неплодородные, имеют огромные перспективы для применения биоугля. Их

фракционный состав способен обеспечить аккумуляцию углерода в почве на долгие годы и снизить эффекты глобального изменения климата, а повышение плодородия этих земель способствует продовольственной и экономической устойчивости региона, что актуально как для развивающихся стран, так и для развитых.

В настоящий момент под биоуглем понимается конденсированный коксовый остаток с достаточно высоким содержанием углерода, который образуется в результате термического разложения биомассы в отсутствие окислительной среды в диапазоне температур от 450°C до 900°C. В качестве сырья для получения биоугля может использоваться различное органосодержащее сырье, являющееся отходами агропромышленного и лесного комплексов, это низкотоварная древесина, навоз, листья, солома, гречневая шелуха и т.п.

Одним из преимуществ биоугля является то, что его производство дает возможность превратить затраты на утилизацию отходов биомассы в доход. Например, в качестве сырья для его изготовления могут быть использованы отходы лесозаготовительных хозяйств, предприятий по переработке орехов, плантаций кофе, виноградников и фруктовых садов. Зачастую подобные отходы требуют специальной утилизации, позволяющей не допустить размножения вредителей и болезней, что и способен обеспечить процесс пиролиза.

Еще одними из крупных поставщиков сырья могут быть животноводческие комплексы. Навоз животных вызывает загрязнение грунтовых вод нитратами и фосфатами, даже если он разбрасывается по окрестным полям в качестве биоудобрения. Применение же биоугля еще на этапе подстилки способно благоприятно сказаться на состоянии животных и снизить выбросы некоторых газов в атмосферу, в частности аммиака.

При этом тепло, получаемое в процессе производства биоугля, может быть использовано на месте, например, для сушки древесины или обогрева животноводческих комплексов, что позволяет экономить энергоресурсы. Сам биоуголь также может быть использован хозяйством, что позволит ему приблизиться к безотходной системе производства.

Помимо запасаания почвенного углерода, применение биоугля на сельскохозяйственных землях способно привести к:

- улучшению структуры и пористости почвы;

- увеличению влагоудерживающей функции почвы;
- снижению кислотности;
- сокращению выбросов закиси азота;
- регулирование выщелачиванию азота;
- улучшению электропроводности;
- снижению токсичности тяжелых металлов;
- повышению микробной активности и способности почвы подавлять болезнетворные микроорганизмы [Santo и др., 2019; Park и др., 2011; Woolf и др., 2010].

Структура биоугля в значительной степени аморфна, но содержит некоторую локальную кристаллическую структуру сильно сопряженных ароматических соединений. Также в структуре биоугля есть пустоты, образованные в виде пор, трещин и морфологии клеточного происхождения биомассы. Атомы углерода прочно связаны друг с другом, и именно это делает их устойчивыми к воздействию микроорганизмов и разложению. Обладая поверхностью 200-500 м<sup>2</sup> на грамм и высокой пористостью, биоуголь может поглощать воду и содержащиеся в ней питательные вещества, в пять раз превышающие его собственный вес [Downie и др., 2002].

Анализ исследований показал, что в среднем добавление биоугля в почву повышает pH, урожайность, содержание углерода, азота и фосфора, а также концентрацию калия в тканях растений. Увеличению урожайности более выражено на сильно деградированных почвах, которые практически не получали удобрений.

Внесение биоугля напрямую способствует обеспечению растений питательными веществами, в частности, благодаря содержанию золы. Количество питательных веществ в биочаре зависит от сырья, из которого он изготовлен.

Например, биочар из птичьего помета содержит большое количество фосфора, а из соломы и травы – большое количество калия. Для производства биочара можно использовать богатое азотом сырье, такое, как птичий помет и биотвердые вещества, но значительная часть азота улетучивается во время пиролиза, а оставшийся азот нелегко минерализуется.

Более важным, чем содержание питательных веществ в биоугле, является его способность улавливать питательные вещества при смешивании с другими источниками питательных веществ.

Однако несмотря на давнюю историю применения биоугля, ведущую свое начало с традиций индейских племен, в современном сельском хозяйстве этот материал стал использоваться сравнительно недавно. Поэтому его применение все еще требует дополнительных исследований. Так существует мнение, что для достижения того же эффекта, что и в регионе Амазонки, биоуголь сначала необходимо «активировать», т.е. он должен быть обогащен питательными веществами и почвенными организмами, например, во время компостирования. Если в почву вносится чистый биоуголь, он забирает воду и растворенные в ней вещества из окружающей среды и, таким образом, оказывает прямо противоположный эффект. Решениями этой проблемы могут служить способы применения биоугля в качестве добавки к корму или подстилке для животных, его внесение в компостные кучи, в последнем случае это также способствует уменьшению выбросов парниковых газов и увеличению микробиологической активности, необходимой для процесса компостирования.

Также некоторые исследователи сообщают о том, что применение биоугля ни оказало никакого эффекта на состояние сельскохозяйственных культур или даже оказало негативное воздействие [Zhang и др., 2012].

В качестве недостатка биоуголь может быть источником загрязнения, принося полиароматические углеводороды (ПАУ), диоксины, ЛОС и тяжелые металлы в зависимости от его исходного сырья и условий производства. Однако биоуголь может иммобилизовать тяжелые металлы посредством сорбции, осаждения и реакций восстановления рН / окисления, и было показано, что он последовательно снижает концентрацию тяжелых металлов в растениях.

Биоуголь может выступать в качестве источника ПАУ в почвах, однако наблюдаемые концентрации остаются ниже максимально допустимого предела. Биочар обладает способностью адсорбировать пестициды, что потенциально приводит к их накоплению в почвах, хотя они становятся менее доступными и также могут разлагаться биоуглем.

Противоречивые данные встречаются и по устойчивости биоугля и его способности удерживать углерод [Butnan и др., 2015]. Все это говорит о том, что необходимо как можно больше исследований применения биоугля в различных климатических

зонах и типах хозяйствования, чтобы мы смогли получить наиболее полную картину его влияния на почвы, сельскохозяйственные культуры, животных и человека, а также на способность противодействовать глобальным изменениям климата.

## Материалы и методы

В 2022 году на Агроэкологическом стационаре Полевой станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева был заложен опыт по моделированию условий приближения к углеродной нейтральности. Суть опыта заключается в выращивании зернобобовых культур на урбанизированных дерново-подзолистых почвах с применением биоугля и оценке его влияния на параметрические особенности культуры и почвы.

Схема опыта, заложенного на Полевой станции Агроэкологического стационара РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, включает в себя три делянки размером  $2 \times 10$  м, на одну из которых биоуголь вносился в количестве  $3 \text{ кг/м}^2$ , на вторую – в количестве  $1 \text{ кг/м}^2$ , а третья представляет собой контроль без внесения биоугля (далее по тексту варианты 3, 1 и 0 соответственно) (рис. 2.2.1).



Рис. 2.2.1. Схема опыта

В качестве посевной культуры была выбрана соя культурная (*Glucine max*) сорта Скульптор.

### Результаты

В результате нами были получены следующие данные по биометрии и урожайности изучаемой культуры (рис. 2.2.2). Средняя длина стебля была максимальной в варианте с контролем и составляла 53,55 см, при 48,5 см в варианте 1 и 38,84 см в варианте 3. Также в варианте без внесения биоугля отмечалась максимальная длина стебля, составившая 84 см (77 см и 60 см в вариантах с 1 и 3 соответственно) (рис. 2.2.2).

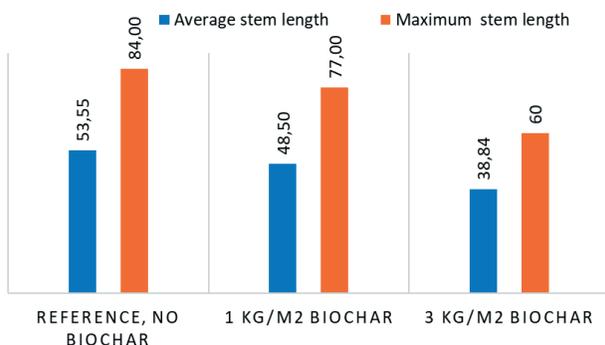


Рис. 2.2.2. Средняя и максимальная длина стебля по делянкам

Однако общее количество растений с делянки было наибольшим в варианте 3 и составило 728 растений при 474 растениях в варианте 1 и 406 растениях в варианте 0 (рис. 2.2.3).

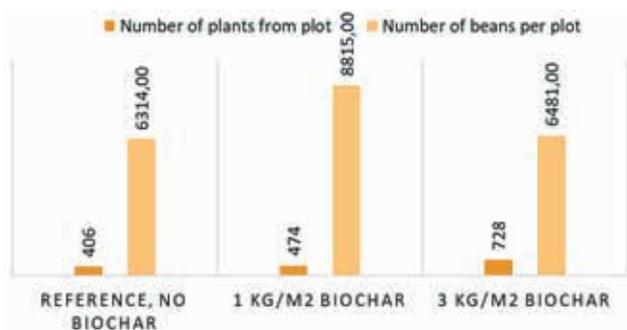


Рис. 2.2.3. Общее количество растений и бобов с делянки

Общее количество растений в вариантах без внесения биоугля и с внесением  $3 \text{ кг/м}^2$  биоугля различается практически в 2 раза, что может объясняться влагоудерживающей способностью биоугля, создающей благоприятные условия для прорастания семян.

Общее количество бобов с делянки составляет 8815 шт. в варианте 1, 6481 шт. в варианте 3 и 6314 в варианте 0. Таким образом, за счет большего количества растений на делянке с внесением  $3 \text{ кг/м}^2$  биоугля общее количество бобов во вариантах 0 и 3 оказалось практически равным, однако разрыв с показателем варианта 1 довольно существенный (рис. 2.2.4).

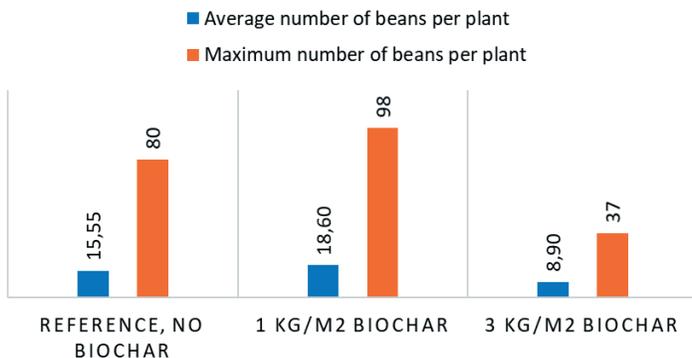


Рис. 2.2.4. Среднее и максимальное количество бобов с одного растения

Среднее количество бобов с одного растения было максимальным в варианте 1 и составило 18,6 шт. В варианте 0 данный показатель был равен 15,55 шт., а в варианте 3 – 8,9 шт. В данном случае разница между вариантами также практически в два раза, однако теперь делянка с максимальным внесением биоугля показала худший результат.

Максимальное количество бобов с одного растения также было зафиксировано в варианте 1 – 98 шт., при 80 шт. и 37 шт. в вариантах 0 и 3 соответственно (рис. 2.2.4).

Общая биомасса растений (без учета корней) составляет 12,8 кг с делянки в варианте 0, 14,2 кг с делянки в варианте 1 и

8,65 кг с делянки в варианте 3. Масса же бобов с одной делянки составила 5,9 кг с делянки в варианте 0, 8,8 кг с делянки – в варианте 1 и 4,7 кг с делянки – в варианте 3 (рис. 2.2.5).

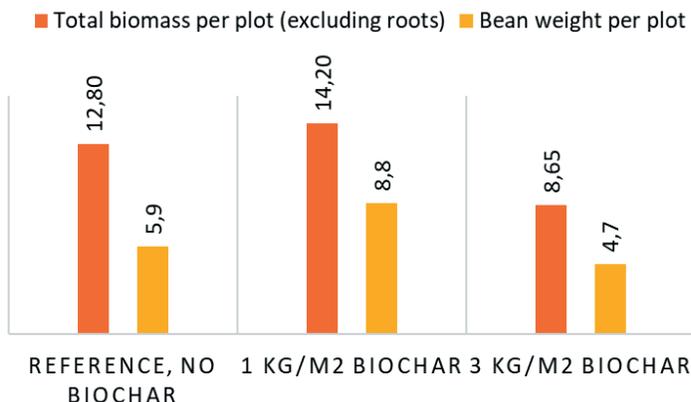


Рис. 2.2.5. Общая биомасса растений (без учета корней) и масса бобов с делянки

Таким образом, урожайность составила 2,95 т/га в варианте 0, 4,4 т/га в варианте 1 и 2,35 т/га в варианте 3.

Соответственно лучший результат в плане урожайности и прироста биомассы показал вариант опыта с внесением биоугля в количестве 1 кг/м<sup>2</sup>.

## Выводы

Проведенное исследование показало, что доза внесения биочара 1 кг/м<sup>2</sup> оказывает положительное влияние на прирост биомассы сои культурной. В то время как применение биочара в дозе 3 кг/м<sup>2</sup> оказало на исследуемую культуру угнетающее воздействие (за исключением показателя количества растений). Таким образом, прибавка в урожайности в варианте 1 кг/м<sup>2</sup> составила 49,1%, а потеря в варианте 3 кг/м<sup>2</sup> – 20,3% относительно контроля.

## Список использованной литературы

1. Butnan, S. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy / S. Butnan, J.L. Deenik, B. Toomsan, M.J. Antal, P. Vityakon // *Geoderma*. – 2015.
2. Downie, A. Physical Properties of Biochar / *Biochar for Environmental Management* / A. Downie, A. Crosky, P. Munroe // Earthscan, London. – P 13–32. – 2009.
3. Santos, F. M. Negative emission technologies / F. M. Santos, A. L. Gonçalves, J.C.M. Pires // *Bioenergy with Carbon Capture and Storage. Using Natural Resources for Sustainable Development*. – P. 1–13. – 2019.
4. Glaser, B. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review / B. Glaser, J. Lehmann, W. Zech // *Biol Fertil Soils* P. 219–230. – 2002.
5. Park, J.H. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils / J.H. Park, D. Lamb, P. Panerselvam, G. Choppala, N. Bolan, J.W. Chung. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011.
6. Woolf, D. Sustainable biochar to mitigate global climate change / D. Woolf, J.E. Amonette, F.A. Street-Perrott, J. Lehmann, S. Joseph // *Nature Communications*. – 2010. P. 1–9.
7. Zhang, A. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles / A. Zhang, R. Bian, G. Pan, L. Cui, Q. Hussain, L. Li, et al. // *Field Crops Research*. – 2012.

### **Assessment of the effect of various doses of biochar application on the yield of Sculptor soybeans in the conditions of the Agroecological Station of the Russian Timiryazev State Agrarian University**

*Zhigaleva Ya.S., Tikhonova M.V., Ilyushkova E.M.*

**Abstract:** In the course of the experiment on modeling conditions approaching carbon neutrality, soybean of the Sculptor variety was planted with various doses of bio-carbon (3 kg/m<sup>2</sup>, 1 kg/m<sup>2</sup> and control). The article presents the results obtained on the influence of this factor on biometrics and plant productivity.

### 2.3. Положительный опыт применения почво- и углерод-сберегающих агротехнологий с внесением биоугля в условиях Дальнего Востока России

*Нестерова О.В., Бовсун М.А., Семаль В.А.,  
Брикманс А.В., Сакара Н.А.*

**Аннотация:** На основании положительных результатов многолетнего полевого эксперимента по внесению биоугля под овощные культуры в Приморском крае на почвах тяжелого гранулометрического состава был доказан его секвестрационный эффект и положительное влияние на водно-физические свойства почв. После первого года применения биоугля показано достоверное снижение потока  $\text{CO}_2$  на поле без дренажной системы на 4,5% в дозе внесения биоугля  $1 \text{ кг/м}^2$  и на 36,6% в дозе внесения биоугля  $3 \text{ кг/м}^2$  по сравнению с участком без внесения биоугля. Снижение потока  $\text{CO}_2$  свидетельствует о мелиоративном действии биоугля, обусловленном его высокими сорбционными свойствами, влияющими на секвестрационную емкость почвы. После второго года применения биоугля наибольшее снижение потока  $\text{CO}_2$  наблюдалось при внесении  $1 \text{ кг/м}^2$ . Наибольшая разница между значениями потока  $\text{CO}_2$  на контрольном участке и участками с внесением биоугля отмечена в сентябре после аномального количества осадков, зафиксированного в августе (521 мм). Так, на контрольном участке в сентябре поток  $\text{CO}_2$  составил  $2276 \text{ мг CO}_2 \text{ м-2 ч-1}$ , на участке с внесением  $1 \text{ кг/м}^2$  биоугля поток  $\text{CO}_2$  составил  $560 \text{ мг CO}_2 \text{ м-2 ч-1}$ , на участке с внесением  $3 \text{ кг/м}^2$  –  $975 \text{ мг CO}_2 \text{ м-2 ч-1}$ .

Внедрение низкоуглеродных технологий в сельское хозяйство России и сохранение почвенного плодородия становится все более актуальным, особенно с учетом мирового запроса на декарбонизацию. Поиск решений, при которых обработка почвы минимальна, а усвоение углерода и азота внутри почвенных циклов становится более полным, выходит на первый план современных агроэкологических прикладных исследований. В связи с этим необходимо создание отечественных климатических проектов для участия России как на внутренних, так и внешних аграрных рынках.

Большинство почв Дальневосточного региона являются тяжелыми по гранулометрическому составу и при механической обработке они теряют агрономически ценную структуру, за счет чего идет потеря почвенного плодородия, включая потерю почвенного углерода и ухудшение водно-воздушного режима [Нестерова и др., 2020]. Особенно это касается овощных культур, урожай которых зависит не только от количества питательных элементов, но и от их доступности для растений за счет оптимальных условий в пахотном горизонте почв. Поиск экологически чистых и недорогих структуров почвы, внедрение их в агроэкосистемы, оценка противозерозионной устойчивости и эмиссии парниковых газов, расчет углеродного следа при сельскохозяйственном производстве являются новыми исследовательскими задачами для внедрения низкоуглеродных технологий в Дальневосточном регионе.

Несмотря на то, что биоуголь становится достаточно популярной технологией в мировой практике, используемой для улучшения качества почв и утилизации органических отходов, количество публикаций, оценивающих эффекты биоугля в разных почвенно-климатических условиях, остается недостаточным [Zhang et al., 2016; Gurwick et al., 2013; Angst et al., 2014]. Несмотря на всю привлекательность использования биоугля в качестве улучшителя почв и высокую эффективность от применения в некоторых экспериментах, важно понимать, что почвенно-климатические условия являются основными факторами, определяющими как экологические, так и экономические эффекты от внесения биоугля.

Самый большой вопрос, возникающий при оценке эффективности биоугля – срок действия этого продукта в почве [Ding et al., 2016]. Пористая структура биоугля считается важным фактором для улучшения водно-физических свойств почвы и увеличения ее водоудерживающей способности [Brassard et al., 2016; Wang et al., 2014; Попова и др., 2019; Bian et al., 2014; Liu et al., 2014; Asai et al., 2009].

Для оценки эффективности использования биоугля как низкоуглеродной технологии нами был заложен многолетний вегетационный полевой эксперимент. Он поведился на территории Приморской овощной опытной станции филиала ФНЦО (с. Су-

ражевка, Приморский край) в течение весенне-осеннего периодов 2018 и 2019 годов.

На территории станции было выбрано два сопоставимых по условиям рельефа и почв поля, одно из которых имело дренажную систему, другое – нет (табл. 2.3.1). Каждое из полей делилось на три участка площадью 21,6 м<sup>2</sup> (1,8 × 12 м), которые включали в себя контрольный участок без внесения биоугля, участок с внесением 1 кг/м<sup>2</sup> биоугля и участок с внесением 3 кг/м<sup>2</sup> биоугля. Биоуголь вносился в почву вручную один раз в июне 2018 года в поверхностный горизонт 0–10 см. Более подробную схему внесения и ее описание можно найти в наших предыдущих работах [Bovsun et al., 2020; 2021; Нестерова и др., 2021; Бовсун и др., 2023].

Таблица 2.3.1. Характеристики пахотного слоя (0–10 см) агропочв до эксперимента

Свойства почв	Значения	
	Поле без дренажной системы	Поле с дренажной системой
Песок, %	18	7
Ил, %	57	68
Глина, %	26	25
Плотность (g cm <sup>-1</sup> )	1.2	1.2
Органический углерод (%)	2.6	2.1
pH (in 1 mol dm <sup>-3</sup> KCl)	5.45	5.43
K <sub>2</sub> O (mg kg <sup>-1</sup> )	200	104
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	140	90
N <sub>eh</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	133	129

Почва на исследуемых участках представлена агроземноуглевым подбелом (*Luvic Anthrosols*). Исходные характеристики пахотного слоя почвы на исследуемом участке представлены в табл. 2.3.1.

Биоуголь, использованный в работе, был получен из древесных остатков березы *Betula alba* методом медленного пиролиза

при температуре 360-380°C компанией «Красилов и Ко» (Россия). Перед применением биоугля в эксперименте проводилась оценка его свойств согласно международному стандарту IBI. Используемый биоуголь является экологически чистым, имеет высокопрочную (Н/С = 0,052 и О/С = 0,145) и высокопористую структуру (площадь поверхности пор 73.25 м<sup>2</sup>/г), содержит 78,13% углерода, рНН<sub>2</sub>О составляет 8,09 ± 0,07, водопоглощающая способность в оригинальной фракции составляет 110 % ± 6,56%. После нахождения биоугля в почве в течение 4 и 16 месяцев оценивалось изменение свойств биоугля, подробно о результатах которых описано в работе Бовсун и соавт. [Bovsun et al., 2021].

Потоки парниковых газов измеряли в лабораторных условиях с помощью лазерного газоанализатора Picarro G2508 (Picarro Inc., Санта-Клара, Калифорния, США). Три бюкса с неповрежденными почвенными образцами, отобранными на опытных участках, помещали в стеклянную камеру газоанализатора объемом один литр, оборудованную крышкой с уплотнительным кольцом и входным и выходным отверстиями для перемещения газа, соединенных с газоанализатором тефлоновыми трубками. Время измерения потока составляло 5 минут (53 измерения в минуту/265 измерений за 5 минут). Таким образом, для каждого участка получали три пятиминутных измерения (9 измерений для всех участков).

Температура и давление воздуха в лаборатории измерялись с помощью погодного датчика Vaisala WXT520 (Vaisala, Хельсинки, Финляндия).

Потоки CO<sub>2</sub> рассчитывали по формуле (уравнение 2.3.1):

$$F_{gas} = \frac{\Delta[Gas] \cdot V \cdot \rho}{A \cdot \Delta t}, \quad (2.3.1)$$

где  $F_{gas}$  = поток газа, выраженный в  $\mu\text{моль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ;

$\Delta[Gas]/\Delta t$  – изменение концентрации газа во времени, выраженное в  $\mu\text{моль моль}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;

$V$  – общий объем камеры в м<sup>3</sup>;

$A$  – площадь камеры в м<sup>2</sup>;

$\rho$  – молярная плотность воздуха в  $\text{моль м}^{-3}$ .

Коэффициент детерминации  $R_2$  использовался при расчете  $\Delta[\text{Gas}]/\Delta t$  для оценки достоверности измеренных данных о потоке.

После первого вегетационного периода (4 месяца, 2018 год) влияния биоугля показано достоверное снижение потока  $\text{CO}_2$  на поле без дренажной системы на 4,5 % в дозе внесения биоугля  $1 \text{ кг/м}^2$  и на 36,6 % в дозе внесения биоугля  $3 \text{ кг/м}^2$  по сравнению с участком без внесения биоугля. Снижение потока  $\text{CO}_2$  свидетельствует о мелиоративном действии биоугля, обусловленном его высокими сорбционными свойствами, влияющими на секвестрационную емкость почвы.

На поле с дренажной системой внесение биоугля показало отрицательное действие на поток  $\text{CO}_2$  и привело к увеличению значения на 39,4 % на участке с дозой внесения  $1 \text{ кг/м}^2$  и на 16 % с дозой внесения  $3 \text{ кг/м}^2$ . Предполагается, что отрицательное действие биоугля связано с невозможностью отведения влаги из почвенного пространства дренажной системой за счет частичной ее сорбции биоуглем, что вызывает ухудшение водно-воздушного состояния почвы.

После второго вегетационного периода (16 месяцев, 2019 год) на поле без дренажной системы наибольшее снижение потока  $\text{CO}_2$  наблюдалось при внесении  $1 \text{ кг/м}^2$  биоугля.

В ежемесячной динамике наибольшая разница в значениях потока  $\text{CO}_2$  между контрольным участком и участками с внесением биоугля отмечена в сентябре, что было связано с аномальным количеством осадков, зафиксированным в августе (521 мм). Так, на контрольном участке в сентябре поток  $\text{CO}_2$  составил  $2276 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , на участке с внесением  $1 \text{ кг/м}^2$  биоугля поток  $\text{CO}_2$  составил  $560 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , на участке с внесением  $3 \text{ кг/м}^2$  –  $975 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ .

Наименьшее различие между потоками  $\text{CO}_2$  на контрольном участке и участках с внесением биоугля наблюдалось в июне, что могло быть причиной отсутствия поступления органических веществ из-за отсутствия сельскохозяйственной культуры. В июне на контрольном участке поток  $\text{CO}_2$  составил  $57 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , на участке с внесением  $1 \text{ кг/м}^2$  биоугля –  $23 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , на участке с внесением  $3 \text{ кг/м}^2$  биоугля –  $35 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ .

Ежемесячная динамика потока  $\text{CO}_2$  на поле с дренажной системой показала, что при внесении биоугля поток  $\text{CO}_2$  увеличи-

вается. Наибольшее увеличение было отмечено при внесении  $3 \text{ кг/м}^2$  биоугля.

Наименьшее различие показателей потока  $\text{CO}_2$  на участках без дренажной системы было отмечено в июне. На контрольном участке было зафиксировано значение потока  $\text{CO}_2$  в  $8 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . На участке с внесением  $1 \text{ кг/м}^2$  биоугля поток  $\text{CO}_2$  составил  $13 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , на участке с внесением  $3 \text{ кг/м}^2$  биоугля –  $11 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ .

Наибольшее различие между контрольным участком и участками с внесением биоугля зафиксировано в сентябре. Контрольный участок показал значение потока  $188 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ . На участке с внесением  $1 \text{ кг/м}^2$  биоугля значение потока  $\text{CO}_2$  составило  $181 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , на участке с внесением  $3 \text{ кг/м}^2$  –  $427 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ .

На поле без дренажной системы общий поток  $\text{CO}_2$  за вегетационный период показал снижение значений при внесении биоугля как в начале, так и в конце периода вегетации. В начале вегетационного периода внесение биоугля в дозах  $1 \text{ кг / м}^2$  и  $3 \text{ кг/м}^2$  привело к снижению потока  $\text{CO}_2$  на  $63,6\%$  и  $56,2\%$ , соответственно, по сравнению с участком без внесения биоугля. К концу вегетационного периода общий поток  $\text{CO}_2$  при внесении биоугля в дозе  $1 \text{ кг/м}^2$  составил  $1828 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , что на  $57,7\%$  ниже, чем общий поток на участке без внесения биоугля ( $4318 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ). На участке с дозой внесения биоугля  $3 \text{ кг/м}^2$  общий поток  $\text{CO}_2$  составил  $2200 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , что на  $49\%$  ниже, чем общий поток на участке без применения биоугля.

В целом можно отметить, что значения общего потока  $\text{CO}_2$  по результатам второго вегетационного периода исследования были значительно выше, чем после первого вегетационного периода. После второго вегетационного периода наблюдалось наибольшее процентное снижение потока при внесении биоугля, чем в первый вегетационный период. Подобные изменения могут быть связаны с различными сельскохозяйственными культурами, выращиваемыми на участках, существенным различием погодных условий проведения исследования.

На поле с дренажной системой общий поток  $\text{CO}_2$  за период вегетации показал увеличение значений при внесении биоугля. На участке с внесением  $1 \text{ кг/м}^2$  биоугля в течение всего веге-

тационного периода наблюдалось увеличение значений потока  $\text{CO}_2$  на 22–38 % по сравнению с контролем. На участке с внесением  $3 \text{ кг/м}^2$  биоугля в течение всего вегетационного периода наблюдалось увеличение значений потока  $\text{CO}_2$  на 3–24 % по сравнению с контролем.

В начале вегетационного периода внесение биоугля в дозах  $1 \text{ кг/м}^2$  и  $3 \text{ кг/м}^2$  привело к увеличению потока  $\text{CO}_2$  на 38,7% и 3,4% соответственно по сравнению с участком без внесения биоугля. К концу вегетационного периода кумулятивный поток  $\text{CO}_2$  при внесении биоугля в дозе  $1 \text{ кг/м}^2$  составил  $1035 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , что на 22,6% выше, чем общий поток на участке без внесения биоугля ( $801 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ ). На участке с дозой внесения биоугля  $3 \text{ кг/м}^2$  кумулятивный поток  $\text{CO}_2$  составил  $1054 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ , что на 24% выше, чем кумулятивный поток на участке без применения биоугля.

Стоит отметить, что на поле без дренажной системы значение кумулятивного потока на контрольном участке в 5 раз превышает значения кумулятивного потока на поле с дренажной системой. Значение кумулятивного потока поля без дренажной системы с внесением  $1 \text{ кг/м}^2$  не достигло уровня значения кумулятивного потока на участке с дренажной системой.

Наибольший секвестрационный эффект –  $623 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  был получен при внесении  $3 \text{ кг/м}^2$  при выращивании капусты на бездренажном участке за первый вегетационный период. Во второй вегетационный период при выращивании сои на этом же участке секвестрационная способность составила  $2200 \text{ мг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$  по отношению к контролю.

Таким образом, для поля площадью 1 га, засеянного капустой на недренированных подбелах темногомусовых, при схожих климатических условиях и внесении древесного биоугля в дозе  $3 \text{ кг/м}^2$  за вегетационный период (5 месяцев) можно сократить выбросы примерно  $23 \text{ т CO}_2$ . Однако, следует учесть, что смена культур, почвенно-климатических условий, вида биоугля может дать совершенно другие результаты, а значит, необходима региональная адаптация технологии депонирования углерода в почвы с помощью биоугля.

В 2023 году Verra выпустила VM0044 Methodology for Biochar Usage in Soil and Non-Soil Applications, версия v1.0, в

которой изложены процедуры количественной оценки сокращения выбросов парниковых газов (ПГ) в результате производства биоугля и его использования в одобренных почвенных и непочвенных применениях [VM0044, 2023]. Согласно Специальному отчету Межправительственной группы экспертов по изменению климата за 2019 год, биоуголь может обеспечить потенциал смягчения последствий в размере 1 Гт CO<sub>2</sub> в год к 2050 году (консервативная оценка) [VM0044, 2023].

Таким образом мы видим, что применение биоугля в аграрном секторе РФ может стать основой для климатических проектов и создания собственных углеродных рынков.

Работа выполнена при поддержке Государственного задания Минобрнауки России №FZNS-2023–0019.

### Список использованной литературы

1. Почвы ландшафтов Приморья: учебное пособие / О.В. Нестерова, Л.Н. Пуртова, Л.Т. Крупская, А.В. Назаркина, В.Н. Пилипушка, В.А. Семаль, В.Т. Старожилов, А.В. Брикманс. – Изд. 2-е, доп. и испр. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2020. – 1 CD-ROM; [136 с.]. – Загл. с титул. экр. – ISBN 978-5-7444-4832-5.
2. Zhang D., Yan M., Niu Y., Liu X., Zwielen L., Chen D., Bian R., Cheng K., Li L., Joseph S., Zheng J., Zhang X., Zheng J., Crowley D., Filley T.R., Pan G. (2016) As current biochar research addressing global soil constraints for sustainable agriculture? // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2016. Vol. 226. P. 25-32. doi: 10.1016/j.agee.2016.04.010.
3. Gurwick N.P., Moore L.A., Kelly C., Elias P. (2013) A systematic review of biochar research, with a focus on its stability in situ and its promise as a climate mitigation strategy. A systematic review of biochar research. 2013. Vol. 8. P. 1-9. doi: 10.1371/journal.pone.0075932.
4. Angst T.E., Six J., Reay D.S., Sohi S.P. (2014) Impact of pine chip biochar on trace greenhouse gas emissions and soil nutrient dynamics in an annual ryegrass system in California // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2014. Vol. 191. P. 17-26. doi: 10.1016/j.agee.2014.03.009.
5. Ding, Y., Liu Y., Liu S., Li Z., Tan X., Huang X., Zeng G., Zhou L., Zheng B. (2016) Biochar to improve soil fertility // *Agronomy for Sustainable Development*. 2016. Vol. 36. Issue 2, 1. 18 p. doi: 10.1007/s13593-016-0372-z.
6. Brassard P., Godbout S., Raghavan V. (2016). Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mecha-

nisms involved // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 181. P. 484-497. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.04.022.

7. Wang L., Butterly C.R., Wang Y., Herath H.M., Xi Y.G., and Xiao X.J. (2014) Comparisons of Biochar Properties from Wood Material and Crop Residues at Different Temperatures and Residence Times // Soil Use and Management. 2014. Vol. 30. P. 119-128. doi: 10.1111/sum.12096.

8. Попова А.Д., Семаль В.А., Брикманс А.В., Нестерова О.В., Колесникова Ю.А., Бовсун М.А. (2019) Применение биоугля как мелиоранта и его влияние на изменение физических свойств агропочв юга Приморского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 6. С. 57-63. ISSN: 1996-4277.

9. Bian R., Joseph S., Gui L., Pan G., Li L., Lui X., Zhang A., Rutledge H., Wong S., Chia C., Marjo C., Munroe P., Donne S. (2014) A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment // Journal of Hazardous Materials. 2014. Vol. 272. P. 121-128. doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.03.017.

10. Liu X., Ye Y., Liu Y. Zhang A., Li L., Pan G., Kibue G. W., Zheng Jufeng, Zheng Jinwei (2014). Sustainable biochar effects for low carbon crop production: A 5-crop season field experiment on a low fertility soil from Central China // Agricultural Systems. 2014. Vol. 129. P. 22-29. doi: 10.1016/j.agsy.2014.05.008.

11. Asai H., Samson B.K., Stephan H.M., Songyikhangsuthor K., Homma K., Kiyono Y., Inoue Y., Shiraiwa T., Horie T. (2009) Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield // Field Crops Research. 2009. Vol. 111. P. 81-84. doi: 10.1016/j.fcr.2008.10.008.

12. Bovsun M.A., Nesterova O.V., Semal V.A., Khokhlova A.I., Sakara N.A. Changes in the composition and properties of biochar after one-year application // E3S Web of Conferences. 2020. № 217. 10009. doi: 10.1051/e3sconf/202021710009.

13. Bovsun M.A., Castaldi S., Nesterova O.V., Semal V.A., Sakara N.A., Brikmans A.V., Khokhlova A.I., Karpenko T.Y. Effect of Biochar on Soil CO<sub>2</sub> Fluxes from Agricultural Field Experiments in Russian Far East // Agronomy. 2021. Vol. 11. P. 1559. doi: 10.3390/agronomy11081559.

14. Нестерова О.В., Семаль В.А., Бовсун М.А., Васенев И.И., Брикманс А.В., Карпенко Т.Ю., Сакара Н.А. Изменение свойств агропочв юга Дальнего Востока России при внесении биочара // Агротехнический вестник. 2021. № 5. С. 18-23.

15. Бовсун М.А., Нестерова О.В., Семаль В.А., Брикманс А.В., Нестеров В.В., Якуз А.В., Тюрина Е.А. Влияние внесения биоугля на минеральный азот почвы, потоки N<sub>2</sub>O и NH<sub>3</sub> из агротемногумусовых подбелов // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2023. № 62. С. 6-28. DOI: 10.17223/19988591/62/1.

16. Бовсун М.А., Нестерова О.В., Семаль В.А., Сакара Н.А., Брикманс А.В., Карпенко Т.Ю., Тарасова Т.С. Влияние внесения биоугля на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2023. № 61. С. 6-26. DOI: 10.17223/19988591/61/1.

17. VM0044. Methodology for biochar utilization in soil and non-soil applications. Version 1.1. 5 July 2023. Sectoral Scope 13. 53 p.

### **Positive experience in the application of soil- and carbon-saving agrotechnologies with the introduction of biochar in the conditions of the Russian Far East**

*Nesterova O.V., Bovkun M.A., Semal V.A.,  
Brikman A.V., Sakara N.A..*

**Abstract:** Based on the positive results of a long-term field experiment on the introduction of biochar for vegetable crops in Primorsky Krai on soils of heavy granulometric composition, a sequestration effect and an improvement in the water-physical properties of soils were proved. After the first year of application, the effect of biochar showed a significant decrease in CO<sub>2</sub> flux in the field without a drainage system by 4.5% at a dose of biochar 1 kg/m<sup>2</sup> and by 36.6% at a dose of biochar 3 kg/m<sup>2</sup> compared to the plot without biochar. The decrease in the flow of CO<sub>2</sub> indicates the ameliorative effect of biochar, due to its high sorption properties, which affect the sequestration capacity of the soil. After the second year of biochar application, the greatest decrease in CO<sub>2</sub> flux was observed with the introduction of 1 kg/m<sup>2</sup> of biochar. The largest difference between the values of CO<sub>2</sub> flux in the control plot and the plots with the introduction of biochar was noted in September after the anomalous amount of precipitation recorded in August (521 mm). So, in the control plot in September, the CO<sub>2</sub> flux was 2276 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> 975 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

## 2.4. Влияние биоугля на содержание подвижных форм свинца в агропочвах тяжелого гранулометрического состава

*Гилёв А.М., Брикманс А.В., Рыбачук Н.А.,  
Нестерова А.В., Сакара Н.А.*

**Аннотация:** Данная работа рассматривает влияние внесения биоугля, полученного пиролизным путем из остатков древесины березы *Betula Alba*, на содержание подвижных форм свинца (Pb) в агропочвах на поле с дренажной системой и без нее за период 2018–2020 гг. Агропочвы, находящиеся на юге Дальнего Востока Приморского края, представляют собой агротемногумусовые подбелы (Luvic Anthrosols) с тяжелым гранулометрическим составом. В качестве критериев для оценки загрязнения тяжелыми металлами были использованы предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Полученные результаты исследования показали положительный эффект внесения биоугля на снижение концентрации подвижных форм свинца в агропочве. На поле без дренажной системы содержание свинца снижалось на протяжении трех лет как при внесении 1 кг/м<sup>2</sup> биоугля, так и при внесении 3 кг/м<sup>2</sup>. На поле с дренажной системой содержание свинца начало снижаться только в 2020 году, то есть спустя 2 года после внесения биоугля в дозах 1 кг/м<sup>2</sup> и 3 кг/м<sup>2</sup>. Исследование подтвердило эффективность внесения биоугля на снижение загрязнения свинцом в агропочвах, за счет хорошей способности сорбировать, однако биоуголь способен постепенно разрушаться, что может вызвать высвобождение свинца обратно в почву, поэтому необходимо повторное внесение биоугля.

В связи с постоянным увеличением численности населения на земле растет спрос на продукты сельского хозяйства. Чтобы удовлетворить потребности растений, им необходимо обитать в благоприятной среде, которая способствует их росту и функционированию до полного развития. Для этой цели идеально подходит почва [Рэуце, 1986; Минеев, 2004].

Почва представляет собой самостоятельное природное тело, которое способно обеспечивать растения всеми необходимыми питательными элементами. Однако при выращивании сельско-

хозяйственных культур происходит вынос этих питательных элементов из почвы, что приводит к ее физическому и химическому истощению из-за продолжительного монокультурного обращения [Рэуце, 1986]. Сельскохозяйственные культуры оказывают колоссальное давление на почву, в результате чего ее химические свойства отрицательно изменяются. Например, вносятся удобрения, применяются пестициды, поля обрабатываются сельскохозяйственной техникой и другими методами. Все это приводит к загрязнению почвы различными веществами, способными вызывать ее загрязнение [Audry et al., 2005; Водяницкий и др., 2012]

Загрязнение почв тяжелыми металлами представляет важную экологическую проблему для людей и окружающей среде в целом [Audry S. et al 2004]. Различные формы тяжелых металлов способны пагубно сказываться на функционировании живых организмов, а также на их росте и развитии. Наиболее опасным тяжелым металлом для живых организмов является свинец [Водяницкий и др., 2012; Сердюкова и др., 2017].

Свинец может попадать в почву из различных источников, таких как автомобильные выхлопные газы, промышленные выбросы или сельскохозяйственная техника, обрабатывающая поля. Поскольку поля обрабатываются регулярно и техника выбрасывает достаточное количество свинца в виде выхлопов, это является главным источником поступления свинца в почву [Медведев и др., 2017].

В настоящее время главной задачей в сельском хозяйстве является нахождение способа, более выгодного как для повышения плодородия почвы, так и для очистки от загрязнителей. К такому способу можно отнести технологию внесения биоугля. Биоуголь (Biochar) – представляет собой пористое углеродистое и твердое вещество, образованное в результате термохимического преобразования биомассы, органического материала при повышенных температурах и в отсутствие кислорода [Попова и др., 2019; Нестерова и др., 2021]. Внесение биоугля в почву может помочь уменьшить содержание тяжелых металлов в почве. Это связано с тем, что биоуголь обладает высоким адсорбционным потенциалом и способен связываться с токсичными веществами, включая тяжелые металлы, и снижать их доступность

для растений и других организмов. Биоуголь также способствует развитию микробиологической активности в почве, что может содействовать биологической обратимости тяжелых металлов и их вымыванию из почвы [Разумов и др., 2015; Bovsun, 2021; Шварцбурд и др., 2022].

Целью исследования было определить влияние внесенного в агропочву биоугля в дозах 1 кг/м<sup>2</sup> и 3 кг/м<sup>2</sup> на содержание подвижных форм свинца с применением дренажной системы и без нее.

Объектом исследования послужили почвы – агротемногумусовые подбелы (*Luvic Anthrosols*) Приморской овощной опытной станции с применением глубокой дренажной системы (глубина 120 см) и без нее. Почвы располагается на Приморской овощной опытной станции, в южной части Тихоокеанского ландшафтного пояса, Сихотэ-Алинской области, Южно-Приморской провинции [Попова и др., 2019; Нестерова и др., 2021; Гилёв и др., 2022]. Экспериментальный участок расположен по юго-западному склону левой части мелиоративной системы, имеет площадь 6 га (200 × 300 м). Схема полевого опыта представлена в таблице 2.4.1.

Таблица 2.4.1. Схема полевого опыта 2017–2019 гг.

Год	Участок без дренажа			Участок с дренажом		
	биоуголь 0 кг/м <sup>2</sup>	биоуголь 1 кг/м <sup>2</sup>	биоуголь 3 кг/м <sup>2</sup>	биоуголь 3 кг/м <sup>2</sup>	биоуголь 1 кг/м <sup>2</sup>	биоуголь 0 кг/м <sup>2</sup>
2017	пар	пар	пар	пар	пар	пар
Внесен биоуголь						
2018	капуста	капуста	капуста	капуста	капуста	капуста
2019	картофель	картофель	картофель	soя	soя	soя

Отбор проб почв осуществлялся по ГОСТу 28168–89, значения влажности – термостатно-весовым методом по ГОСТу 28268–89 и содержание подвижных форм свинца в агропочвах устанавливали методом атомно-абсорбционного анализа. Критериями для оценки загрязнения тяжелыми металлами являются предельно-

допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве [ГН 2.1.7.2041-06] и для свинца (Pb) он равняется – 6.

Исследования показали, что внесение биоугля смогло понизить концентрацию свинца на поле без дренажа на всех объектах исследования в период с 2018 по 2020 года, однако на поле с дренажной системой биоуголь смог показать положительное действие только спустя 2 года в 2020 году (рис. 2.4.1).

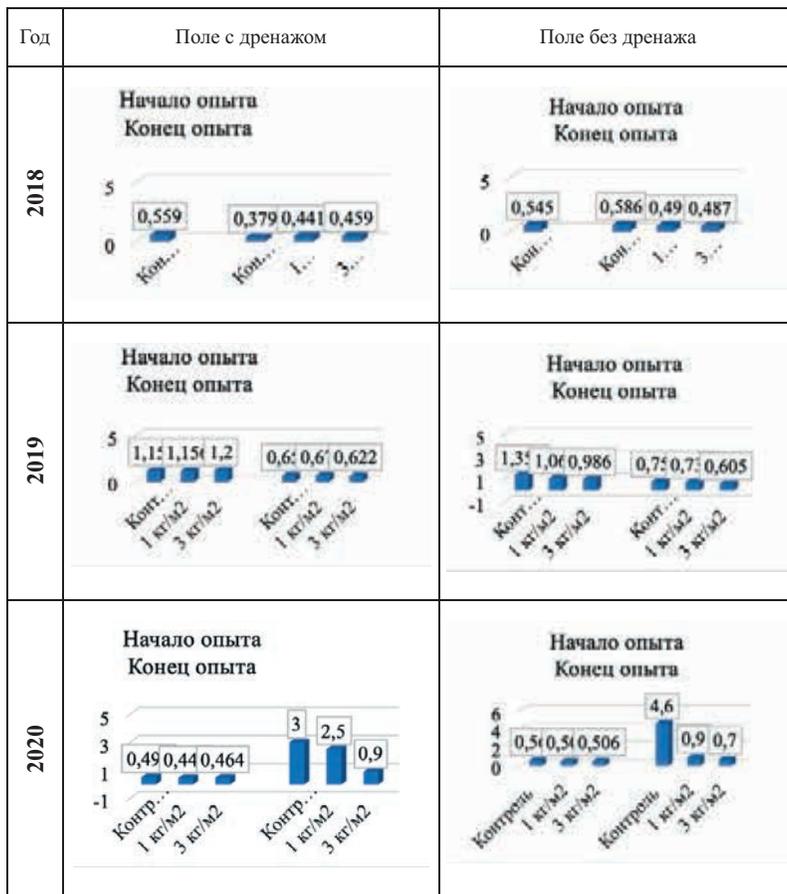


Рис. 2.4.1. Содержание подвижных форм свинца в (мг/кг) при внесении биоугля в дозах 1 и 3 кг на квадратный метр, с дренажной системой и без за период 2018–2020 гг.

На поле с дренажной системой в 2018 году в начале вегетационного периода содержание свинца составляло 0,559 мг/кг, спустя 6 месяцев после внесения биоугля содержание свинца в образцах повышалось. В 2019 году, в начале нового вегетационного периода через год после внесения биоугля, наблюдалось повышение и стабильное содержание свинца. Однако в конце вегетационного периода в 2019 году (спустя 1,5 года после внесения биоугля), было отмечено снижение концентрации свинца при использовании дозы 3 кг/м<sup>2</sup>, концентрация свинца уменьшилась с 0,652 мг/кг до 0,622 мг/кг. В 2020 году (2 года после внесения биоугля) наблюдалось дальнейшее снижение концентрации свинца как в начале вегетационного периода с 0,493 мг/кг до 0,449 мг/кг (1 кг/м<sup>2</sup>) и до 0,464 мг/кг (3 кг/м<sup>2</sup>), так и в конце вегетационного периода с 3,0 мг/кг до 2,5 мг/кг (1 кг/м<sup>2</sup>) и до 0,9 мг/кг (3 кг/м<sup>2</sup>).

На поле без дренажа в начале вегетационного опыта 2018 г. до внесения биоугля содержание свинца составляло 0,545 мг/кг, в конце вегетационного опыта содержание свинца понизилось с 0,586 мг/кг до 0,490 мг/кг с дозой 1 кг/м<sup>2</sup> и до 0,487 мг/кг с дозой 3 кг/м<sup>2</sup>. В 2019 году в начале вегетационного периода было отмечено уменьшение содержания свинца с 1,351 мг/кг до 1,064 мг/кг при использовании дозы 1 кг/м<sup>2</sup>, и до 0,986 мг/кг при использовании дозы 3 кг/м<sup>2</sup> биоугля.

К концу вегетационного периода также наблюдалось снижение содержания свинца во всех образцах до 0,756 мг/кг при использовании дозы 1 кг/м<sup>2</sup>, и до 0,605 мг/кг при использовании дозы 3 кг/м<sup>2</sup> биоугля. В 2020 году, спустя 2 года после внесения биоугля, было отмечено продолжение снижения содержания свинца как в начале вегетационного периода с 0,586 мг/кг до 0,502 мг/кг при использовании дозы 1 кг/м<sup>2</sup>, и до 0,506 мг/кг при использовании дозы 3 кг/м<sup>2</sup> биоугля, так и в конце вегетационного периода с 4,6 мг/кг до 0,9 мг/кг при использовании дозы 1 кг/м<sup>2</sup>, и до 0,7 мг/кг при использовании дозы 3 кг/м<sup>2</sup> биоугля.

Стоит отметить, что превышения допустимой концентрации (ПДК) подвижных форм свинца в агропочвах не было выявлено во всех исследуемых вариантах опыта. Тем не менее, биоуголь способен влиять на концентрацию тяжелых металлов в почвах

за счет своей высокой сорбционной способности. В целом следует учитывать, что, находясь в почве, биоуголь может постепенно разрушаться и в дальнейшем стать причиной вторичного загрязнения почв.

### Список использованной литературы

1. *Рэуце К.* Борьба с загрязнением почвы / К. Рэуце, С. Кырстя. – М., 1986. – 201 с.
2. *Минеев В.Г.* Агрохимия: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МГУ; Издательство «КолосС», 2004.– 720 с., [16] л. ил.: ил. – (Классический университетский учебник).
3. *Audry S., Blanc G., Schafer J.* (2005) Sulphide oxidation from a smelting waste area controlling dissolved heavy metal (Cd, Zn, Cu, Cr, Co, Ni, U) inputs into the Lot-Garonne fluvial system (France) // *Applied Geochemistry*. 20. P. 919-931.
4. *Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т.* Загрязнение почв тяжелыми металлами. М.: Типография Россельхозакадемии, 2012. – 304 с.
5. *Сердюкова А.Ф.* Последствия загрязнения почвы тяжелыми металлами / А.Ф. Сердюкова, Д.А. Барабанщиков. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2017. – № 51 (185). – С. 131-135. URL: <https://moluch.ru/archive/185/47382/> (дата обращения: 29.01.2022).
6. *Audry S., Schafer J., Blanc G., Bossy C., Lavaux G.* (2004) Anthropogenic components on Heavy metal budgets (Cd, Zn, Cu and Pb) in the Lot-Garonne fluvial system (France) // *Applied Geochemistry*. 19. 769-786.
7. *Медведев И.Ф., Деревягин С.С.* М42 Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с.
8. *Попова А.Д.* Применение биоугля как мелиоранта и его влияние на изменение физических свойств агропочв юга Приморского края / А.Д. Попова, В.А. Семаль, А.В. Брикманс, О.В. Нестерова, Ю.А. Колесникова, М.А. Бовсун // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2019. – № 6. – С. 57-63.
9. *Нестерова О.В.* Изменение свойств агропочв юга Дальнего Востока России при внесении биоугля / О.В. Нестерова, В.А. Семаль, М.А. Бовсун, И.И. Васенев, А.В. Брикманс, Т.Ю. Карпенко, Н.А. Сакара // *Агрохимический вестник*. – 2021. – № 5. – С. 18-23. – DOI 10.24412/1029-2551-2021-5-004.
10. *Разумов Е.Ю.* Биоуголь: современное представление / Разумов Е.Ю., Назипова Ф.В. // *Вестник технологического университета*. Учредители: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2015. С. 220-222.
11. *Bovsun M.A.* Effect of Biochar on Soil CO<sub>2</sub> Fluxes from Agricultural Field Experiments in Russian Far East: A Recent Study / M.A. Bov-

sun, O.V. Nesterova, V.A. Semal [et al.] // Current Topics in Agricultural Sciences. Vol. 3, 30 October 2021. P. 20-31. <https://doi.org/10.9734/bpi/ctas/v3/14408D>.

12. Шварцбург Я.Д. Биоуголь – свойства и области применения / Шварцбург Я.Д., Калинина Е.В. // Химия. Экология. Урбанистика. Учредители: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2022. С. 155-159.

13. Гилёв А.М., Рыбачук Н.А., Брикманс А.В., Нестерова О.В. // Влияние биоугля на содержание подвижных форм тяжелых металлов при внесении минеральных удобрений. DOI: 10.58168/RMPNCL2022\_110-116.

14. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. М., 2006.

## **The effect of biochar on the content of mobile forms of lead in agro-soils of heavy texture**

***Gilev A.M., Brikman A.V., Rybachuk N.A., Nesterova A.V., Sakara N.A.***

**Abstract:** This work examines the effect of the application of biochar, obtained by pyrolysis from the remains of *Betula Alba* birch wood, on the content of mobile forms of lead (Pb) in agricultural soils in a field with and without a drainage system for the period 2018–2020. The agricultural soils located in the south of the Far East of Primorsky Krai are Luvic Anthrosols with a heavy granulometric composition. Maximum permissible concentrations (MAC) of chemicals in soil were used as criteria for assessing heavy metal contamination. The results of the study showed a positive effect of adding biochar on reducing the concentration of mobile forms of lead in agricultural soil. In a field without a drainage system, the lead content decreased over three years both with the application of 1 kg/m<sup>2</sup> of biochar and with the application of 3 kg/m<sup>2</sup>. In a field with a drainage system, the lead content began to decrease only in 2020, that is, 2 years after the application of biochar in doses of 1 kg/m<sup>2</sup> and 3 kg/m<sup>2</sup>. The study confirmed the effectiveness of biochar application in reducing lead pollution in agricultural soils due to its good sorbing ability, however, biochar can gradually degrade, which can cause the release of lead back into the soil, so re-application of biochar is necessary.

---

### 3. Почво- и углерод-сберегающие технологии повышения продуктивности травостоя с использованием отходов промышленности и сельского хозяйства

#### 3.1. Agroecological assessment of the efficiency of utilization of quail manure in the restoration of disturbed sod-podzolic soils with the formation of a stable herbage<sup>1</sup>

*Andrey Stepanov, Peter Vasenev and Ivan Vasenev*

**Abstract:** The most acute environmental problems of our time include large volumes of bird droppings produced annually at large livestock complexes. At the same time, the sod-podzolic soils dominating in the Non-Chernozem zone of the European part of Russia are characterized by low reserves of humus, which quickly fall with intensive agricultural use and soil anthropogenic degradation. To restore degraded sod-podzolic soils, a peat-sand substrate enriched with compost from quail manure without and with the application of phosphogypsum to stabilize organic compounds of compost was used with the support of project No. 075-15-2021-1030 of the Ministry of Science and Higher Education of Russia. The vegetation experiment showed the maximum increase in plant biomass of the herbage in the variant with the combined use of compost and phosphogypsum: respectively, 30% higher than the control one. In the summer, there is an increased intensity of soil CO<sub>2</sub> emissions in the variants with compost, but with a multiple more active increase in grass biomass growing, so one can talk about the atmosphere carbon sequestering nature of the technology of utilization of quail droppings during the restoration of disturbed sod-podzolic soils with the formation of a stable herbage.

---

<sup>1</sup> Доклад был представлен 5 октября 2023 года на 3-й Международной конференции по исследованию сельскохозяйственных и пищевых технологий (Адана, Турция).

## **Introduction**

The most acute environmental problems of our time include large volumes of manure and bird droppings produced annually at large livestock complexes [1]. They are raw materials for agroecologically attractive, very valuable [2] and potentially profitable organic fertilizers.

However, in most cases higher profitable large livestock complexes are very narrowly localized, that seriously complicates the logistics of their manure and bird droppings application and requires the development of the best available technologies for environmentally safe and cost-effective their use [3-5].

At the same time, the sod-podzolic soils dominating in the Non-Chernozem zone of the European and Western Siberian parts of Russia are characterized by a low thickness of their humus-accumulative horizon and low reserves of soil organic matter (SOM or humus), which quickly fall after intensive farming use and due to soil anthropogenic degradation.

Along with this, against the background of rapidly developing global climate changes characteristic of the XXI century, there is a fastly growing interest in more intensive, but environmentally safe agricultural use of these lands [6, 7] with a relatively stable soil moisture regime and a growing amount of active temperatures from year to year [8, 9].

Quail poultry farms producing nutritionally valuable meat and eggs belong to the actively developing direction of animal husbandry in central Russia, where with the growing welfare of a significant part of the population, the demand for higher-quality food is steadily growing ap.

Herewith, quail manure (droppings) is characterized by an increased content of macro- and micro-elements of plant nutrition, which makes it especially attractive for use as compost for the restoration of degraded sod-podzolic soils with the formation of a stable herbage.

Moreover, at the same time, the tasks of reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere can be evidently solved, which is extremely important for mitigating or slowing down the processes of global climate change and can bring additional funding to projects for the restoration of degraded lands.

The goal of this paper is to give ecological assessment of the *efficiency of quail manure utilization in the restoration of disturbed sod-podzolic soils with the formation of a stable herbage* and stabilization of the carbon balance of the regenerated topsoil in conditions of representative for Moscow region Agroecological Experimental Station of the RSAU-MTAA.

### Materials and Methods

The research was carried out at the Agroecological Experimental Station of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU-MTAA – Fig. 3.1.1) in the fall of 2022 and summer of 2023 with unusually high precipitation in May to August period (644 mm, that is 215% of the average May-August precipitation in 2011-2022 – Table 3.1.1).



Fig. 3.1.1. The location ( $55^{\circ}50'24''\text{N}$   $37^{\circ}33'02''\text{E}$ ) of the Field experiment with quail manure compost at the Agroecological Experimental Station of the RSAU-MTAA.

Table 3.1.1. Weather conditions in May – August period of 2023 in comparison with the average data for it in 2011-2022

Month	De-cade	Average air temperature, °C			Precipitation amount, mm		
		2011-2022		2023	2011-2022		2023
May	1	13.6	8.6	13.9		11	73
	2		16.4		61	4	
	3		16.5			58	
June	1	17.3	15.8	18.1		35	140
	2		19.8		77	1	
	3		18.6			104	
July	1	19.7	21.7	19.4		6	305
	2		17.1		84	143	
	3		19.3			156	
August	1	17.6	24.1	20.6		0	126
	2		21.5		78	117	
	3		16.6			9	
May-August		17.1		18.0	300		644

Profile of the erosion-disturbed sod-podzolic soils at the Agro-ecological Experimental Station of the RSAU-MTAA consist of the following horizons:

– AEBp around 20 cm of thickness – heterogeneous over-compacted and significantly disaggregated sandy loam and loam plowing horizon with morphons of original humus-accumulated, eluvial and transitional eluvial-illuvial horizons;

– EBt around 10-15 cm of thickness – heterogeneous over-compacted and significantly disaggregated transitional eluvial-illuvial horizon with eluvial sand loamy and illuvial clay loamy morphons;

– Bt around 60-65 cm of thickness – compact clay loamy illuvial horizon by moraine origin.

Its strongly degraded plowing horizon is over-compacted, acidic and has low stocks of moisture, soil organic carbon (SOC), nitrates and mobile sulfur with mid-level content of mobile phosphorous and potassium (Table 3.1.2).

*Table 3.1.2.* Average values and standard deviation ( $M \pm \delta$ ) of the physical, physical-chemical and chemical parameters of the plowing horizon of the erosion-disturbed sod-podzolic soil in location of the field experiment

Bulk density, g/cm <sup>3</sup>	Soil moisture, %	pH <sub>KCl</sub>	SOC, %
1.32±0.07	8.4±1.9	5.04 ± 0.18	0.80 ± 0.08

Nutrient mobile forms, mg/kg				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	S
4.67±1.45	40.2±4.5	72.4±2.3	61.9±14.0	1.33±1.10

During the regenerative amelioration of the turf horizon of the erosion-disturbed sod-podzolic soil there was created 15-cm regenerative organo-mineral horizon from the peat-sandy soil-ground (with a weight ratio peat to sand of 1 to 3) traditionally used in phytoremediation projects with application of compost from quail droppings in doses of 2.0 t/ha in combination with phosphogypsum in doses of 4.5 t/ha and 6.0 t/ha or without it.

Compost from quail droppings is characterized by high residual moisture, pH, high content of the total nitrogen and by the very high content of mobile phosphorous and potassium (Table 3.1.3).

*Table 3.1.3.* Average values and standard deviation ( $M \pm \delta$ ) of the moisture, pH and content of the main nutrients in the compost

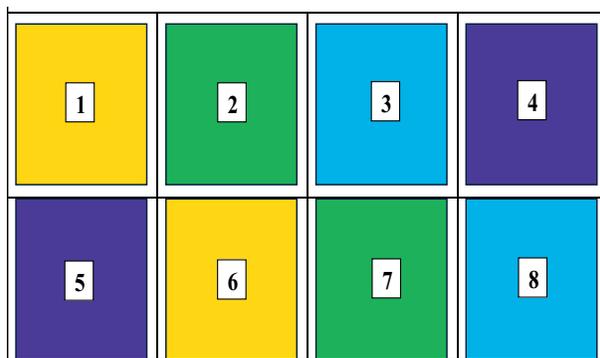
Soil moisture, %	pH <sub>H2O</sub>	Mobile forms, mg/kg		Total nitrogen, %
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
47.8 ± 2.9	9.21 ± 0.02	3050 ± 50	4550 ± 50	1.80 ± 0.05

Phosphogypsum is characterized by the increased content of the whole set of necessary for plants macro- and micro-nutrients: phos-

phorous – 1–1,4%, sulfur – up to 38%, siliceous – 0,26%, zinc – 0,03% – and has a lot of calcium (21%), cations of which are able to neutralize the acid medium of the soil and essentially increase the saturation of soil absorbing complex.

The scheme of the micro-plot field experiment with plots of 4 m<sup>2</sup> (2 m × 2 m – Fig. 3.1.2) included control variant (without the use of compost), variants with compost from quail droppings (2.0 t/ha) and with the use of compost (2.0 t/ha) in combination with an increasing doses of phosphogypsum (in doses of 4.5 t/ha and 6.0 t/ha), which were added to the peat-sand soil-ground traditionally used in phytoremediation projects.

In the seed method of lawn creation, a grass mixture was used with the following composition: pasture ryegrass (*Lolium perenne*) (40%), red Maxim 1 fescue (*Festuca rubra*) (40%), red Greenlight fescue (*Festuca rubra*) (10%), meadow bluegrass (*Poa pratensis*) (10%). Seeding rate: 200 g per plot.



Variant of the experiment	Compost, t/ha	Phosphogypsum, t/ha	Plot No.
I	-	-	1; 6
II	2.0	-	2; 7
III	2.0	4.5	3; 8
IV	2.0	6.0	4; 5

Fig. 3.1.2. The location scheme of the micro-plot field experiment

To carry out seasonal monitoring of CO<sub>2</sub> fluxes at all plots after the initial formation of the grass cover in August 2022, the bases of the over-ground exposure chambers installed during the observation periods were installed (Fig. 3.1.3).

Monitoring of organic carbon content in the topsoil, of soil regimes and of the dynamics of the growth of herbaceous biomass were carried out using traditional methods of agroecological monitoring [9-12] and land functional-and-ecological assessment [13-16]. Monitoring of soil moisture and temperature conditions – using IoT sensors and portable electronic devices: a soil thermometer Checktemp 1 and a moisture meter Theratrobe HH2. Determination of soil carbon dioxide emissions – using a portable gas analyzer LiCor-820 in situ [17]. Accounting of aboveground biomass and its growth rate – by the method of sequential mowing and IoT sensors CropTalker [18].

September 2022



October 2022



Fig. 3.1.3. The micro-plot field experiment with the bases of the over-ground exposure chambers

## Results and Discussion

Composition and properties of the regenerative horizon (Table 4) initially differ quite significantly from the humus-accumulative and arable horizon of the full-profile sod-podzolic soils dominating in the region [8, 9, 11, 13, 15], but after three months the differences are significantly smoothed out for nitrite and exchangeable calcium and magnesium. Moreover, in variants with the use of compost, this can happen even faster than in the control version of the horizon regenerated on the basis of a peat-sand mixture (Tab. 3.1.4, 3.1.5).

Table 3.1.4. Average values and standard deviation ( $M \pm \delta$ ) of the pH and content of the exchangeable cations in the regenerative horizon of the erosion-disturbed sod-podzolic soils in the fall 2022

Variant	Month 2022	pH <sub>H2O</sub>	Exchangeable cations, mmol/100 g	
			Ca	Mg
Control	VIII	7.67 ± 0.08	114 ± 6.9	20.2 ± 0.5
	XI	7.94 ± 0.02	45.2 ± 4.1	20.3 ± 1.5
Comp 2 t/ha	VIII	7.73 ± 0.07	102 ± 19.2	20.8 ± 1.5
	XI	7.94 ± 0.02	29.0 ± 8.5	19.0 ± 2.0
Comp 2 t/ha+ P-G 4,5 t/ha	VIII	7.30 ± 0.06	131 ± 12.4	20.0 ± 1.2
	XI	7.76 ± 0.04	37.7 ± 4.2	17.0 ± 1.1
Comp 2 t/ha +P-G 6 t/ha	VIII	7.21 ± 0.03	142 ± 6.4	18.1 ± 0.5
	XI	7.68 ± 0.04	49.4 ± 5.2	17.6 ± 0.9

The conducted studies have shown a relatively small, but statistically significant (even against the background of seasonal dynamics in summer 2023) decrease in comparison with the control variant of the bulk density of the turf topsoil (with a thickness of 6 cm) in both variants of compost application in combination with phosphogypsum (Fig. 3.1.4).

At the same time, in conditions of summer season 2022 with a sharply increased amount of precipitation, changes in the soil mois-

ture content of the turf topsoil are enough obvious and statistically significant only in case of compost application without phosphogypsum (Fig. 3.1.5).

*Table 3.1.5. Average values and standard deviation ( $M \pm \delta$ ) of the main nutrients in the regenerative horizon of the erosion-disturbed sod-podzolic soils in the fall 2022*

Variant	Month 2022	Nitrites, mg/kg	Mobile forms, mg/kg	
			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Control	VIII	202 ± 32.3	62.5 ± 5.6	211 ± 25.9
	XI	24.2 ± 6.4	263 ± 74.9	547 ± 93.1
Comp 2 t/ha	VIII	130 ± 29.0	329 ± 99.3	422 ± 57.1
	XI	24.8 ± 4.1	317 ± 93.2	1068 ± 318
Comp 2 t/ha +P-G 4,5 t/ha	VIII	177 ± 36.8	461 ± 66.2	375 ± 45.0
	XI	21.5 ± 7.2	404 ± 125	652 ± 173
Comp 2 t/ha +P-G 6 t/ha	VIII	205 ± 16.9	479 ± 117	313 ± 41.6
	XI	13.7 ± 2.1	429 ± 96.7	340 ± 82.1

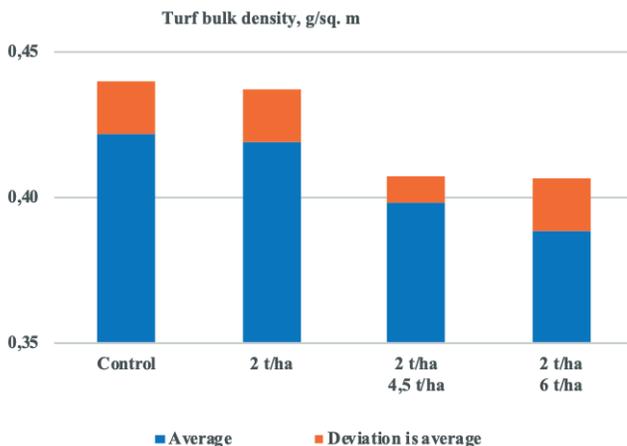


Fig. 3.1.4. Turf topsoil (0-6 cm) bulk density average for season values in the micro-plots of the field experiment with quail droppings compost (first line) and phosphogypsum (second line).

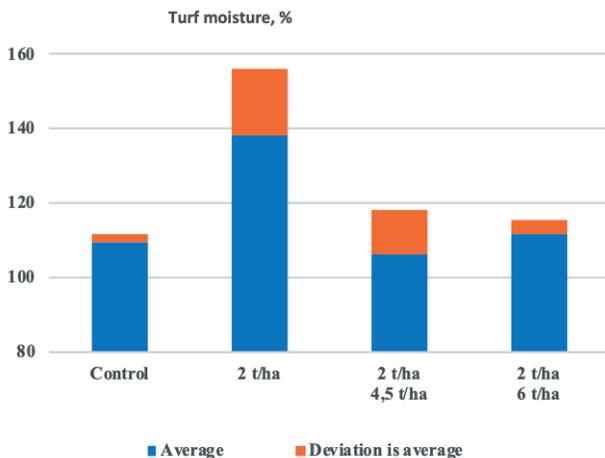


Fig. 3.1.5. Turf topsoil (0-6 cm) moisture average for season values in the micro-plots of the field experiment with quail droppings compost (first line) and phosphogypsum (second line)

The initial content of organic matter at the beginning of the main growing season (Fig. 3.1.6, 28.04.2023) varies slightly and statistically insignificantly between the variants of the experiment. The maximum differences between their average values do not exceed 2.5% SOM (1.25% SOC), which is no more than 10 relative percent of the SOM content and is typical for peat-sandy soils [22, 23].

At the end of the main growing season (Fig. 3.1.6, 22.09.2023), 2 variants of the experiment (with 2 t/ha of compost from quail droppings and with the compost application in combination with phosphogypsum in doses of 2.0 t/ha + 4.5 t/ha) showed obvious statistically significant and pronounced even against the background of seasonal dynamics accumulation of organic matter in the turf topsoil (6 cm thick). At the same time, the content of organic matter in the control version remained almost unchanged.

In most of the studied variants of soil-grounds, the seasonal dynamics of soil CO<sub>2</sub> emission is pronounced (Fig. 3.1.7), measured during the daytime, in the period between 10 a.m. and 3 p.m. The only variant with quail droppings compost has minimum season dynamics and the minimum difference in its average value of soil CO<sub>2</sub> emission from the control variant (Fig. 3.1.8).

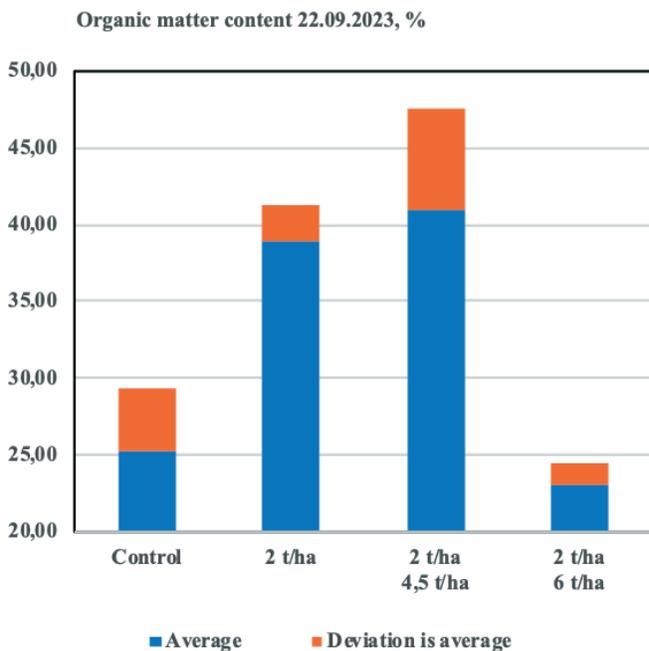
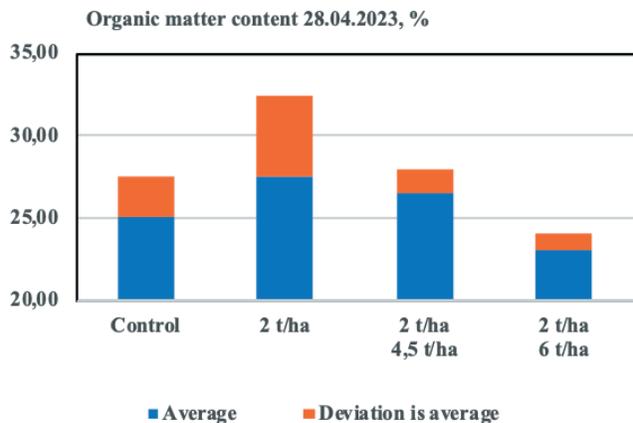


Fig. 3.1.6. Soil Organic matter content in the micro-plots of the field experiment with quail droppings compost (first line) and phosphogypsum (second line)

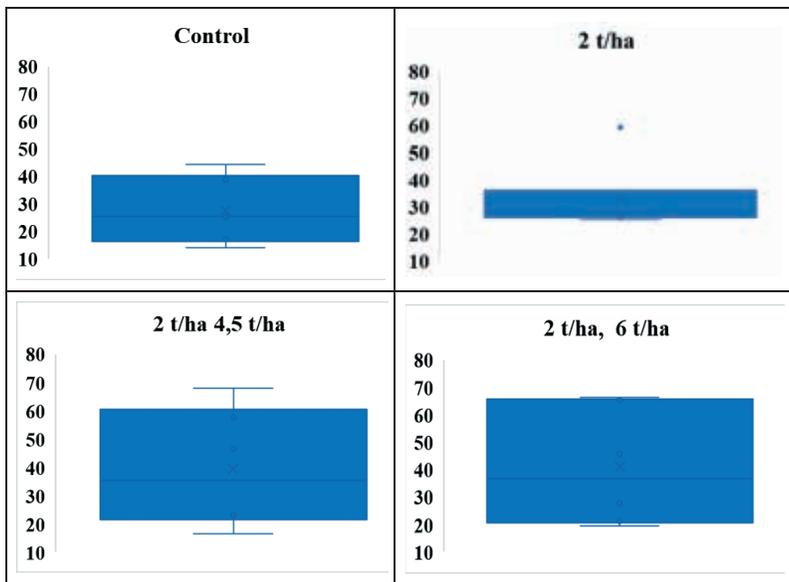


Fig. 3.1.7. Diagrams of the scope of seasonal dynamics of soil CO<sub>2</sub> emission by main variants of the micro-plot field experiment

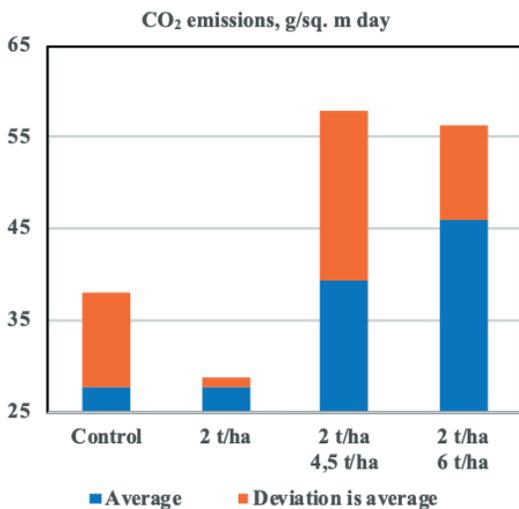


Fig. 3.1.8. Soil CO<sub>2</sub> emission average for season values in the micro-plots of the field experiment with quail droppings compost (first line) and phosphogypsum (second line).

There are more pronounced differences in average value of soil CO<sub>2</sub> emission between the control variant and the variants with the quail compost application in combination with phosphogypsum (Fig. 3.1.8). They are characterized by sharp increasing the average value of soil CO<sub>2</sub> emission against the background of its pronounced seasonal dynamics.

The spring projective coverage at the beginning of the main growing season (Fig. 3.1.9, 28.04.2023) was highest and most stable in the control variant.

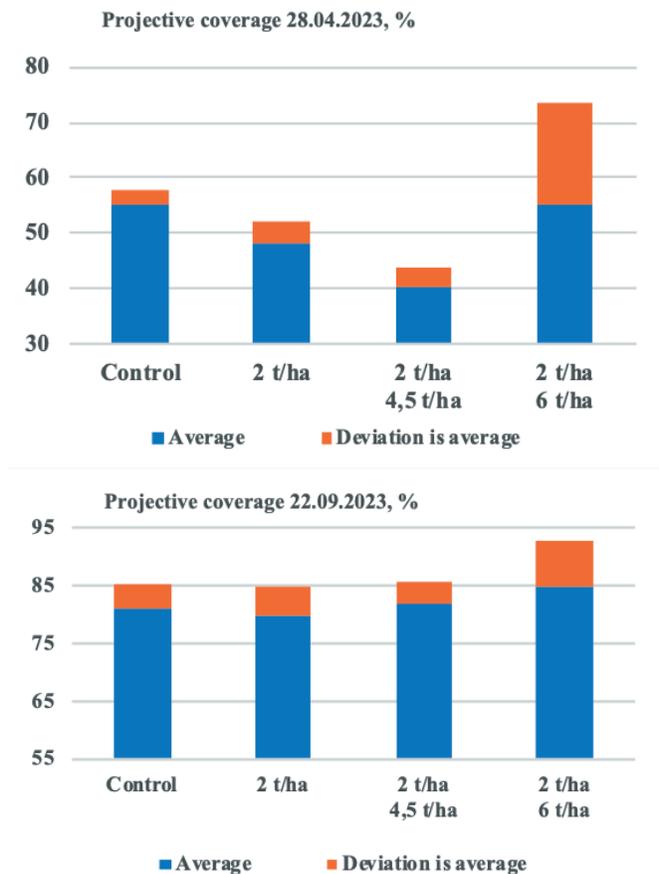


Fig. 3.1.9. Projective coverage in the micro-plots of the field experiment with quail droppings compost (first line) and phosphogypsum (second line)

At the end of season differences between all investigated experimental versions on the projective coverage are becoming obviously nonessential (Fig. 3.1.9, 22.09.2023) – at the level from 82 till 85%.

There are most pronounced between the experimental variants in the rate of formation of the above-ground grassy biomass (Fig. 9). In 3 variants of the experiment (with 1.5 t/ha of phosphogypsum and with the use of phosphogypsum in combination with compost from quail droppings in doses of 4.5 t/ha + 2.0 t/ha and of 6.0 t/ha + 2.0 t/ha), they are obviously statistically reliable and reach more than 4-multiple exceedances – with a relatively low variation between repetitions.

There are most pronounced differences between the control variant and all variants with application of the compost without or with phosphogypsum in the rate of formation of the above-ground grassy biomass (Fig. 3.1.10). In case of compost application total mass of the seasonally accumulated grassy biomass was in 5 times higher than in the control variant.

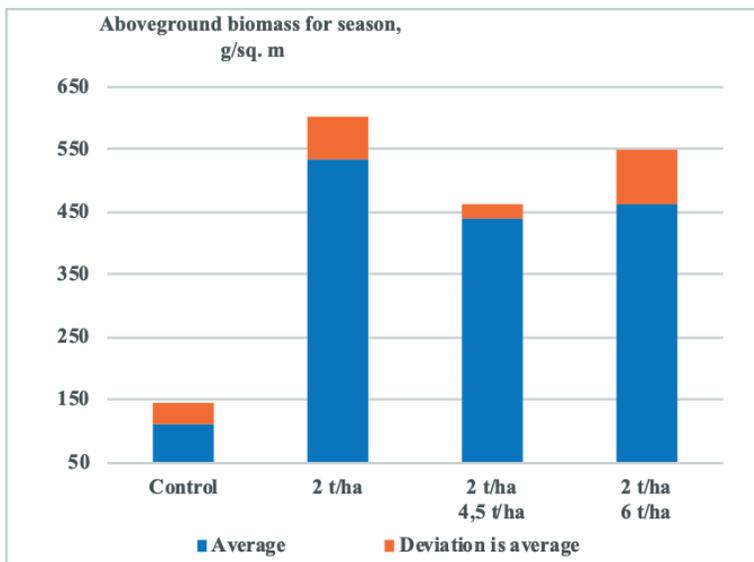


Fig. 3.1.10. Total for a season average values of the aboveground grass biomass in the micro-plots of the field experiment with compost (first line) and phosphogypsum (second line).

Summing up the seasonal accumulation of organic carbon in the turf topsoil ( $\Delta\text{Corg-s}$ ), in the aboveground grassy ( $\Sigma\text{Corg-gr}$ ) and its root biomass ( $\Sigma\text{Corg-r}$ ) minus the total carbon emissions for the season in the form of measured in situ soil  $\text{CO}_2$  fluxes ( $\Sigma\text{C-CO}_2$ ) allows us to quantify integral carbon fluxes between the soil-plant systems studied in the field experiment and in the surface layer of atmospheric air (Table 3.1.5).

Table 3.1.5. Assessment of the integral carbon fluxes between the soil-plant systems studied in the field experiment and the surface layer of atmospheric air per summer season May-August 2023.

Variant	$\Delta\text{Corg-s}$ , g/sq. m	$\Sigma\text{Corg-gr}$ , g/sq. m	$\Sigma\text{Corg-r}$ , g/sq. m p	$\Sigma\text{C-CO}_2$ , g/sq. m	Total carbon sink, g/sq. m
Control	12	55	17	903	-819
Comp 2 t/ha	1434	267	80	902	879
Comp 2 t/ha +P-G 4,5 t/ha	1733	220	66	1289	730
Comp 2 t/ha +P-G 6 t/ha	4	231	69	1499	-1195

The analysis shows a pronounced change of the dominant soil  $\text{CO}_2$  emission to the total atmospheric carbon sink in the experimental variants with 2 t/ha of compost from quail droppings and with the use of compost in combination with phosphogypsum in doses of 2.0 t/ha + 4.5 t/ha.

This allows one to consider the application of compost from quail droppings for the regeneration of the erosively *disturbed sod-podzolic soils* as prototype of the best available amelioration technology, taking into account the compost application aftereffect on the stabilization of carbon balance, the formation of large amount of herbaceous biomass and environmentally safe and profitable disposal of organic waste from the highly concentrated animal production.

## Conclusions

The conducted studies have shown the really small environmental risks in case of utilization of compost from the quail dropping in

doze of 2 t per ha for the restoration of erosionally disturbed sod-podzolic soils in the typical for Moscow region landscape conditions.

Moreover, application of this compost as an enhancer of the traditionally used in the greening design turf-sandy soil-ground allow essentially improve its functional-and-environmental features including water and pH regimes regulation, nutrient content and soil exchangeable capacity and saturation stabilization, carbon accumulation and support of positive carbon balance in case of intensively used agricultural grasslands and urban loans.

The use of compost from the quail dropping in doze already of 2 t per ha contributed to the fast and significant accumulation of organic carbon in the turf topsoil of the studied disturbed and regenerated sod-podzolic soils.

All these allow one to consider the application of compost from quail droppings for the regeneration of the erosively disturbed sod-podzolic soils as prototype of the best available amelioration technology, taking into account the compost application aftereffect on the stabilization of carbon balance, the formation of large amount of herbaceous biomass and environmentally safe and profitable disposal of organic waste from the highly concentrated animal production.

In the summer 2023 there was an increased intensity of soil CO<sub>2</sub> emissions in the variants with compost, but with a significantly (multiple) more active increase in grass biomass growing, we can talk about the atmosphere carbon sequestering nature of the technology of utilization of quail droppings during the restoration of disturbed sod-podzolic soils with the formation of a stable herbage.

## References

1. S. De Neve, S. Sleutel, G. Hofman. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 67, 1, 13-20 (2003)
2. D. Vetterlein, R. F. Hüttl, Plant and Soil, 213, 1-2 (1999).
3. J. Urrea, C. Garbisu, I. Alkorta, 9, 9, 542 (2019)
4. K. Grabas, A. Pawelczyk, W. Stręk [et al.], Waste and Biomass Valorization, 10, 10, 3143-3155 (2019)
5. M. S. Ayilara, O. S. Olanrewaju, O. O. Babalola, O. Odeyemi // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, No. 11. – P. 4456.

6. A. Tiefenbacher, T. Sandén, H. P. Haslmayr [et al.] // *Agronomy*. – 2021. – Vol. 11, No. 5.
7. E. Saadaoui, N. Ghazel, C. Ben Romdhane, N. Massoudi, *International Journal of Environmental Studies*, 74, 4, 558-567 (2017)
8. V.I. Vasenev, J.J. Stoorvogel, I.I. Vasenev, *Catena*, 107, 96–102 (2013)
9. V.I. Vasenev, J.J. Stoorvogel, N.D. Ananyeva, K.V. Ivashchenko, D.A. Sarzhanov, A.S. Epikhina, I.I. Vasenev, and R. Valentini, Quantifying spatial–temporal variability of carbon stocks and fluxes in urban soils from local monitoring to regional modelling. In: *The Carbon Footprint Handbook*, 185–221 (2015)
10. A.S. Yakovlev, M.A. Kaniskin, V.A. Terekhova, *Eurasian Soil Science*, 46, 6 (2013).
11. M.M. Vizirskaya, A.S. Epikhina, V.I. Vasenev [et al.], *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Animal Husbandry*, 5, 38–48 (2013)
12. A.S. Shchepeleva, I.V. Vasenev, I.M. Mazirov, I.I. Vasenev, I.S. Prokhorov, D.D. Gosse, *Urban Ecosystems*, 20, 2, 309-321 (2017)
13. A.S. Shchepeleva, M.M. Vizirskaya, V.I. Vasenev, I.I. Vasenev, Analysis of carbon stocks and fluxes of urban lawn ecosystems in Moscow megapolis in *Springer Geogr.*, 80–88 (2019)
14. V.I. Vasenev, S. Castaldi, M.M. Vizirskaya, N.D. Ananyeva, A.S. Shchepeleva, I.M. Mazirov, K.V. Ivashchenko, R. Valentini, I.I. Vasenev, Urban soil respiration and its autotrophic and heterotrophic components compared to adjacent forest and cropland within the Moscow megapolis in *Springer Geography* (2018)
15. I.I. Vasenev, A.V. Buzylev, Yu.A. Kurbatova [et al.] *Agroecological modeling and design (RSAU-MTAA, Moscow, 2010)*
16. I. Vasenev, M. Tikhonova, A. Avilova, Forest soil quality analysis at the potential reference site for Moscow megalopolis environmental monitoring in *Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM*, 545–552 (2017).
17. M.T. Spynu, M.V. Tikhonova, E.M. Ilyushkova [et al.], *AgroEcoInfo*, 4(52) (2022)
18. Digital technologies of agroecological monitoring and optimization of agriculture (edited by I.I. Vasenev) (RSAU-MTAA, Moscow, 2022)

**Агроэкологическая оценка эффективности  
утилизации перепелиного помета при восстановлении  
нарушенных дерново-подзолистых почв с формированием  
устойчивого травостоя**

*А.В. Степанов, П.И. Васнев и И.И. Васнев*

**Аннотация:** К наиболее острым экологическим проблемам современности относятся большие объемы птичьего помета, ежегодно производимого на крупных птицеводческих комплексах. В то же время дерново-подзолистые почвы, доминирующие в Нечерноземной зоне Европейской части России, характеризуются низкими запасами гумуса, которые быстро снижаются при интенсивном сельскохозяйственном использовании и антропогенной деградации почв. Для восстановления деградированных дерново-подзолистых почв при поддержке проекта № 075-15-2021-1030 Министерства науки и высшего образования России был использован торфяно-песчаный субстрат, обогащенный компостом из перепелиного помета без фосфогипса и с применением фосфогипса для стабилизации органических соединений компоста. Вегетационный эксперимент показал максимальное увеличение растительной биомассы травостоя в варианте с комбинированным использованием компоста и фосфогипса: соответственно, на 30% выше, чем в контроле. Летом наблюдается повышенная интенсивность выбросов CO<sub>2</sub> из почвы в вариантах с компостом, но при многократно более активном увеличении роста биомассы травы, поэтому можно говорить о связывающем углерод в атмосфере характере технологии утилизации перепелиного помета при восстановлении нарушенных дерново-подзолистых почв с использованием компоста с формированием устойчивого травостоя.

### 3.2. Ecological assessment of the aftereffect of phosphogypsum on the stabilization of the carbon balance of the regenerated topsoil of degraded sod-podzolic soils<sup>1</sup>

*Peter Vasenev, Andrey Stepanov and Ivan Vasenev*

**Abstract:** Against the background of global climate changes, agroecological problems of erosion and agrogenic degradation of intensively used arable soils have become more acute. This problem is most acute in the case of old-arable sod-podzolic soils with initially low humus content and small thickness of their sod horizons. Our research carried out with the support of project No. 075-15-2021-1030 of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, provides investigation the influence of industrial waste in the production of phosphorous fertilizers – phosphogypsum on the stabilization of the carbon balance of the regenerated topsoil of degraded sod-podzolic soils. The research was carried out at the Agroecological Station of the Field Experimental Station of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy in fall of 2022 and in summer of 2023. The use of phosphogypsum in a dose of 1.5 t/ha contributed to the significant accumulation of organic carbon in the topsoil of the studied sod-podzolic soils – in comparison with the control. In combination with compost from bird dropping at a dose of 2.0 t/ha, the aftereffect of the use of phosphogypsum essentially increases, that indicates good prospects for the validation of this technology as a natural climate project.

#### Introduction

Against the background of global climate changes, agroecological problems of erosion and agrogenic degradation of intensively used arable soils have become more acute [1, 2].

The increased intensity and duration of less frequent spring and summer precipitation forms increased surface runoff and provokes accelerated erosion development with the loss of the most humus-rich fine-grained particles from topsoil [2]. The dry periods, that re-

---

<sup>1</sup> Доклад был представлен 5 октября 2023 года на 3-й Международной конференции по исследованию сельскохозяйственных и пищевых технологий (Адана, Турция).

place them, longer than before, [3] activate the processes of mineralization of soil organic matter and plant residues, further reducing humus reserves in topsoil [4]. Dishumification is usually accompanied by disaggregation and over-compaction of soil horizons with a decrease in their porosity and ability to quickly absorb precipitation, that often leads to further running of agrogenically accelerated erosion [5].

This problem is most acute in the case of old-arable sod-podzolic soils with initially low humus content and small thickness of their sod horizons [6]. The accelerated development of their erosion is often accompanied by a sharp drop in soil fertility and the need for bioremediation, as in the case of man-made disturbance of these soils in the zone of impact of construction and transport projects [7]. Lime-containing ameliorants are traditionally used to improve the structure and to stabilize the carbon balance of sod-podzolic soils [8]. Their principal disadvantages are the high cost of commercial ameliorants and the often-fixed increased content of heavy metals in using lime-containing industrial waste [9]. Our research provides investigation the influence of industrial waste in the production of phosphorous fertilizers – phosphogypsum on the stabilization of the carbon balance of the regenerated topsoil of degraded sod-podzolic soils.

Phosphogypsum is a by-product of the production of phosphorus fertilizers, which must be disposed of annually to reduce the negative impact on the environment at the place of its production and temporary storage [9, 10]. At the same time, phosphogypsum contains cations that contribute to the stabilization of humic compounds, and characterized by an increased concentration of macroelements of plant nutrition, including P and S [11], by the potential ability to regulate the reaction of the soil environment, plant nutrition conditions [12, 13] and microorganisms, the carbon state of soils and the mobility of pollutants.

Phosphogypsum is traditionally used for reclamation and neutralization of the alkaline reaction of saline soils [14-16], but there have been published papers with positive results of its application on podzolic soils – without significant acidification of their reaction [17].

Additional interest in such studies is caused by the problem of accelerated degradation of lawn ecosystems in conditions of increased recreational load on them at the megacities, where they play

an important role in regulating the quality of the urban environment [18-21]. At the same time, most of the lawns artificially created on peat-sandy soils or overhauled with their use are characterized by increased instability of functioning in conditions of increased aeration of organic peat mass and high anthropogenic load [22-23], and therefore, they require regular updating of the soil material.

The usually increased instability and accelerated mineralization of organic matter of the most common lawn and regenerative soil-ground are associated with their peat-sand composition [24]. Peat in peat-sand mixtures, as a rule, decomposes rapidly with the formation of CO<sub>2</sub>, increasing the total greenhouse gas emissions of urban ecosystems.

The addition of phosphogypsum to peat-sand soil substrates can contribute to the partial stabilization of their organic matter, neutralization of the soil pH and to the improvement the nutrition of lawn grass. This is important for prolonging the planned period of conservation of lawn and regenerative topsoil, reducing the cost of regeneration of eroded soils and lawn maintenance, as well as reducing the fluxes of greenhouse gases from the soil surface.

The goal of this paper is to give ecological assessment of the aftereffect of phosphogypsum on the stabilization of the carbon balance of the regenerated topsoil of degraded sod-podzolic soils in conditions of vegetation season with extremely high for Moscow region precipitation level in 2023.

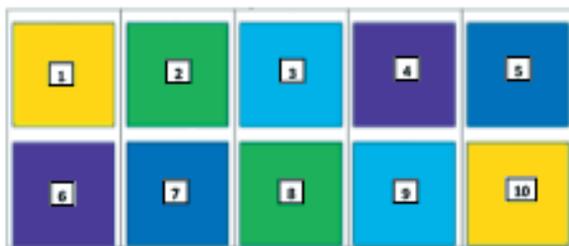
### **Materials and Methods**

The research was carried out on the territory of the Agroecological Station of Field Experimental Station of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (see Fig. 3.1.1) in summer of 2023 with an extremely high precipitation (604 mm in May to August, that is 2 times more than the average long-term precipitation for this period – see Table 3.1.1).

The scheme of the micro-plot field experiment with plots of 4 m<sup>2</sup> (2 m x 2 m – Fig. 3.2.1) included control variant (without the use of phosphogypsum), variants with an increasing doses of phosphogypsum (1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 t/ha) and with the use of phosphogypsum in combination with compost from quail droppings (in doses of 4.5 t/ha + 2.0 t/ha and 6.0 t/ha + 2.0 t/ha), which were added to the peat-

sand soil-ground (with a weight ratio peat to sand of 1 to 3) traditionally used in phytoremediation projects applied in a 15 cm layer to the surface of erosively degraded sod-podzolic soils.

In the seed method of lawn creation, a grass mixture was used with the following composition: pasture ryegrass (*Lolium perenne*) (40%), red Maxim 1 fescue (*Festuca rubra*) (40%), red Greenlight fescue (*Festuca rubra*) (10%), meadow bluegrass (*Poa pratensis*) (10%). Seeding rate: 200 g per plot.



Variant of the experiment	Phosphogypsum, t/ha	Compost, t/ha	Plot No.
I	-	-	1; 10
II	1,5	-	2; 8
III	3	-	3; 9
IV	4,5	2	4; 6
V	6	2	5; 7

Fig. 3.2.1. The location scheme of the micro-plot field experiment.

To carry out seasonal monitoring of CO<sub>2</sub> fluxes at all plots after the initial formation of the grass cover in August 2022, the bases of the over-ground exposure chambers installed during the observation periods were installed (Fig. 3.2.2).

Monitoring of organic carbon content in the topsoil, of soil regimes and of the dynamics of the growth of herbaceous biomass were carried out using traditional methods of agroecological monitoring [4, 5, 25] and land assessment [8, 27]. Monitoring of soil moisture and temperature conditions – using IoT sensors and portable electronic devices: a soil thermometer Checktemp 1 and a moisture meter Theratrobe HH2.



Fig. 3.2.2. The micro-plot field experiment with the bases of the over-ground exposure chambers.

Determination of soil carbon dioxide emissions – using a portable gas analyzer LiCor-820 *in situ* [28]. Accounting of aboveground biomass and its growth rate – by the method of sequential mowing and IoT sensors CropTalker [5].

## Results and Discussion

The conducted studies have shown a relatively small, but statistically significant (even against the background of seasonal dynamics) decrease in comparison with the control variant of the bulk density of the turf topsoil (with a thickness of 6 cm) in 3 out of 4 variants of the phosphogypsum application (Fig. 3.2.3).

In the conditions of the summer season with a sharply increased amount of precipitation, changes in the soil moisture content of the turf topsoil are even more significant, but statistically significant only in case of phosphogypsum application without compost (Fig. 3.2.4).

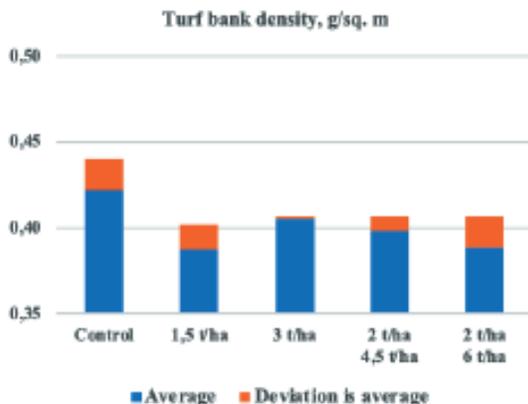


Fig. 3.2.3. Turf topsoil (0-6 cm) bulk density average for season values in the micro-plots of the field experiment with phosphogypsum (first line) and compost (second line).

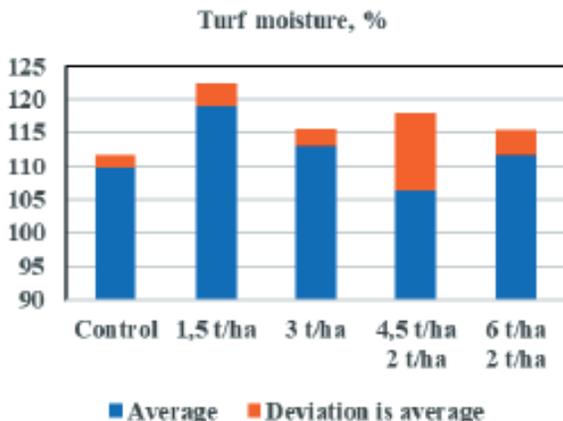


Fig. 3.2.4. Turf topsoil (0-6 cm) moisture average for season values in the micro-plots of the field experiment with phosphogypsum (first line) and compost (second line)

The initial content of organic matter at the beginning of the main growing season (Fig. 3.2.5, 28.04.2023) varies slightly and statistically insignificantly between the variants of the experiment.

The maximum differences between their average values do not exceed 3.5% SOM (1.75% SOC), which is no more than 14 relative percent of the SOM content and is typical for peat-sandy soils [22, 23].

At the end of the main growing season (Fig. 3.2.6, 22.09.2023), 2 variants of the experiment (with 1.5 t/ha of phosphogypsum and with the phosphogypsum application in combination with compost from quail droppings in doses of 4.5 t/ha + 2.0 t/ha) showed statistically significant and pronounced even against the background of seasonal dynamics accumulation of organic matter in the turf topsoil (6 cm thick). At the same time, the content of organic matter in the control version remained almost unchanged.

In most of the studied variants of soil-grounds, the seasonal dynamics of soil CO<sub>2</sub> emission is pronounced (Fig. 3.2.7), measured during the daytime, in the period between 10 a.m. and 3 p.m.

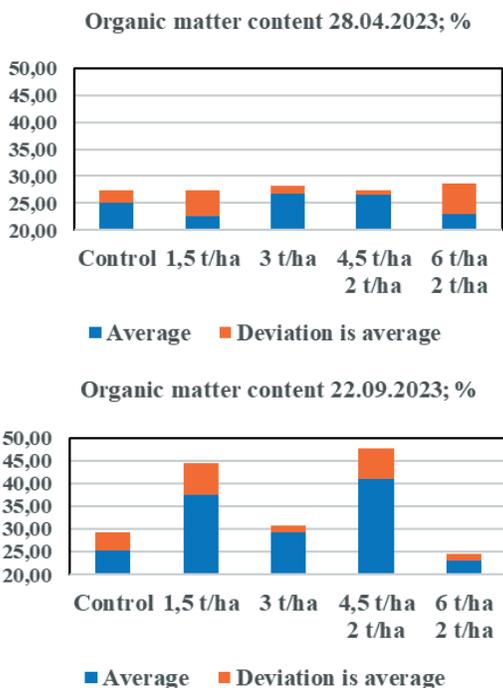


Fig. 3.2.5. Soil Organic matter content in the micro-plots of the field experiment with phosphogypsum (first line) and compost

To a lesser extent, it is expressed in the variant of the experiment with 1.5 t/ha of phosphogypsum, which is characterized by a statistically significant increase in soil CO<sub>2</sub> emission (Fig. 3.2.7).

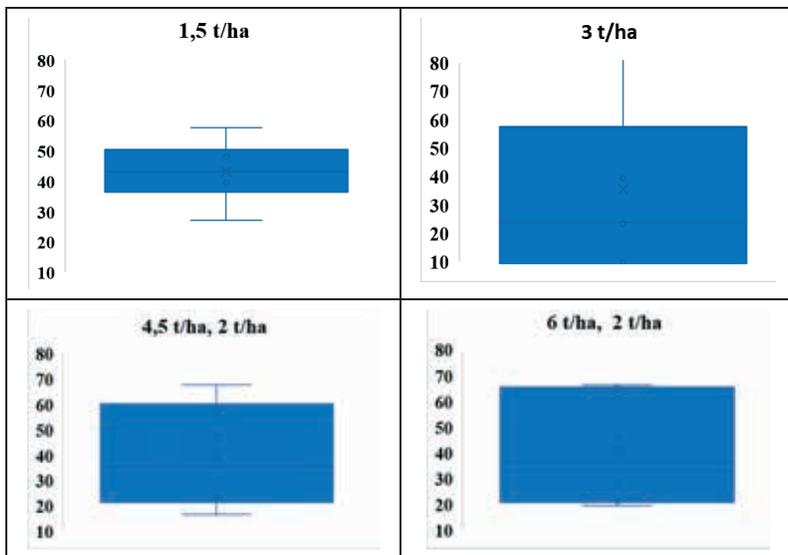


Fig. 3.2.6. Diagrams of the scope of seasonal dynamics of soil CO<sub>2</sub> emission by main variants of the micro-plot field experiment

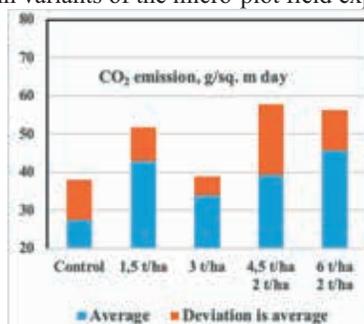


Fig. 3.2.7. Soil CO<sub>2</sub> emission average for season values in the micro-plots of the field experiment with phosphogypsum (first line) and compost (second line)

There are most pronounced between the experimental variants in the rate of formation of the above-ground grassy biomass (Fig. 3.2.8). In 3 variants of the experiment (with 1.5 t/ha of phosphogypsum and with the use of phosphogypsum in combination with compost from quail droppings in doses of 4.5 t/ha + 2.0 t/ha and of 6.0 t/ha + 2.0 t/ha), they are obviously statistically reliable and reach more than 4-multiple exceedances – with a relatively low variation between repetitions.

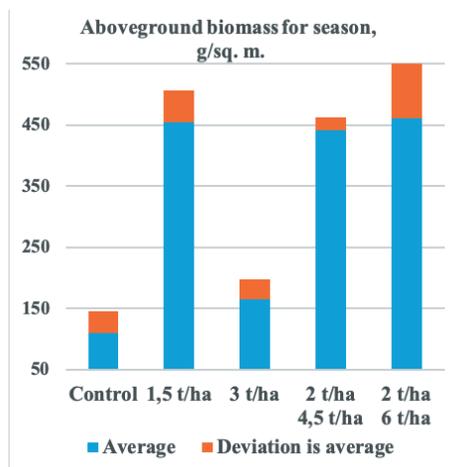


Fig. 3.2.8. Total for a season average values of the aboveground grass biomass in the micro-plots of the field experiment with phosphogypsum (first line) and compost (second line)

Summing up the seasonal accumulation of organic carbon in the turf topsoil ( $\Delta\text{Corg-s}$ ), in the aboveground grassy ( $\Sigma\text{Corg-gr}$ ) and its root biomass ( $\Sigma\text{Corg-r}$ ) minus the total carbon emissions for the season in the form of measured in situ soil  $\text{CO}_2$  fluxes ( $\Sigma\text{C-CO}_2$ ) allows us to quantify integral carbon fluxes between the soil-plant systems studied in the field experiment and the surface layer of atmospheric air (Table 3.2.1).

The analysis shows a pronounced change of the dominant soil  $\text{CO}_2$  emission to the total atmospheric carbon sink in the experimental variants with 1.5 t/ha of phosphogypsum and with the use of phosphogypsum in combination with compost from quail droppings in doses of 4.5 t/ha + 2.0 t/ha.

This allows one to consider them as prototypes of the best available technologies for the regeneration of erosively degraded sod-podzolic soils, taking into account the phosphogypsum application aftereffect on the stabilization of carbon balance, the formation of large amount of herbaceous biomass and environmentally safe and profitable disposal of waste from the production of phosphorous mineral fertilizers.

Table 3.2.1. Assessment of the integral carbon fluxes between the soil-plant systems studied in the field experiment and the surface layer of atmospheric air

Variant	$\Delta C_{org-s}$ , g/sq. m per season	$\Sigma C_{org-gr}$ , g/sq. m per season	$\Sigma C_{org-gr}$ , g/sq. m per season	$\Sigma C-CO_2$ , g/sq. m per season	Total carbon sink, g/sq. m per season
Control	11.5	55.2	16.6	903.1	-819.8
P-G 1,5 t/ha	1704.3	227.3	68.2	1409.8	590.0
P-G 3 t/ha	321.0	82.7	24.8	1109.8	-680.3
P-G 4,5 t/ha+ Comp 2 t/ha	1732.8	220.4	66.1	1288.8	730.5
P-G 6 t/ha + Comp 2 t/ha	3.8	230.9	69.3	1499.1	-1195.1

## Conclusions

The conducted studies have shown a relatively small, but statistically significant (even against the background of seasonal dynamics) decrease in comparison with the control variant of the bulk density of the turf topsoil (with a thickness of 6 cm) in 3 out of 4 variants of the phosphogypsum application for stabilization of the regenerated topsoil of degraded sod-podzolic soils in conditions of vegetation season with extremely high for Moscow region precipitation level in 2023. The study showed no signs of erosion and disturbances in the operation of the local hydrographic network, even during the most intense rains.

The use of phosphogypsum already in a dose of 1.5 t/ha contributed to the significant accumulation of organic carbon in the turf topsoil of the studied sod-podzolic soils – in comparison with the control. The use of a combination of phosphogypsum at a dose of 4.5 t/ha in combination with compost from the quail dropping (2.0 t/ha) additionally increased the intensity of carbon accumulation.

The positive balance in the soil-plant system was obviously adjusted too, that gives a significant positive assessment of the aftereffect of the use of phosphogypsum on the stabilization of the carbon balance of the regenerated topsoil of degraded sod-podzolic soils already at a dose of 1.5 t/ha.

In combination with compost from quail dropping at a dose of 2.0 t/ha, the aftereffect of the use of phosphogypsum essentially increases, that indicates good prospects for the validation of this technology

as a natural climate project plus to формирования больших запасов травянистой биомассы и экологически безопасной утилизации отхода производства фосфорных минеральных удобрений.

*The research carried out with the support of project No. 075-15-2021-1030 of the Ministry of Science and Higher Education of Russia.*

## References

1. G. A. D. Tilaki, R. Rahmani, S. A. Hoseini, I. Vasenev, Acta Ecologica Sinica. 42, 1, 82-89 (2022)
19. L. Hou, W. Kong, Q. Qiu, Y. Yao, K. Bao, L. Zhang, H. Jia, I. Vasenev, X. Wei, Agriculture, Ecosystems and Environment. 336, 108020 (2022)
20. A. Di Paola, L. Caporaso, F. Di Paola, A. Bombelli, I. Vasenev, O. Nesterova, S. Castaldi, R. Valentini, Land Use Policy, 78, 70-77 (2018)
21. I.I. Vasenev, A.P. Shcherbakov, E.G. Vaseneva, M.Yu. Degteva, Basic agroecological monitoring in Methodological guide and normative materials for the development of adaptive landscape farming systems, Kursk, Russia, 143-152 (2001)
22. Digital technologies of agroecological monitoring and optimization of agriculture (edited by I.I. Vasenev) (RSAU-MTAA, Moscow, 2022)
23. D.V. Morev, Agroecological assessment of lands in the conditions of a zonal series of agricultural landscapes with increased diversity of soil cover: Thesis of the Candidate of Sciences. (RSAU-MTAA, Moscow, 2017)
24. I.I. Vasenev, V.V. Chelnokov, V.V. Vershinin, T.N. Kovaleva, A.N. Glushko, A.S. Makarova, G.G. Priorov, V.M. Retivov, Yu E. Vasiliev, A.V. Matasov, Development of a methodology for monitoring the environmental impact of waste of the year-round maintenance of highways in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 663, 1, 012053 (2021)
25. A.L. Chernogorov, P.A. Chekmarev, I.I. Vasenev, G.D. Gogmachadze, Agroecological land assessment and land use optimization (Moscow University Press, Moscow, 2012)
26. J. Santa-Cruz, I.I. Vasenev, H. Gaete, P. Peñaloza, Yu. A. Krutyakov, A. Neaman, Russian Journal of Ecology, 52, 6, 479 – 485 (2021)
27. A.V. Gorbunov, B.B. Maksjuta, M.V. Frontasyeva [et al.], Science of the Total Environment, 122, 3, 337-346 (1992)
28. A.I. Sultanova, A.O. Abdizhappar, M.A. Dauletov, A.S. Kolesnikov, On the issue of utilization of man-made waste of phosphogypsum in Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference: Metallurgy of the XXI century through the eyes of the young, Donetsk, 25 May 2017, Donetsk National Technical University, Donetsk, 247-248 (2017)
29. I.V. Sinyavsky, A.M. Plotnikov, A.V. Sozinov, N.D. Gushchenskaya, Agrarian Scientific Journal, 1, 37–42 (2022)

30. V.G. Griguletsky, O.V. Shiryayev, R.A. Ivakin, *Ecological Bulletin of the North Caucasus*, 17, 4, 20–28 (2021)
31. K. Grabas, A. Pawełczyk, W. Stręk [et al.], *Waste and Biomass Valorization*, 10, 10, 3143-3155 (2019)
32. E. Saadaoui, N. Ghazel, C. Ben Romdhane, N. Massoudi, *International Journal of Environmental Studies*, 74, 4, 558-567 (2017)
33. J. Wang, *Journal of Cleaner Production*, 276, 123337 (2020)
34. V.V. Okorokov, *Prospects and ways of using phosphogypsum to increase the fertility of acidic soils: methodological guidelines* (Vladimir Scientific Research Institute of Agriculture, Vladimir, Russia, 2007)
35. V.I. Vasenev, J.J. Stoorvogel, I.I. Vasenev, *Catena*, 107, 96–102 (2013)
36. V.I. Vasenev, J.J. Stoorvogel, N.D. Ananyeva, K.V. Ivashchenko, D.A. Sarzhanov, A.S. Epikhina, I.I. Vasenev, and R. Valentini, *Quantifying spatial–temporal variability of carbon stocks and fluxes in urban soils from local monitoring to regional modeling in The Carbon Footprint Handbook*, 185–221 (2015)
37. A.S. Yakovlev, M.A. Kaniskin, V.A. Terekhova, *Eurasian Soil Science*, 46, 6 (2013).
38. M.M. Vizirskaya, A.S. Epikhina, V.I. Vasenev [et al.], *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Animal Husbandry*, 5, 38–48 (2013)
39. A.S. Shchepeleva, I.V. Vasenev, I.M. Mazirov, I.I. Vasenev, I.S. Prokhorov, D.D. Gosse, *Urban Ecosystems*, 20, 2, 309-321 (2017)
40. A.S. Shchepeleva, M.M. Vizirskaya, V.I. Vasenev, I.I. Vasenev, *Analysis of carbon stocks and fluxes of urban lawn ecosystems in Moscow megapolis in Springer Geogr.*, 80–88 (2019)
41. V.I. Vasenev, S. Castaldi, M.M. Vizirskaya, N.D. Ananyeva, A.S. Shchepeleva, I.M. Mazirov, K.V. Ivashchenko, R. Valentini, I.I. Vasenev, *Urban soil respiration and its autotrophic and heterotrophic components compared to adjacent forest and cropland within the Moscow megapolis in Springer Geography* (2018)
42. I.I. Vasenev, A.V. Buzylev, Yu.A. Kurbatova [et al.] *Agroecological modeling and design* (RSAU-MTAA, Moscow, 2010)
43. I. Vasenev, M. Tikhonova, A. Avilova, *Forest soil quality analysis at the potential reference site for Moscow megalopolis environmental monitoring in Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM*, 545–552 (2017).
44. I.I. Vasenev, A.A. Avilova, M.V. Tikhonova, S.J. Ermakov, *Assessment of within-forest variability in Albeluvisol quality in an urban forest ecosystem for the northern part of the Moscow megalopolis in Springer Geography*, 133–144 (2020)
45. M.T. Spynu, M.V. Tikhonova, E.M. Ilyushkova [et al.], *AgroE-coInfo*, 4(52) (2022)

**Экологическая оценка последствий фосфогипса  
на стабилизацию углеродного баланса регенерированных  
верхних горизонтов деградированных  
дерново-подзолистых почв**

*П.И. Васнев, А.В. Степанов и И.И. Васнев*

Аннотация: На фоне глобальных климатических изменений обострились агроэкологические проблемы эрозии и агрогенной деградации интенсивно используемых пахотных почв. Наиболее остро эта проблема стоит в случае старопашотных дерново-подзолистых почв с изначально низким содержанием гумуса и небольшой толщиной их дерновых горизонтов. Наше исследование, проведенное при поддержке проекта №. 075-15-2021-1030 Министерства науки и высшего образования России, предусматривает изучение влияния промышленных отходов при производстве фосфорных удобрений – фосфогипса на стабилизацию углеродного баланса регенерированного верхнего слоя почвы деградированных дерново-подзолистых почв. Исследования проводились на агроэкологической станции Полевой опытной станции Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева осенью 2022 года и летом 2023 года. Применение фосфогипса в дозе 1,5 т/га способствовало значительному накоплению органического углерода в верхнем слое почвы исследуемых дерново-подзолистых почв – по сравнению с контролем. В сочетании с компостом из птичьего помета в дозе 2,0 т/га последствие от применения фосфогипса существенно возрастает, что указывает на хорошие перспективы апробации этой технологии в качестве природно-климатического проекта.

---

## 4. Экологический мониторинг и оценка эмиссии парниковых газов в условиях наземных экосистем

### 4.1. Верификация по методу турбулентных пульсаций транспирации по данным IoT мониторинга лесных насаждений

*Александров Н.А., Серёгин И.А., Ярославцев А.М.*

**Аннотация:** Проведена верификация оценки транспирации древостоя с помощью разработанных IoT устройств экологического мониторинга по методу турбулентных пульсаций. Проведенный мониторинг динамики сокодвижения с помощью TreeTalker выявил высокую пространственную и временную неоднородность скорости сокодвижения деревьев, связанную с видовой принадлежностью и доступностью влаги. Предложенный метод оценки транспирации древостоя городского лесопарка с использованием по данным распределенной сети IoT устройств, показал сходную динамику и абсолютные значения с данными по эвапотранспирации полученными методом турбулентных пульсаций.

Леса, как самая сложная наземная экосистема в мире, содержат множество биологических ресурсов, где обмен массой и энергией может непосредственно вызывать изменения температуры подстилающей поверхности, эвапотранспирации и продуктивности, тем самым играя решающую роль в изменении климата.

Перенос энергии и массы между подстилающей поверхностью и атмосферой осуществляется в основном за счет турбулентного обмена и диффузии в приповерхностном слое. На фоне глобального изменения окружающей среды важно понять какую роль играет гидротермальный обмен в лесах, а анализ этого процесса позволит углубить понимание глобальной климатической системы [Jin et al., 2022].

Эвапотранспирация (ЕТ), состоящая из испарения влаги с поверхности почвы (Е), перехвата влаги пологом и кронами деревьев (I) и транспирации растениями (Т), имеет решающее значение для глобального водного и энергетического балансов. Транспирация связана с ассимиляцией углерода, и существенную роль

играет обмен водой и углеродом между атмосферой и наземными экосистемами в гидрологических и углеродных циклах. Разделение эвапотранспирации на E, I и T и исследование факторов, контролирующих разделение ET, улучшит моделирование взаимодействия атмосферы и поверхности земли и поможет понять задействованные биофизические процессы [Nelson et al., 2020].

Глобальная доля транспирации была оценена в  $61 \pm 15\%$  на основе данных, полученных MODIS-ET, а в большинстве наземных экосистем преобладает транспирация, которая варьируется от самого высокого значения в тропических лесах ( $70 \pm 14\%$ ) до самого низкого в степях и пустынях ( $51 \pm 15\%$ ) по результатам метаанализа исследований разделения эвапотранспирации [Schlesinger, Jasechko, 2014].

Однако долю транспирации трудно измерить в полевых условиях и постоянная оценка в наземных экосистемах остается сложной задачей. Поэтому важно провести комплексный анализ изменений потоков водяного пара и изучить контролирующее влияние растительности на транспирацию в различных экосистемах [Fisher et al., 2017].

Оценка транспирации в масштабах экосистемы является сложной задачей, поэтому она широко изучается в лабораториях и теплицах по выращиванию растений. Трудность оценки заключается в неоднородности физических и физиологических свойств и процессов, лежащих в основе водопотребления растениями и экосистемой в целом.

Эти проблемы влияют на доступность и неоднозначность в оценках экосистемы, что в свою очередь приводит к неопределенностям, влияющим на прогнозирование климатических изменений [Nelson et al., 2018].

Метод турбулентных пульсаций (Eddy Covariance, EC) — стандартный метод, используемый для измерения газовых потоков на уровне экосистем. Данный метод позволяет проводить измерения потоков газов, не нарушая экосистему, и ключевым преимуществом метода является то, что это единственный прямой метод непрерывного измерения потоков газовых примесей между биосферой и атмосферой.

Было доказано, что метод турбулентной пульсации (МТП) является эффективным инструментом для измерений потоков воды, углерода и энергии на уровне экосистемы [Baldocchi, 2020].

В последние годы появилась новая тенденция в производственных технологиях, обычно называемая Индустрия 4.0, позволяющая достичь более высокого уровня операционной эффективности и производительности за счет автоматизированных и взаимосвязанных систем. Это произошло из-за сочетания технологических концепций киберфизических систем и Интернета вещей (IoT), новой парадигмы, согласно которой объекты, а также живые существа могут передавать однозначно идентифицируемые данные в Интернет.

В настоящее время существует множество определений IoT. Согласно часто цитируемому определению международного союза электросвязи (ITU), IoT — это «глобальная инфраструктура для информационного общества, позволяющая предоставлять расширенные услуги путем соединения (физических и виртуальных) вещей на основе существующих и развивающихся функционально совместимых информационных и коммуникационных технологий» [Riccardo et al., 2019].

На данный момент технологии Интернета вещей (IoT) используются в различных областях, включая безопасность, сельское хозяйство, экологию, интеллектуальные измерения, умный город и умный дом.

Выбор места проведения исследований обуславливался тем, что Лесная опытная дача является крупнейшим опытным участком, расположенным на северо-западе г. Москвы. Около половины деревьев имеет естественное происхождение. Основными видами являются: дуб черешчатый (*Quercus robur*), липа мелколистная (*Tilia cordata*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), береза повислая (*Betula pendula*) [Наумов, 2009; Яшин и др., 2015; Тихонова, 2013].

Участок имеет неправильную форму общей площадью 5,8 га. Древесная растительность представлена сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) возрастом 50-100 лет, липой мелколистной (*Tilia cordata*). Единично встречаются береза повислая (*Betula pendula*) и дуб черешчатый (*Quercus robur*). Средняя высота деревьев варьирует от 12 до 25 метров [Наумов, 2009; Яшин и др., 2015; Do, Rocheteau, 2002].

На территории объекта исследований была установлена сеть датчиков TreeTalker, расположенных в радиусе 300 м от станции

турбулентных пульсаций и предназначена для измерения скорости сокодвигения по методу теплового рассеивания (TDP) Гранье в модификации До и Рошто [Do, Rocheteau, 2002].

Датчики сокодвигения ТТ+ устанавливаются на расстоянии 10 см друг от друга по вертикали и 3 см по горизонтали на северной стороне ствола, дабы избежать теплового воздействия значений в результате нагрева прямыми солнечными лучами.

Один из датчиков за счет нагрева создает тепловой поток, который рассеивается сокодвигением, в то время как второй, измеряя температуру ненагреваемой части ствола, используется как контроль для оценки теплового градиента, а также включает в себя емкостный датчик влажности древесины. Для определения плотности потока влаги в ксилеме по методу Гранье применялось уравнение (4.1.1).

Для расчета транспирации на уровне экосистемы по данным IoT устройств, нами предложена формула (4.1.2).

$$F_d = 11.899 \left[ \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{on} - \Delta T_{off}} \right]^{1.231}, \quad (4.1.1)$$

где:  $F_d$  – плотность потока ( $\text{г м}^{-2} \text{с}^{-1}$ ),

$\Delta T$  – фактический температурный градиент между двумя датчиками после нагревания,

$\Delta T_{max}$  – максимальный температурный градиент, измеренный между датчиками после нагревания за определенный временной период (чаще всего сутки),

$\Delta T_{on}$  – температурный градиент между температурой нагрева и контроля после включения датчика нагрева ( $\Delta T_{on} = T_{heat\_1} - T_{ref\_1}$ );

$\Delta T_{off}$  – температурный градиент между температурой нагрева и контроля до включения датчика нагрева ( $\Delta T_{off} = T_{heat\_0} - T_{ref\_0}$ ).

$$T_i = \frac{F_{di} \cdot BA_i \cdot SAR_i}{r_{ci}^2} \cdot SR_{i, \text{мм}}; T_e = \sum T_i, \quad (4.1.2)$$

где:  $T_i$  это транспирация  $i$ -го вида в экосистеме ( $\text{м } 10^{-3}$ );

$F_{di}$  – средняя плотность сокодвигения деревьев  $i$ -го вида ( $\text{м}^2 \text{ч}^{-1} 10^{-3}$ );

$BA_i$  – площадь поперечного сечения ствола на уровне груди  $i$ -го вида ( $\text{м}^2$ );

$SAR_i$  – доля сокопроводящей древесины от общей площади ствола  $i$ -го вида,  $r_{ci}^2$  – средняя площадь кроны  $i$ -го вида;

$SR_i$  – доля вида в общем древостое;

$T_e$  – общая экосистемная транспирация.

Для перехода от транспирации отдельных деревьев к транспирации на уровне изучаемой территории, было заложено 3 учетных площадки квадратной формы размером 30 на 30 метров. В учетных площадках на уровне груди измерялись обхваты стволов (ДВН) доминирующих пород деревьев и оценивалась формула древостоя. После усреднения по 3-м площадкам были получены средние диаметры стволов доминирующих пород.

Важно отметить, что под пологом крон доминирующих видов с высотой древостоя 25-30 м произрастает довольно много угнетенных деревьев клена остролистного (*Acer platanoides*) высотой 5-10 м и диаметром ствола 10-30 см. Их вклад никак не оценивался и был исключен из рассмотрения из-за большой трудоемкости включения их в анализ и невозможности оценить диаметр крон дистанционным методом.

На территории ЛОД установлена 35-метровая вышка с комплексом высокочастотного оборудования для измерения потоков воды и углекислого газа по методу турбулентных пульсаций.

Измерение потоков турбулентных пульсаций осуществлялось с помощью газоанализатора с закрытым трактом Li 7200 с газосборной трубкой длиной 72 см, с функцией подогрева [Бурба и др., 2016] и ультразвукового анемометра Gill WindMaster. Обработка и расчет данных измеренных ковариационных потоков проводилась при помощи программного обеспечения EddyPro® Software (Version 7.0).

Поскольку, при проведении измерений, использовался газоанализатор закрытого типа Li 7200 с подогреваемой газосборной трубкой длиной 70 см, то для минимизации задержек измерений был использован метод максимизации ковариации. Версия внутреннего программного обеспечения анемометра содержала ныне широко известную ошибку «w-boost», поэтому поправка на эту ошибку вносилась на уровне расчетов в EddyPro.

Турбулентная пульсация рассчитывалась по методу блочно-го усреднения (усреднение по Рейнольдсу). Компенсация колебаний проводилась с учетом поправок WPL. Качество потока

оценивалось по шкале, предложенной Mauder and Foken (2004). Оценка линейного следа (footprint) проводилась согласно Kljun et al. (2004). Итоговая обработка экспериментальных данных и частичная визуализация выполнена в программном комплексе Tovi.

Сравнение динамик плотности сокодвижения для деревьев вида сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) и липа мелколистная (*Tilia cordata*) и эвапотранспирации на уровне экосистемы, измеренных по методу турбулентных пульсаций, показывает их большое сходство. Наблюдаются стабильные значения с июля до середины августа. Наименьшие значения наблюдаются с середины августа и до середины сентября, характеризующиеся аномальными всплесками со второй половины сентября до конца наблюдений в середине октября.

Интересно, что интенсивность сокодвижения у сосны была ниже, чем у липы, что, возможно, является еще одним доказательством нашего предположения о том, что всплески транспирации и эвапотранспирации в конце вегетационного сезона связаны неконтролируемым выбросом паров воды у отмирающих листьев при дефолиации (рис. 4.1.1).

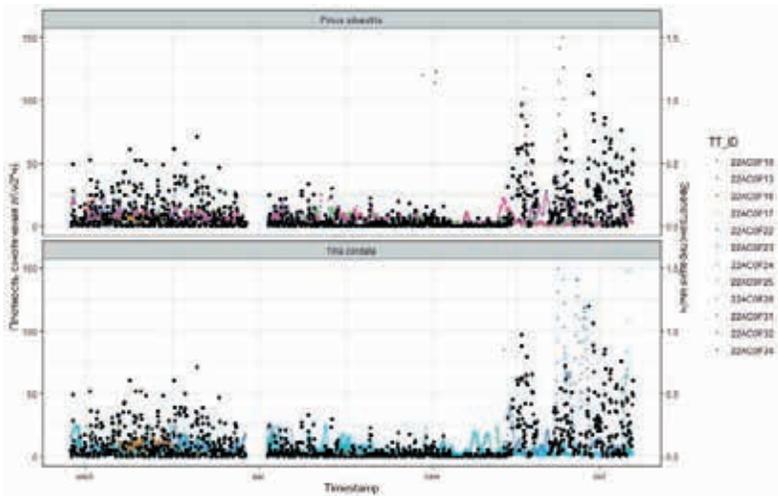


Рис.4.1.1. Динамика плотности сокодвижения деревьев вида сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) и липа сердцевидная (*Tilia cordata*), расположенных вокруг скважины 8, и значения эвапотранспирации на уровне экосистемы, измеренные по методу турбулентных пульсаций (черные точки)

Общая эвапотранспирация по данным метода турбулентных пульсаций заметно увеличивается к осенним месяцам. Предполагаем, что в летние месяцы, когда на деревьях присутствует много листвы, пар от поверхности почвы не полностью уходит в атмосферу, а частично задерживается пологом леса (как механически, так и физико-химически, например, адсорбцией фитомассы). И только осенью, с усилением ветров и увеличением интенсивности листопада, начинается более адекватное отражение наземной эвапотранспирации.

Данные с учетных площадок позволили рассчитать транспирацию на уровне территории по данным TreeTalker и сравнить ее с эвапотранспирацией, полученной по методу турбулентных пульсаций (рис. 4.1.2).

Очевидно, что динамика транспирации не будет отличаться от динамики плотности сокодвижения, меж тем, если посмотреть на абсолютные значения параметров, мы можем обнаружить, что к середине августа (225 день) транспирация значительно превышала значения эвапотранспирации, что безусловно является ошибкой. Причиной ее, как нам кажется, является переоценка вклада доминирующих пород в общую транспирацию в результате исключения из расчета формулы древостоя деревьев клена остролистного.

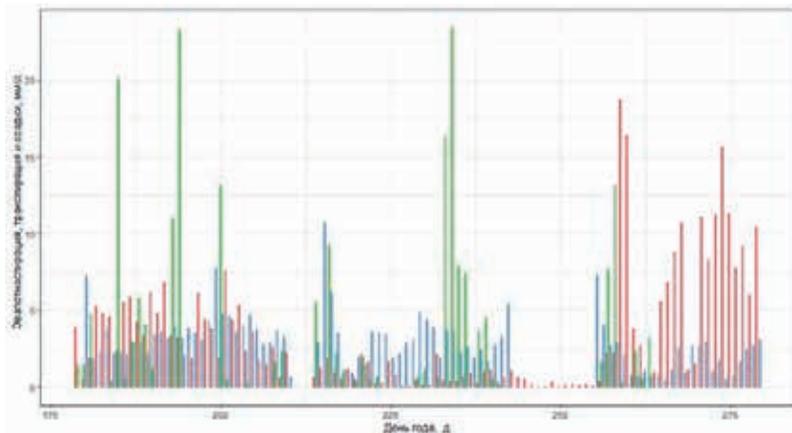


Рис. 4.1.2. Суточные значения эвапотранспирации (красный) по данным метода турбулентных пульсаций, осадков (синий) и транспирации (зеленый)

Несмотря на явную переоценку абсолютных значений транспирации, предложенная методика может быть использована для грубой оценки общей динамики и абсолютных значений эвапотранспирации на уровне экосистемы. Последнее хорошо видно по кумулятам эвапотранспирации, транспирации и осадков для изучаемого участка (рис. 4.1.2).

Проведенный мониторинг динамики сокодвижения с помощью экспериментального оборудования TreeTalker выявил высокую пространственную и временную (как сезонную, так и дневную) неоднородность скорости сокодвижения деревьев, связанную с видовой принадлежностью и доступностью влаги. Расчет эвапотранспирации территории с помощью метода турбулентных пульсаций составил от 0,5 до 1,2 мм/ч.

Предложенный метод оценки транспирации древостоя городского лесопарка по данным распределенной сети устройств TreeTalker, показал сходную динамику и абсолютные значения с данными по эвапотранспирации, полученными методом турбулентных пульсаций.

### Список использованной литературы

1. *Наумов В.Д.* 145 лет Лесной опытной даче РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева: учебное пособие / В.Д. Наумов, Наумов В.Д., Поляков А.Н. – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2009. – 511 с.
2. *Тихонова М.В. и др.* Экологическая оценка пространственно-временной изменчивости почвенной эмиссии N<sub>2</sub>O на лесном участке природного заказника «Петровско-Разумовское» // Вестник РУДН. Серия: Агронимия и животноводство. – 2013. – №. 5. – С. 93-104.
3. *Яшин И.М., Васенев И.И., Гареева И.Е., Рамазанов С.Р.* // Экологический мониторинг, моделирование и проектирование в условиях природных, городских и агроэкосистем (Москва, 1–11 июля 2015 г.) / Под общ. ред. И.И. Васенева, Р. Валентини. – М.: Скрипта Манент, 2015. – С. 7–35.
4. *Baldocchi D.D.* (2020) How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology // *Global Change Biology*, 26, 242–260. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14807>
5. *Do F., Rocheteau A.* (2002) Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies // *Tree Physiology* 22, 641–648.

6. Fisher J.B., Melton F., Middleton E., Hain C., Anderson M., Allen R., Wood E.F. (2017). The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources: The future of evapotranspiration // *Water Resources Research*, 53(4), 2618–2626. – DOI: <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>

7. Jin Y., Liu Y., Liu J., Zhang X. (2022) Energy Balance Closure Problem over a Tropical Seasonal Rainforest in Xishuangbanna // South-west China: Role of Latent Heat Flux. *Water*, 14, 395. – DOI: <https://doi.org/10.3390/w14030395>

8. Nelson J.A., Carvalhais N., Cuntz M., Delpierre N., Knauer J., Ogé J., & Jung, M. (2018). Coupling water and carbon fluxes to constrain estimates of transpiration: The TEA algorithm // *Journal of Geophysical Research. Biogeosciences*, 123, 3617–3632. – DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JG004727>

9. Nelson J.A., Pérez-Priego O., Zhou S., et al. 2020, Ecosystem transpiration and evaporation: Insights from three water flux partitioning methods across FLUXNET sites. *Glob Change Biol*, 00:1–15. – DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15314>

10. Riccardo V., Luca B.M., Damiano G. [at al]. (2019) New tree monitoring systems: from Industry 4.0 to Nature 4.0 // *Annals of Silvicultural Research*, № 4. — С. 84-88.

11. Schlesinger W.H., Jasechko S. (2014) Transpiration in the global water cycle // *Agricultural and Forest Meteorology*, 189–190, 115–117. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrfo.rmet.2014.01.011>

## Verification by eddy covariance method of transpiration according to IoT monitoring of forest plantations

*Александров Н.А., Серёгин И.А., Ярославцев А.М.*

**Abstract:** The assessment of stand transpiration was verified using the developed IoT environmental monitoring devices using the eddy covariance method. The monitoring of the dynamics of sap movement using TreeTalker revealed a high spatial and temporal heterogeneity in the rate of sap movement of trees associated with species and moisture availability. The proposed method for estimating the transpiration of a stand of an urban forest park using data from a distributed network of IoT devices showed similar dynamics and absolute values with evapotranspiration data obtained by the eddy covariance method.

## 4.2. Агроэкологическая оценка потенциала использования старопахотных земель с применением IT-технологий на основе системы поддержки принятия решений

*Бузылёв А.В., Александров Н.А., Тихонова М.В.*

**Аннотация:** Рассмотрено применение системы поддержки принятия решений (СППР) «РАСКАЗ» для автоматизированной агроэкологической оценки старопахотных земель в сопоставлении с агроэкологической классификацией почвенного покрова на основе стандартных агрохимических характеристик. Результаты показывают рациональность применения СППР, а также повышенный агроэкологический потенциал анализируемого старопахотного поля. Расчеты позволили выявить лимитирующие почвенно-экологические параметры, такие как недостаточное содержание подвижных форм фосфора и плотность пахотного горизонта почвы, а также рассчитать почвенно-экологический бонитет как для всего поля, так и по регулярной гектарной сетке. Исследование проведено в 2017-2023 гг. на товарном поле АО «Башмаковский хлеб» Башмаковского района Пензенской области.

Повсеместное внедрение цифрового сельского хозяйства имеет ряд преимуществ, включая возможность повышения урожайности, улучшение управления сельскохозяйственными рисками и как следствие, укрепление общей продовольственной безопасности страны в результате внедрения технологий автоматизированных систем поддержки принятия решений на основе применения больших данных и облачных расчетов.

Помимо перечисленного, цифровизация сельского хозяйства помогает сократить затраты, предполагает повышение качества продукции с повышением производительности труда, способствуя устойчивому развитию и сохранению окружающей среды за счет предварительного моделирования процессов с целью оптимизации применения технологических и агрохимических приемов и операций [Васенев и др., 2022].

Одним из направлений, цифровизация которого в сельском хозяйстве может произойти в кратчайшие сроки является агро-

экологическая оценка земель, основанная на анализе физико-химических свойств почвенного покрова с учетом степени эродированности и загрязненности поллютантами анализируемой территории.

Несмотря на актуальность применения цифровых решений, до сих пор рынок программного обеспечения оценочных систем на территории нашей страны не развит и представлен преимущественно единичными разработками [Серегин и др., 2022], идеология которых была заложена в начале 2000-х годов и алгоритмами – дополнениями к ГИС, а чаще просто расчетными формулами [Васенев и др., 2021].

Авторами рассматривается возможность применения СППР «РАСКАЗ» для автоматизированной агроэкологической оценки старопахотных земель, проводимой в сравнении с классической агрохимической оценкой качества почвенного покрова на основе макроэлементной обеспеченности земель, кислотности и содержания органического вещества.

**Цель работы** – рассмотрение возможности применения рачмочной системы Региональной агроэкологической оценки земель к типовым условиям старопахотных территорий на выщелоченных черноземах Пензенской области.

**Методика.** Исследования проводили в 2017-2023 гг. на территории товарного поля М-12 АО «Башмаковский хлеб», Башмаковского района Пензенской области. Поле площадью 100 га представлено мощными гумусными тяжелосуглинистыми выщелоченными черноземами на моренных суглинках и является вершиной плоского водораздела. Экспозиция склона – южная, уклон равномерный, пологий до 2°. Наблюдается повышенная пространственная неоднородность форм микрорельефа, представленных формами суффозионных процессов – блюдцами и западинами. В юго-восточной оконечности поля присутствуют эрозионные процессы (рис. 4.2.1) на основе двух ложбин, являющихся частью гидрографической сети. Наблюдаются стоковые борозды и промоины. В северной части поля выявлены очаги вымокания посевов, связанные с характером внутритпочвенного стока и процессами глееобразования.

Территория поля была разбита на регулярную стометровую сеть опробывания с отбором образцов из узловых точек сети.

Отбор проб осуществляли 1 раз в год после уборки сельскохозяйственных культур до основного удобрения почвы.

На базе лаборатории ЛАМП РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева по стандартным методикам ЦИНАО определялись: азот аммонийный, азот нитритный, калий обменный, фосфор подвижный, сера общая, С-органическое, гидролитическая кислотность,  $pH_{H_2O}$ ,  $pH_{KCl}$ . Непосредственно в поле определяли плотность почвы методом пенетрации стрелочным пенетрометром Eijkelkamp.

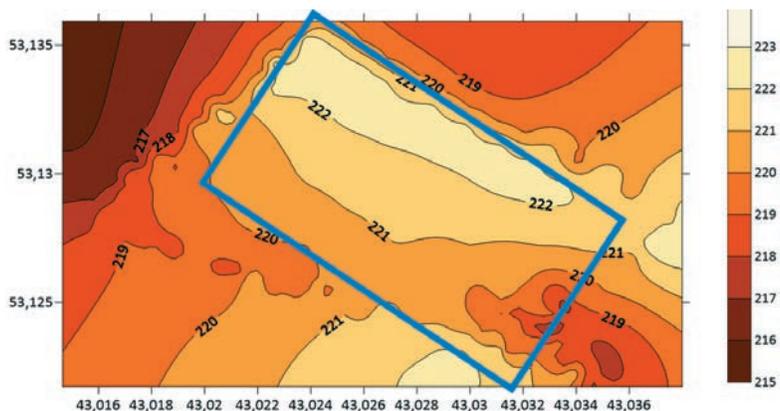


Рис. 4.2.1. Цифровая модель рельефа поля М-12 АО «Башмаковский хлеб»

Данные, полученные в результате анализов, статистически обрабатывали базовыми возможностями MS Excel. Распределение данных визуализировалось GS Surfer в виде картосхем со сглаживанием методом кригинга.

Применение Региональной системы комплексной агроэкологической оценки земель для повышения точности общей оценки и избавления от «пестроты» полученных результатов требовало сокращения количества точек и расширения набора оцениваемых параметров. В результате предварительной адаптации данных поле было разбито на 10 анализируемых участков с 10 точками опробывания на каждом.

Количество оцениваемых параметров было увеличено на основе использования данных агрохимического обследования ФГБУ ГЦАС «Пензенский», проходившего в 2017 г. и вклю-

чавшего исследуемое поле. Заимствованные данные использовались однократно для формирования базы данных средних почвенных значений с целью построения модели зависимостей при сопоставлении с оптимальными, критическими и текущими параметрами почвенного покрова.

Для заполнения базы данных агроэкологических параметров анализируемого поля из Агрохимического паспорта были использованы: гранулометрический состав почвы, азот общий, сумма поглощенных оснований, степень насыщенности основаниями, основания, микроэлементы и тяжелые металлы (Ca, Mg, B, Cu, Zn, Mo, Pb, Cd, Hg, As).

**Результаты.** Разработанная база данных позволила провести предварительную группировку почв [Савич и др., 2023] по обеспеченности основными питательными элементами и дополнительными агроэкологическими параметрами (табл. 4.2.1).

Обеспеченность почв рассчитывали на основе среднесуточных значений, полученных при проведении авторским коллективом мониторинговых исследований 2017-2022 гг. с учетом ежегодного варьирования показателей ( $\pm\%$ ). Установлено, что 51% пахотного горизонта почвенного покрова исследуемого поля относится к территории с высоким содержанием гумуса [Бородина и др., 2022] и всего 10% можно отнести с низким.

Таблица 4.2.1. Обеспеченность пахотного горизонта органическим веществом и макроэлементами

Группа	Органическое вещество, %			Азот аммонийный, мг/кг			Фосфор подвижный, мг/кг			Калий обменный, мг/кг			
	min	max	%	min	max	%	min	max	%	min	max	%	га
Очень низкая	0	2	0	0	10	4 $\pm$ 1	0	20	50 $\pm$ 4	0	20	0	0
Низкая	2,1	4	10 $\pm$ 1	11	15	23 $\pm$ 4	21	50	49 $\pm$ 6	21	40	0	0
Средняя	4,1	6	13 $\pm$ 2	16	20	73 $\pm$ 4	51	100	1 $\pm$ 3	41	80	0	0 $\pm$ 1
Повышенная	6,1	8	25 $\pm$ 4	21	25	0 $\pm$ 1	101	150	0 $\pm$ 1	81	120	19	19 $\pm$ 4
Высокая	8,1	10	51 $\pm$ 4	26	30	0	151	200	0	121	180	72	72 $\pm$ 4
Очень высокая	10,1	$\geq$	10 $\pm$ 3	31	$\geq$	0	201	$\geq$	0	181	$\geq$	9	9 $\pm$ 3

Большая часть анализируемой территории по обеспеченности аммонийным азотом (73%) характеризуется как среднеобеспеченная при наличии 25% низко- и очень низкообеспеченных почв, расположенных преимущественно на эродированных участках.

Группировка почв по содержанию подвижных форм фосфора показала равномерное распределение территории между низким и очень низким содержанием макроэлемента. Обменные формы калия содержатся в пахотном горизонте в значительном объеме и 72% территории характеризуется как высокообеспеченные калием.

Оценка кислотности почв показала общую (94%) слабокислую реакцию среды (рН 5,1-5,5) без временного варьирования показателя, что является характерным для выщелоченных черноземов Пензенской области.

На следующем этапе комплексную агроэкологическую оценку потенциала использования почв проводили с применением вычислительных возможностей модернизированной СППР «РАСКАЗ», предварительно районированной к условиям Пензенской области.

Детальные характеристики по 36 параметрам выделенных на первоначальном этапе участков оценки поля заносили в банк текущих почвенных характеристик (рис. 4.2.2), который на основе матриц значимости параметров сверяли программой с эталонными значениями, характерными для выщелоченных черноземов, а также районированной базой данных средних значений почвенных характеристик региона исследования.

Автоматизированные расчеты позволили детально оценить пестроту параметров почвенного плодородия, выделить основные диагностические и лимитирующие параметры, распределенные территориально и дополнительно классифицированные по шести группам оценки: общая продуктивность земель, физические почвенные условия, пространственная однородность территории, физико-химические требования к мелиорации, естественная устойчивость почв к загрязнению и общее санитарно-экологическое состояние земель (рис. 4.3.3).

4. Экологический мониторинг и оценка эмиссии парниковых газов в условиях наземных экосистем

Бланк ввода текущих значений почвенных характеристик

1. Регион: Приволжский Федеральн... 2. Область: Пензенская

3. Район: Башмаковский 4. Хозяйство: М12

5. Дата: 01.05.2022 6. Кол. во проб: 4

7. Площадь участка: 25 9. Площадь средне эрод. почв: 0

8. Площадь слабо эрод. почв: 0.5 10. Площадь сильно эрод. почв: 0

№	Параметр:	Ед.изм.	Контур № 1	Контур № 2	Контур № 3	Контур № 4
	Площадь:	га	6,25	6,25	6,25	6,25
	Длина границ:	км	3,162	3,162	3,162	3,162
	Тип почвы:		черноземы выщелочные	черноземы выщелочные	черноземы выщелочные	черноземы выщелочные
1.	pH	ед.	5,38	5,35	5,35	5,39
2.	P подвижный	мг/кг	24,15	19,71	18,8	20,72
3.	K обменный	мг/кг	148,8	140,1	144,4	125,1
4.	N щелочно-гидролизный	мг/кг	134,23	128,15	134,6	131,58
5.	Mn подвижный	мг/кг	6,8	6,9	6,9	6,9
6.	Zn подвижный	мг/кг	0,32	0,37	0,35	0,35
7.	Cu подвижный	мг/кг	-	-	-	-
8.	Физическая глина	%	57	54	55	54
9.	Сушиа агрегатов	%	58	56	55	55
10.	Плотность сложения	г/см <sup>3</sup>	1,25	1,24	1,24	1,24
11.	Щелочной активн-ть	%	-	-	-	-
12.	Физический песок	%	40	42	42	44
13.	Каменность	м <sup>3</sup> /га	0	2	0	0
14.	Обменные основания	мэкв/кг	316	318	312	321
15.	Гидролитич.кислоты.	мэкв/кг	0,14	7,27	6,2	6,84
16.	Na обменный	%	0,05	0,05	0,05	0,05
17.	Гумус	%	7,91	7,95	7,97	7,6
18.	Мощность горизонт. А1 (АВ)	см	76	77	74	77
19.	Степень эродированности	град.	0	0	0	0
20.	Степень оглеения	град.	0	0	0	0
21.	Соляная экстрактивные	%	0,03	0,03	0,03	0,03
22.	Засорённость	шт./м <sup>2</sup>	0	12	9	6
23.	Запас гумуса в 50 см	т/га	269	250	199	221
24.	Ct валовой	мг/кг	-	-	-	-
25.	Pb валовой	мг/кг	10,65	10,62	10,62	10,67
26.	Ni валовой	мг/кг	-	-	-	-
27.	Cu валовой	мг/кг	-	-	-	-
28.	Zn валовой	мг/кг	0,31	0,31	0,35	0,27
29.	Сd валовой	мг/кг	0,41	0,41	0,4	0,39
30.	Нитраты	мг/кг	12,4	12,1	12	12,4
31.	Фитотоксичность (по проросткам)	к фону	-	-	-	-
32.	Сод - типр	-	-	-	-	-
33.	Радиоакт. загр. (Cs-137)	Ки/км <sup>2</sup>	-	-	-	-
34.	Емкость поглощения	мэкв/кг	46	45	47	46
35.	Степень насыщенности	%	85	85,4	86	85,2
36.	S	мг/кг	7,02	11,50	10,19	6,25
37.	В общий	мг/кг	2,3	2,3	2,3	2,4
38.	As валовой	мг/кг	2,1	2,1	2,1	2,1
39.	Св	мэкв/кг	25,35	25,37	25,35	26
40.	Mg	мэкв/кг	5,39	5,42	5,47	5,52

Создать Изменить Сохранить Удалить Отмена Закрыть

Рис. 4.2.2. Частичное представление базы данных текущих почвенных характеристик

Анализ поля

Результаты анализа текущего агроэкологического состояния сельскохозяйственных земель выдела

Область: Приволжский Федеральный Округ Район: Пензенская  
 Хозяйство: Башмаковский Поле: М12  
 Число точек пробоотбора N = 4  
 Тип почвы 1-й точки пробоотбора - черноземы выщелочные  
 Тип почвы 2-й точки пробоотбора - черноземы выщелочные  
 Тип почвы 3-й точки пробоотбора - черноземы выщелочные  
 Тип почвы 4-й точки пробоотбора - черноземы выщелочные  
 Почвенно-экологический бонитет поля SAB = 79,5  
 Агроэкологическое состояние земли - хорошее

№	Параметр:	Название:	значение	буферность
A.	Продуктивность земли	низкая	0,290	
	лимитирующий	P подвижный	0,44	0,51
	неустойчивый	P подвижный	0,44	0,51
B.	Условия обработки	оч. хорошие	0,990	
	лимитирующий	нет	-	-
	неустойчивый	Плотность сложения	0,93	0,78
C.	Пространственная однородность	однородные	1,000	
	лимитирующий	K обменный	0,92	
D.	Требования к мелиорации	не требуется	1,000	
	лимитирующий	нет	-	-
	неустойчивый	нет	-	-
E.	Устойчивость к загрязнению	высокая	0,970	
	лимитирующий	Ёмкость поглощения	0,75	0,35
	неустойчивый	Ёмкость поглощения	0,75	0,35
F.	Санитарно-экологическое состояние	благополучное	1,000	
	лимитирующий	нет	-	-
	неустойчивый	нет	-	-

1 [↑/↓] Оценки Закрыть

Рис. 4.2.3. Общий вид результата анализа комплексного агроэкологического состояния одного из участков поля

Общее агроэкологическое состояние всей территории анализируемого старопашотного поля оценено как «Хорошее» с почвенно-экологическим бонитетом выщелоченных черноземов SAB  $80 \pm 2$  баллов. Минимальный балл бонитета SAB 78 выявлен на участке эродированных почв в южной оконечности поля на пяти точках опробования из 100. Среднему баллу бонитета соответствовало 79% обследованной территории. Наиболее высокий балл SAB 82 набрали почвы вершины водораздельного холма южной части поля.

Продуктивность земель оценивали по содержанию в пахотном горизонте макро- и микроэлементов, а также Сорг и

мощности гумусового слоя. Оценка продуктивности полностью коррелировала с почвенно-экологическим бонитетом поля ( $K 0,89 \pm 0,12$ ) и позволила выявить группу лимитирующих и неустойчивых (основных диагностических) параметров.

Так, на почвах с максимальным SAV при отсутствии лимитирующего параметра неустойчивым было содержание обменных форм калия, оценка обеспеченности с применением СППР составила 0,92, что соответствует 92% от нормативного содержания для выщелоченных черноземов региона исследования [Морев и др., 2018]. Продуктивность 68% преимущественно центральной части поля лимитировалась содержанием подвижных форм фосфора (СППР –  $0,4 \pm 0,05$ ), неустойчивым был выделен тот же P подвижный. В единичных случаях на 5% от общей площади поля неустойчивым фактором продуктивности программой выделялся Mn подвижный (СППР –  $0,8 \pm 0,1$ ).

Условия обработки поля оцениваются как «Хорошие» с повсеместно выделенным неустойчивым фактором – плотность почвы (СППР –  $0,9 \pm 0,07$ ). В эродированной северной части поля плотность почвы дополнительно определяется как лимитирующий фактор (СППР –  $0,65 \pm 0,04$ ).

Пространственная однородность территории системой комплексной агроэкологической оценки была классифицирована как «Однородная» с лимитирующим параметром – K обменный (СППР –  $0,9 \pm 0,05$ ). Требования к мелиорации выявлены не были.

Устойчивость территории поля к загрязнению [Савоськина и др., 2022] с применением СППР «РАСКАЗ» оценена как «Высокая» с лимитированием на 62% территории в центральной и южной эродированной частях поля емкостью поглощения (СППР –  $0,77 \pm 0,03$ ). В южной оконечности поля был определен неустойчивый параметр, непосредственно влияющий на возможность загрязнения почв – плотность сложения (СППР  $0,93 \pm 0,02$ ). Санитарно-экологическое состояние территории анализируемого старопахотного поля оценивается как «Благополучное» без лимитирующих параметров.

Результаты исследования с применением СППР «РАСКАЗ» высоко коррелируют с проведенной классической типизацией территории и характеризуют потенциал использования старопахотного товарного поля как «Повышенный» (SAV  $80 \pm 2$ ) с

выделением общего лимитирующего параметра – фосфор подвижный, недостаток которого характерен для выщелоченных черноземов Башмаковского района Пензенской области.

Незначительный недостаток обменных форм калия, с учетом того, что выщелоченные черноземы района исследования изначально обладают высокой обеспеченностью данным элементом питания, и низкое содержание фосфора явно указывают на необходимость применения комплексных форм удобрений с целью поддержания положительного баланса питательных элементов в агроэкосистемах.

Неустойчивым параметром, требующим дополнительного внимания, указывается плотность сложения, связываемая автотрофами с постепенным закономерным обесструктурированием [Зинченко и др., 2022] и переуплотнением верхнего пахотного горизонта поля в результате проведения агротехнических операций по возделыванию сельскохозяйственных культур.

### Список использованной литературы

1. Цифровые технологии агроэкологического мониторинга и оптимизация земледелия / Под ред. И.И. Васенева. – М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022. – 240 с.

2. *Серегин И.А., Александров Н.А., Степанов А.В., Ярославцев А.М.* Применение системы ИОТ мониторинга для оценки ФАР / Аграрная наука – 2022: Материалы Всероссийской конференции молодых исследователей (Москва, 22-24 ноября 2022 г.). – М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 1003-1006.

3. *Васенев И.И., Ярославцев А.М., Валентини Р., Курашов М.Ю., Сильвестри М.* Развитие ИОТ систем агроэкологического мониторинга для поддержки принятия решений по оптимизации выбора сортов и агротехнологий // Доклады ТСХА: Сборник статей (Москва, 2-4 декабря 2020 г.). Вып. 293. Ч. IV. – М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. – С. 412-415.

4. *Савич В.И., Бородина К.С., Минаев Н.В.* Информационно-энергетическая оценка плодородия почв // АгроЭкоИнфо. – 2023. – № 3 (57). – DOI 10.51419/202133307.

5. *Бородина К.С., Минаев Н.В.* Предварительная оценка содержания гумуса и структурного состояния почв лесостепной зоны в условиях залежи // Материалы Международной научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 135-летию со дня

рождения А.Н. Костякова: сборник статей (Москва, 6-8 июня 2022 г.). Т. 1. – М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 342-345.

6. Морев Д.В. Агроэкологическая оценка внутрипольной пестроты почвенного покрова и ее влияние на урожайность сельскохозяйственных культур в условиях Центрального региона России // Здоровые почвы – гарант устойчивого развития: Сборник материалов научно-практической конференции с международным участием (Курск, 11 мая 2018 г.). – Курск: Курский государственный университет, 2018. – С. 16-20.

7. Савоськина О.А., Чебаненко С.И., Шитикова А.В., Константинович А.В., Заверткин И.А. Фитосанитарный мониторинг производственных посевов зерновых культур в условиях ЦЧЗ // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 6(54). – DOI 10.51419/202126625.

8. Зинченко С.И., Матюк Н.С., Мазиров М.А., Полин В.Д., Беленков А.И., Хохлов Н.Ф., Савоськина О.А., Николаев В.А., Заверткин И.А. Научные основы защиты почв от деградации. – Суздаль-Иваново: ПресСто; Верхневолжский федеральный аграрный научный центр, 2022. – 316 с.

## **Agroecological assessment of the old arable land use potential by IT technologies based on a decision support system**

*Buzylev A.V., Alexandrov N.A., Tikhonova M.V.*

**Abstract:** Presentation of use of a decision support system (DSS) for the purpose of automated agroecological assessment of old arable lands in comparison with the agroecological classification of soil cover based on standard agrochemical characteristics. The results show the rationality of using DSS, as well as the increased agroecological potential of the analyzed old arable field. Calculations made it possible to identify limiting soil-ecological parameters, such as insufficient content of mobile forms of phosphorus and the density of the arable soil horizon, as well as to calculate the soil-ecological quality rating both for the entire field and for a regular hectare grid. Research was conducted during 2017-2023 at special field of JSC «Bashmakovskiy khleb» in the Bashmakovskiy district of the Penza region.

### **4.3. Агроэкологические особенности содержания и распределения подвижной серы и меди в почвах ампелоценозов Южного берега Крыма и Автономного края Воеводина Республики Сербия**

*Андреева И.В., Габечая В.В.*

**Аннотация:** Представлены данные по валовому содержанию меди и содержанию подвижной серы в почве и их миграции по склону разновозрастных ампелоценозов Южного берега Крыма и Автономного края Воеводина Республики Сербия с разными системами земледельческого использования в результате длительного применения неорганических пестицидов. Выявлено достоверно более высокое накопление валовой меди и подвижной серы в верхних горизонтах почв как традиционных, так и органических хозяйств, что может стать причиной ухудшения качественных характеристик производимых виноматериалов и загрязнения сопредельных сред. Миграция изучаемых элементов от автономных к подчиненным элементарным ландшафтам наблюдалась в виноградниках обеих локаций, но с разной интенсивностью в зависимости от возраста виноградника, крутизны и формы склона, а также систем ведения куста и содержания междурядий.

Исследования последних лет подтвердили многофункциональную роль серы в успешном решении вопросов управления плодородием почв и продуктивностью сельскохозяйственных культур. По своему воздействию на физиологические и биохимические процессы растений данный элемент рассматривают в качестве макроэлемента наряду с азотом, фосфором и калием [Аристархов, 2016], хотя по содержанию в растениях серу относят к группе мезоэлементов (0,1–0,01% сухой массы) [Жуйков, 2020].

В научной литературе достаточно широко обсуждается вопрос дефицита серы в агроэкосистемах [Нортон, 2014; Аристархов, 2016; Жуйков, 2020], и очень мало внимания уделяется последствиям ее избытка. Между тем повсеместное и длительное применение серосодержащих пестицидов, в особенности, для обработки многолетних насаждений, нередко приводит к нако-

плению серы в верхних частях почвенного профиля [Hinckley, 2011] и может оказывать токсическое воздействие на растения и почвенную микробиоту, наносить вред биоразнообразию и здоровью человека [Skura, 2023, Seralini, 2021].

С древних времен серу использовали в качестве природного инсектицида против паразитов, фунгицида для растений, консерванта для вина, бактерицида и антиоксиданта. Примерно с середины XX века серу, наряду с соединениями меди, применяют в качестве неорганического контактного фунгицида и акарицида низкого класса опасности в плантационно-садовых агроэкосистемах.

Так, различные препараты на основе серы используются для борьбы с наиболее распространенным во всем мире заболеванием винограда – оидиумом (возбудитель – *Uncinula necator* Витг. – сумчатая форма, или *Oidium tuckeri* Berk. – конидиальная форма), уровень потенциальных потерь урожая от которого наиболее высок в Южнобережной зоне виноделия Крыма [Борисенко и др., 2015].

Фунгитоксическое действие серы обусловлено ее липорастворимыми свойствами, благодаря которым она проникает в виде паров или путем диффузии через липидные мембраны в мицелий и споры гриба [Зинченко, 2005].

К преимуществам серы по сравнению с альтернативными органическими фунгицидами относят ее дешевизну, доступность, высокую эффективность, низкий риск развития резистентности, малотоксичность [Gikas, 2022]. По этим причинам в России и других странах мира допускают применение серы и препаратов на ее основе даже в органическом и биодинамическом виноградарстве [Vukosavljevic, 2016].

В соответствии с ГОСТ 33980-2016, в органических хозяйствах на территории Российской Федерации разрешены к применению полисульфид кальция (известковая сера) и элементарная сера, которые предписывается использовать только при непосредственной угрозе урожаю. В традиционном земледелии под разными торговыми названиями применяют препаративные формы серы в виде водно-диспергируемых гранул (*Тиовит Джет*, *Кумулус ДФ*, *Виташанс*), концентрата суспензии (*Сера 400*), суспензионного концентрата (*Флосул*).

Широкое применение серосодержащие пестициды нашли и в Европейских странах. По данным Евростата (2022), в 2020 году на долю неорганических фунгицидов, содержащих медь и неорганическую серу, приходилось почти 57% от общего объема продаж фунгицидов и бактерицидов в европейских странах. Также ее применяют и в составе некоторых гербицидов. Согласно базе данных пестицидов Европейского Союза (EU Pesticides Database, доступно [https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database\\_en](https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en), дата обращения 20.06.2023 г.), в качестве примера разрешенных к применению серосодержащих пестицидов можно назвать препараты со следующими активными веществами: сульфосульфурон, сульфоксафлор, сульфурил фторид, полисульфид кальция.

Поступление серы в почву с пестицидами и агрохимикатами сопровождается ее активным включением в природные водные и биогеохимические миграционные потоки, процессы многообразной трансформации, что изменяет ее химическую форму, характер и длительность депонирования, подвижность и биодоступность [Нортон и др., 2014; Маслова, 2008]. До 98% серы от ее валового содержания находится в почве в органической форме в составе растительных остатков и гумуса и представлено разными комплексными органическими соединениями (например, сульфатными эфирами).

Сера в составе органических соединений не доступна для поглощения корнями растений. Биодоступность элемента обеспечивается процессами минерализации его органических соединений до сульфатных форм с участием почвенных микроорганизмов. Поэтому биомасса и активность почвенного микробоценоза выступают ключевыми факторами, регулирующими обратимые процессы превращения органической серы в неорганический сульфат, и играют исключительно важную роль в биогеохимическом круговороте серы и ее биодоступности [Blum et al., 2013; Xu et al., 2016].

Биогеохимический цикл серы довольно сложен, зависит от множества биотических и абиотических факторов, однако большинство исследователей сходятся в том, что наиболее важными из них являются климат и практикуемые агротехнологии. В частности, особенности применяемых технологий культивирования

винограда, а также региональные климатические условия могут существенно изменить баланс серы в почвах ампелоценозов.

Подвижность сульфатной формы серы, которая образуется в результате окисления элементарной серы при ее внесении в качестве пестицида, во многом зависит от водного режима почвы. В случае выращивания винограда в засушливых условиях и без орошения внесенная сера накапливается в поверхностном слое почвы виноградника вплоть до наступления дождливого сезона.

При высокой влажности почвы сульфаты насыщают почвенный раствор и приобретают способность мигрировать, что представляет определенный экологический риск для качества поверхностных и грунтовых вод, особенно при размещении виноградников на склоновых формах рельефа [Hinckley, 2008]. Оптимальное сочетание температуры и влажности, а также некоторые агротехнические приемы, в особенности, внесение органических удобрений, повышают активность почвенной микробиоты, ускоряют минерализацию органического вещества, что способствует увеличению содержания подвижной серы в почве.

Крайне недостаточное число работ как в России, так и за рубежом, посвященных количественной оценке накопления и миграции подвижной серы в почвах ампелоценозов, возделываемых по разным агротехнологиям и расположенных на склоновых землях, предопределило тематику представленных в данной работе исследований. Цель исследований, проведенных в условиях Южного берега Крыма, состояла в агроэкологической оценке содержания подвижной серы в почвах с органической и традиционной системами землепользования, а также в залежных почвах после длительного возделывания винограда с применением химической системы защиты растений.

Цель исследований, проведенных в условиях Автономного края Воеводина Республики Сербия, состояла в эколого-геохимической оценке латерального распределения подвижной серы в транзитном ландшафте склонов различной экспозиции и крутизны под разновозрастными виноградниками на примере исторического винодельческого региона вокруг Национального парка Фрушка Гора.

#### 4.3.1 Агроэкологические особенности объектов и методы исследования в условиях Республики Крым

Исследования проводились в Севастопольском районе Республики Крым. Объектами исследования выступили коричневые легкоглинистые почвы четырнадцати винодельческих хозяйств с органической (шесть хозяйств, сертифицированные по ГОСТ 33980-2016) и традиционной (пять хозяйств, применяющие химические средства защиты винограда) системами землепользования. Также были исследованы залежные почвы в бывших винодельческих хозяйствах, ранее длительно применявших традиционные агротехнологии. Расположение хозяйств, в которых отбирались почвенные пробы, представлено на рисунке 4.3.1.

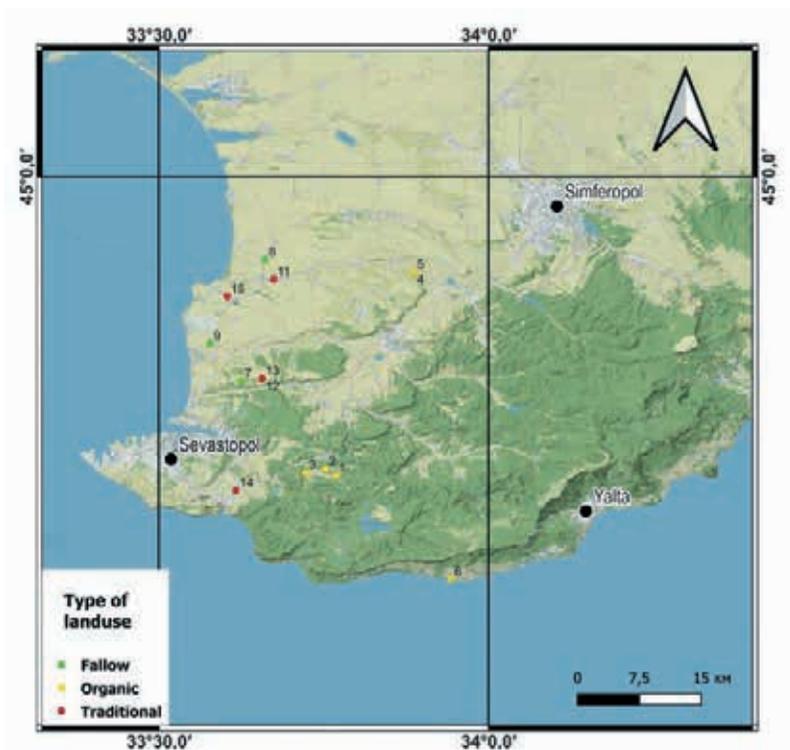


Рис. 4.3.1. Расположение исследуемых винодельческих хозяйств

В соответствии с классификацией Кёппена, климатические условия Севастопольской зоны виноделия субтропические, средиземноморского типа с умеренно жарким засушливым летом и мягкой зимой с частыми оттепелями (рис. 4.3.2). Месячные суммы осадков осенне-зимнего периода существенно выше их среднегодовых значений, а весенне-летнего – значительно ниже средних величин (рис. 4.3.3).

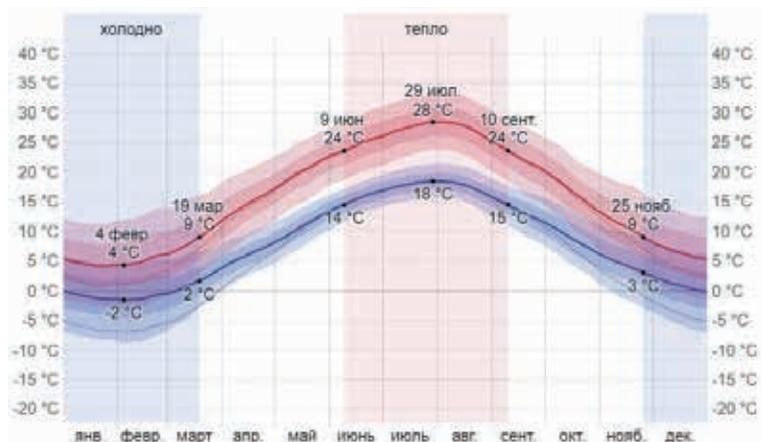
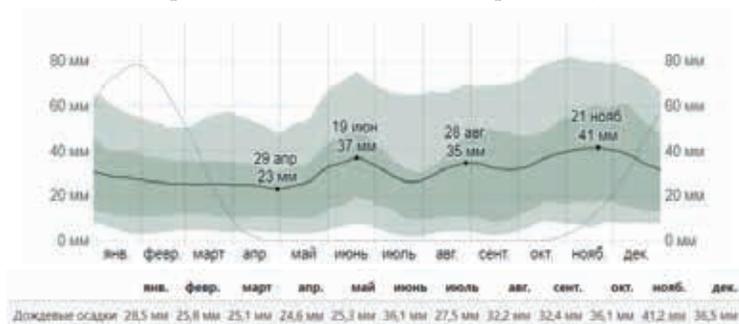


Рис. 4.3.2. Средняя максимальная и минимальная температура в районе Севастополя (*WeatherSpark.com*)



Среднее количество дождевых осадков (сплошная линия), накопленное в течение скользящего 31-дневного периода с центром в рассматриваемый день, с диапазонами 25-75 и 10-90 процентилей. Тонкая пунктирная линия – соответствующее среднее количество снеговых осадков.

Рис. 4.3.3. Среднемесячное количество осадков в районе Севастополя (*WeatherSpark.com*)

В этой связи количество осадков выступает в качестве лимитирующего экологического фактора для выращивания полевых сельскохозяйственных культур, устойчивые урожаи которых без орошения получить невозможно. Однако агроклиматические и почвенные условия региона благоприятствуют развитию виноградарства и виноделия.

Отбор точечных почвенных проб производили почвенным буром с глубины 0-10 и 10-20 см в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017, получали объединенную пробу. Пробоподготовку отобранных почвенных проб выполняли в соответствии с ГОСТ ISO 11464-2015. Определение pH проводили по ГОСТ 26423-85 с использованием pH-метра Mettler Toledo SevenCompact s220, содержания органического вещества – по ГОСТ 26213-91 с использованием спектрофотометра Leki UV2107, содержания подвижных соединений фосфора и калия – по методу Мачигина в соответствии с ГОСТ 26205-91, содержания подвижной серы – по ГОСТ 26490-85 с использованием соответственно спектрофотометра Leki UV2107 и пламенного фотометра ФПА-2-01.

Определение базального дыхания (БД) проводили в соответствии с CEN EN ISO 16072-2011 Soil quality – Laboratory methods for determination of microbial soil respiration (ISO 16072:2002). После инкубации в виалах в течение 24 часов увлажненной дистиллированной водой почвы при температуре  $22 \pm 0,5^\circ\text{C}$  шприцем отбирали 10 мл воздуха и анализировали содержание в нем углекислого газа с использованием газового хроматографа «Хроматэк – Кристалл 5000.1». Скорость БД выражали в мкг  $\text{CO}_2\text{-C/g}$  почвы в час. Повторность пятикратная. Субстрат-индуцированное дыхание (СИД) определяли аналогичным способом, однако вместо дистиллированной воды почву увлажняли водным раствором глюкозы (10 мг/г почвы) и инкубировали 3,5 часа при температуре  $22 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Скорость СИД выражали в мкл  $\text{CO}_2/\text{г}$  почвы в час. Повторность пятикратная.

Статистическую обработку результатов исследований проводили с использованием программ RStudio и Statistica.

### 4.3.2 Агроэкологические особенности объектов и методы исследования в условиях Республики Сербия

Исследования проводились на частных виноградниках в юго-восточной и северо-восточной части горной гряды Фрушка гора на Среднедунайской возвышенности в Автономном крае Воеводина Республики Сербия (рис. 4.3.4). Климат региона исследования умеренно-континентальный с элементами субгумидного и мезотермического в отдельных локациях. Среднегодовая температура воздуха в районе исследования составляет  $11,8^{\circ}\text{C}$ , среднегодовое количество осадков – 764 мм.

Исследуемые хозяйства практикуют разные системы культивирования винограда: хозяйства у сельских поселений (с/п) Турско Брдо, Плавуля, Чушилово – традиционную шпалерно-рядовую систему ведения куста с задерненными междурядьями; промышленное винодельческое хозяйство вблизи с/п Липовац – интенсивную, включающую полную механизацию трудоемких процессов по уходу за растениями и культивацию междурядий, находящихся под черным паром; хозяйство вблизи с/п Черат – архаичную кустовую (штамбовую) систему ведения кустов винограда, равномерно распределенных по склону и обрабатываемых полностью вручную.



Рис. 4.3.4. Расположение региона исследования и винодельческих хозяйств (у сельских поселений: 1 – Турско Брдо; 2 – Плавуля; 3 – Чушилово; 4 – Липовац; 5 – Черат)

Объектами исследования выступили бурые лесные остаточ-но-карбонатные (Eutric Cambisols, FAO (1988), Naplic Cambisols Calcaric, WRB (2006)) почвы пяти винодельческих хозяйств, рас-

положенных в условиях склонового ландшафта различной протяженности, крутизны и экспозиции. Информация об особенностях расположения ампелоценозов в ландшафте, возрасте и сорте культивируемых насаждений представлена в таблице 4.3.1.

Отбор почвенных проб производили в пределах сопряженных автономных и транзитных ландшафтов склонов (по М.А. Глазовской [2002]): автономно-элювиального (верхняя  $A^3_1$ , средняя  $A^3_2$  и нижняя  $A^3_3$  части пологого склона надпойменной террасы), трансэлювиального (верхняя  $T^3_1$ , средняя  $T^3_2$ , ниже по склону  $T^3_3$  у с/п Плавуля части склона), и трансэлювиально-аккумулятивного (трансаккумулятивного) (нижняя  $T^{3a}$  часть склона) согласно схемам, представленным на рис. 4.3.5.

Таблица 4.3.1. Характеристика исследуемых ампелоценозов региона Фрушка гора

Виноградник				Склон		
Местоположение	Система ведения куста	Период культивирования, лет	Сорт	Экспозиция	Крутизна, град.	Протяженность, м
г. Ириг, с/п Турско Брдо	Вертикальная шпалера	Более 300	Итальянский Рислинг	Западная	4	36
г. Ириг, с/п Плавуля	Вертикальная шпалера	Более 300	Мерло	Южная	5	55
г. Сремски Карловци, с/п Чушилово	Вертикальная шпалера	Более 100	Мерло	Восточная	8	27
		15	Мерло	Северная	3	41
г. Сремски Карловци, с/п Липовац	Вертикальная шпалера	15	Мерло	Восточная	12	287
г. Сремски Карловци, с/п Черат	Кустовая (штамбовая)	Более 200	Сланкаменка (автохтонный)	Восточная	10	64

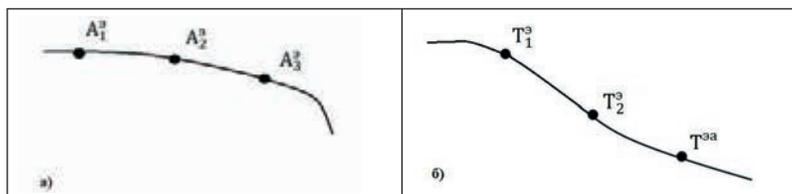


Рис. 4.3.5. Схемы расположения точек отбора проб почвы в автономном (а) и транзитном (б) ландшафте под виноградниками региона Фрушка Гора

Точечные почвенные пробы отбирали почвенным буром с глубины 0-5, 5-15 и 15-30 см в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017, из шести точечных проб получали объединенную пробу. Пробоподготовку отобранных почвенных проб выполняли в соответствии с ГОСТ ISO 11464-2015. Определение содержания подвижной серы проводили по ГОСТ 26490-85. Определение валового содержания меди в почве проводили атомно-абсорбционным методом согласно М-МВИ-80-2008 «Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложений методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии» (1М HNO<sub>3</sub> вытяжка) с использованием системы пробоподготовки Milestone ETHOS UP.

Коэффициент латеральной дифференциации L подвижной серы и меди в почве сопряженных элементов элювиального и трансэлювиального геохимического ландшафта определяли по формуле: (4.3.1)

$$L = \frac{Lx(\text{подч.})}{Lx(\text{авт.})}, \quad (4.3.1)$$

где Lx(подч.) – концентрация подвижной серы и меди в подчиненном элементарном геохимическом ландшафте (средней части склона A<sub>2</sub>, T<sub>2</sub> или нижней части склона A<sub>3</sub>, T<sub>3a</sub>);

Lx(авт.) – концентрация подвижной серы в верхней части склона элювиального A<sub>1</sub> и трансэлювиального T<sub>1</sub> геохимического ландшафта.

Статистическую обработку результатов исследований проводили с использованием программ RStudio и Statistica.

### 4.3.3 Влияние разных агротехнологий на содержание подвижной серы в почвах ампелоценозов Южного берега Крыма

Показатели рН, содержания органического вещества, подвижных фосфора, калия и серы, базального и субстрат-индуцированного дыхания в почвах винодельческих хозяйств Южного берега Крыма в зависимости от системы землепользования представлены в таблице 4.3.2.

Таблица 4.3.2. Показатели рН, содержания органического вещества (%), подвижных фосфора ( $P_2O_5$ , мг/кг), калия ( $K_2O$ , мг/кг), серы ( $S_{\text{подв}}$ , мг/кг), базального (БД, мкг  $CO_2-C$  г<sup>-1</sup> почвы·ч<sup>-1</sup>) и субстрат-индуцированного дыхания (СИД, мкл  $CO_2$  г<sup>-1</sup> почвы·ч<sup>-1</sup>) в почвах исследуемых хозяйств

Система земледель- зования	Номер хозяйства	Горизонт, см	pH <sub>водн.</sub>	Сорг	$P_2O_5$	$K_2O$	$S_{\text{подв}}$	БД	СИД
Органическая	1	0-10	7,52	1,48	84,77	521	28,1	0,59	9,05
		10-20	7,78	2,47	48,82	551	16,3	0,67	8,57
	2	0-10	7,23	3,64	33,56	539	29,2	1,07	9,10
		10-20	7,78	2,48	3,77	168	17,1	0,24	8,47
	3	0-10	6,52	2,28	14,56	428	10,7	0,74	22,65
		10-20	6,65	2,21	8,11	433	9,4	0,53	21,38
	4	0-10	7,85	2,78	14,25	478	13,7	0,74	15,58
		10-20	7,86	2,48	1,94	328	12,3	0,20	2,13
	5	0-10	7,18	3,48	43,77	521	10,6	1,50	19,89
		10-20	7,26	3,84	46,87	514	7,6	0,92	7,18
	6	0-10	7,21	1,93	31,42	359	37,8	0,25	8,31
		10-20	7,42	1,74	35,21	410	26,3	0,50	8,95
Залежь	7	0-10	8,26	3,31	29,02	511	6,4	0,45	2,03
		10-20	8,38	3,09	17,88	408	5,7	0,11	3,19
	8	0-10	8,19	3,64	50,00	475	3,6	0,21	3,10
		10-20	8,22	3,83	18,99	485	3,1	0,06	4,46
	9	0-10	8,25	3,17	10,68	556	7,8	0,29	1,98
		10-20	8,27	3,08	4,66	374	6,4	0,31	2,50
Традиционная	10	0-10	7,94	3,53	21,32	575	39,2	0,48	6,27
		10-20	7,85	3,41	17,59	475	4,7	0,10	3,87
	11	0-10	7,93	3,49	20,88	578	3,6	0,30	3,52
		10-20	8,06	3,28	11,52	547	3,4	0,18	7,52
	12	0-10	8,06	4,34	49,21	1109	2,1	0,21	2,11
		10-20	8,15	4,13	60,69	1152	2,1	0,13	3,04
	13	0-10	7,47	2,04	138,33	709	5,7	0,54	5,89
		10-20	7,56	1,96	57,35	729	4,2	0,09	4,85
	14	0-10	8,13	3,24	5,22	373	7,8	0,11	2,28
		10-20	8,19	3,19	6,05	431	7,4	0,33	2,13

Значения рН водной вытяжки в почвах исследуемых хозяйств находились в диапазоне от 7,18 до 8,38 ед. рН, что соответствует нейтральной – умеренно щелочной среде. Содержание органического вещества в верхней части почвенного профиля варьировало в широком диапазоне от 1,48 до 4,34% и снижалось в ряду: залежные почвы > почвы традиционных хозяйств > почвы органических хозяйств.

С увеличением глубины прослеживается тенденция к снижению содержания органического вещества, хотя имеются и исключения (хозяйства № 1, № 5, № 8). В очень широких пределах изменялось в исследуемых хозяйствах и содержание подвижного фосфора – от 3,8 до 138,3 мг  $P_2O_5$ /кг почвы, что соответствует классам обеспеченности данным элементом от I (очень низкой) до VI (очень высокой).

Содержание в почвах хозяйств подвижного калия соответствовало повышенной, высокой и очень высокой обеспеченности и варьировало в горизонте 0-10 см в диапазоне 359-1109 мг  $K_2O$ /кг почвы. Содержание подвижной серы ( $S_{\text{подв}}$ ) в почвах винодельческих хозяйств находилось в диапазоне от 2,1 до 39,2 мг/кг и, согласно критерию Краскела-Уоллиса, коррелировало с применяемой в хозяйствах системой землепользования (рис. 4.3.6).

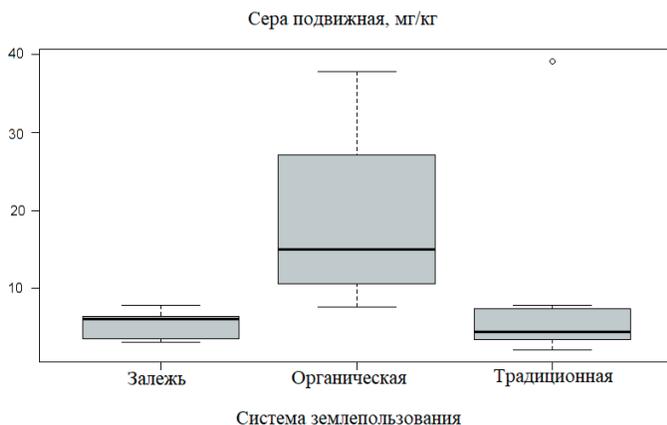


Рис. 4.3.6. Зависимость содержания подвижной серы (мг/кг) в почвах ампелоценозов Крыма от системы землепользования согласно критерию Краскела-Уоллиса ( $p = 0,07$ ).

Почвы органических хозяйств достоверно отличались более высокой обеспеченностью подвижной серой по сравнению с почвами традиционных хозяйств и залежи, которая составила в среднем 18,3 мг/кг против 8,0 и 5,5 мг/кг соответственно. Согласно классификации, которой руководствуется Росагрохимслужба, почвы традиционных хозяйств и залежи, за редким исключением, относились к группе с низким уровнем содержания подвижной серы (менее 6,0 мг/кг) или близким к нему. В почве хозяйств с органической системой землепользования среднее содержание серы составило 21,7 и 14,8 мг/кг на глубине 0-10 и 10-20 см соответственно, что в 1,8-3,4 и 2,9-3,7 раза выше по сравнению с почвами традиционных хозяйств и залежи.

Для выявления тенденций в изменении агрохимических показателей почв в зависимости от содержания  $S_{\text{подв}}$  исследованные хозяйства были разделены на группы с очень низким (менее 5 мг/кг), низким (5-10 мг/кг), средним (10-35 мг/кг) и высоким (более 35 мг/кг) уровнем содержания подвижной серы в горизонтах 0-10 и 10-20 см. В настоящей работе была использована группировка, принятая за рубежом [Аристархов, 2016], поскольку она охватывала широкий диапазон значений содержания  $S_{\text{подв}}$  в почве, установленный в исследованных винодельческих хозяйствах (табл. 4.3.3).

В группу с низким и очень низким содержанием подвижной серы в верхнем горизонте 0-10 см попали почвы залежи и традиционных хозяйств, со средним и высоким – почвы всех органических и одного традиционного хозяйства. Группировка выявила тенденцию к снижению средних значений рН с 8,1 до 7,3-7,6 ед. рН, содержания органического вещества с 3,8 до 2,7%, содержания подвижного калия с 721 до 467 мг/кг при увеличении среднего содержания подвижной серы с 3,1 до 38,5 мг/кг в горизонте 0-10 см.

В горизонте 10-20 см содержание  $S_{\text{подв}}$  было ниже, чем в верхнем, что отмечалось и в других исследованиях [Dad, 2021]. Преобладали почвы с очень низким и низким уровнем содержания элемента, в категорию с высоким уровнем содержания не попало ни одно хозяйство. Варьирование данного показателя было не таким широким, как в верхнем горизонте, и охватывало диапазон от 3,5 мг/кг в группе с низким содержанием элемента до 18,0 мг/кг в группе с его средним содержанием (табл. 4.3.4).

Таблица 4.3.3. Распределение средних значений агрохимических показателей и почвенного дыхания по группам в зависимости от содержания подвижной серы ( $S_{\text{подв}}$ ) в горизонте 0-10 см почв винодельческих хозяйств Южного берега Крыма

Номера хозяйств	Диапазоны содержания $S_{\text{подв}}$ , мг/кг	Уровень содержания $S_{\text{подв}}$	$S_{\text{подв}}$	$P_2O_5$	$K_2O$	pH	C орг	БД	СИД
			мг/кг			ед. рН	%	мкг $CO_2-C$ $г^{-1}/ч^{-1}$	мкл $CO_2$ $г^{-1}/ч^{-1}$
8, 11, 12	Менее 5	Очень низкий	3,1	40,0	721	8,1	3,8	0,24	2,91
7, 9, 13, 14	5-10	Низкий	6,9	45,8	537	8,0	2,9	0,35	3,05
1, 2, 3, 4, 5	10-35	Средний	18,5	39,0	497	7,3	2,7	0,81	14,69
6, 10	Более 35	Высокий	38,5	26,4	467	7,6	2,7	0,37	7,29

Таблица 4.3.4. Распределение средних значений агрохимических показателей и почвенного дыхания по группам в зависимости от содержания подвижной серы ( $S_{\text{подв}}$ ) в горизонте 10-20 см почв винодельческих хозяйств Южного берега Крыма

Номера хозяйств	Диапазоны содержания $S_{\text{подв}}$ , мг/кг	Уровень содержания $S_{\text{подв}}$	$S_{\text{подв}}$	$P_2O_5$	$K_2O$	pH	C орг	БД	СИД
			мг/кг			ед. рН	%	мкг $CO_2-C$ $г^{-1}/ч^{-1}$	мкл $CO_2$ $г^{-1}/ч^{-1}$
8, 10, 11, 12, 13	Менее 5	Очень низкий	3,5	33,2	678	8,0	3,3	0,11	4,75
3, 5, 7, 9, 14	5-10	Низкий	7,3	16,7	432	7,8	3,1	0,44	7,28
1, 2, 4, 6	10-35	Средний	18,0	22,4	364	7,7	2,3	0,40	7,03

В целом, тенденции, отмеченные для верхнего горизонта, сохранялись и на глубине 10-20 см. Так, с изменением уровня содержания подвижной серы от очень низкого к среднему показатель рН уменьшился с 8,0 до 7,7 ед. рН, содержание органического вещества – с 3,3 до 2,3%, содержание подвижных фосфора и калия соответственно с 33,2 до 16,7-22,4 и с 678 до 364 мг/кг. Следует отметить, что различия по группам рассмотренных показателей на глубине 10-20 см оказались не такими

контрастными, как в верхнем горизонте почв исследуемых амелоценозов.

Проведенный статистический анализ выявил наличие достоверной обратной корреляционной зависимости между уровнем содержания подвижной серы и содержанием органического вещества только в горизонтах 0-10 и 10-20 см залежных почв с коэффициентами корреляции соответственно -0,98 и -0,99 (рис. 4.3.7).

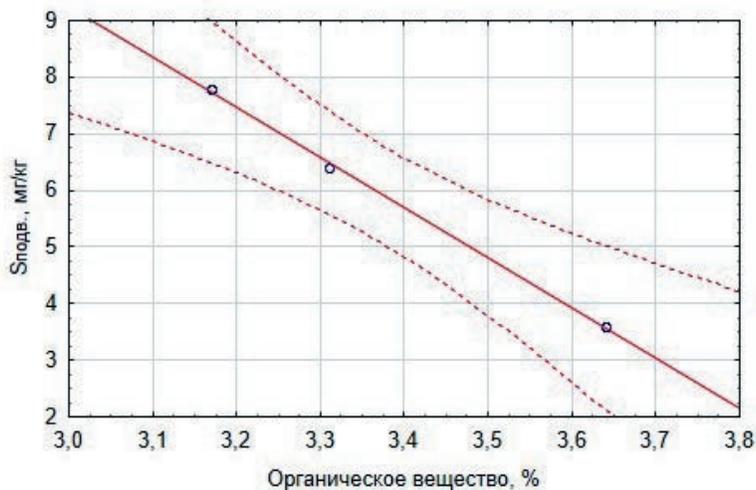


Рис. 4.3.7. Корреляционная зависимость между содержанием органического вещества и подвижной серы в залежных почвах (после виноградарства) на глубине 0-10 см ( $\alpha = 0,05$ ).

По данным, представленным в таблице 4.3.2, в почвах органических хозяйств средняя величина базального дыхания оказалась в 2,7 раза выше, чем традиционных хозяйств и залежи, что свидетельствует о благоприятном состоянии почвенного микробиома в первых. Это подтверждается еще более контрастными значениями субстрат-индуцированного дыхания, которые в верхнем горизонте почв органических хозяйств в 3,5 и 5,9 раза превышали аналогичный показатель для традиционных хозяйств и залежи.

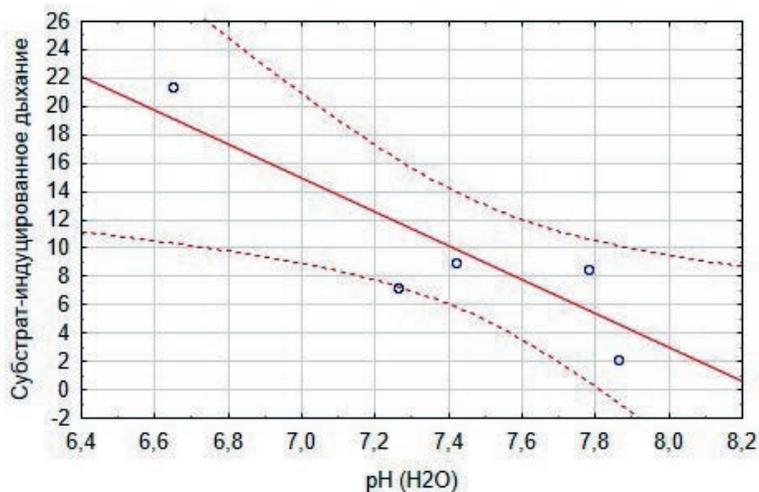


Рис. 4.3.8. Корреляционная зависимость между содержанием  $pH_{\text{водн}}$  (ед. рН) и субстрат-индуцированным дыханием (мкл  $CO_2/g$  почвы в час) в почвах органических хозяйств на глубине 10-20 см ( $\alpha = 0,05$ ).

Между средними значениями показателей субстрат-индуцированного дыхания и рН в почвах органических хозяйств (рис. 8) и залежи была выявлена достоверная обратная корреляционная зависимость с коэффициентами корреляции соответственно -0,87 и -0,99.

Следует обратить внимание на постепенное возрастание показателей дыхания почвы с увеличением уровня подвижной серы и достижение их максимальных значений в группе почв со средним уровнем ее содержания от 10 до 35 мг/кг. В группе с высоким уровнем содержания  $S_{\text{подв}}$  более 35 мг/кг в горизонте 0-10 см происходило двукратное снижение как базального, так и субстрат-индуцированного дыхания, что, вероятно, было связано с угнетением функционального состояния почвенного микробиома. В горизонте 10-20 см показатели БД и СИД в группе с низким уровнем содержания  $S_{\text{подв}}$  возросли соответственно в 4 и 1,5 раза по сравнению с очень низким уровнем, а при переходе к среднему уровню практически не изменялись.

Виноградники – уникальный объект для исследования процессов поступления, трансформации и миграции серы из-за

масштабов применения серосодержащих пестицидов, разнообразия ландшафтных, почвенно-климатических и гидрологических условий регионов выращивания. На естественные факторы, влияющие на статус мобильной серы в почве ампелоценозов, накладываются агрогенные и антропогенные. Вот почему сложно выявить общие закономерности в поведении и накоплении серы в почве виноградников в разных регионах, где местные условия способны существенно изменить ситуацию.

В виноградниках Южного берега Крыма было выявлено накопление подвижной серы в верхнем горизонте почв органических хозяйств, что в 2-3 раза выше аналогичного показателя в почвах конвенциональных виноградников. Предполагается, что существенным источником пополнения пула  $S_{\text{подв}}$  в почве при производстве органической продукции является поступление элемента с разрешенными к применению фунгицидами, акарицидами и репеллентами.

Причем в ближайшие годы следует ожидать увеличения числа таких обработок ампелоценозов Южного берега Крыма вследствие происходящих в регионе климатических изменений, появления резистентных штаммов патогенов и новых возбудителей заболеваний, применения восприимчивых сортов [Gorbunov et al., 2020; Галкина и Алейникова, 2019; Vystavna et al., 2014].

Из свойств почвы, в наибольшей степени влияющих на распределение серы по профилю почвы и ее высвобождение в доступной для растений форме, чаще других называют содержание органического углерода и pH [Gao et al., 2017]. Некоторые авторы наблюдали прямую корреляционную связь между содержанием органического вещества и валовым содержанием серы в почве [Provenzano et al., 2011].

В данном исследовании была выявлена достоверная обратная корреляционная зависимость между содержанием органического вещества и подвижной серы только в залежных почвах, которые не испытывают агрогенную нагрузку. Очевидно, проведение различных агротехнологических операций с внесением агрохимикатов, затрагивающих верхние горизонты почв традиционных хозяйств, и внесение агрогенной серы в системе защиты растений органических хозяйств нивелировали возможные корреляционные зависимости между содержанием подвижной

серы и органического вещества, в связи с чем достоверная корреляционная связь между ними не выявлена.

В связи с тем, что почвенные микроорганизмы играют ключевую роль в процессах трансформации серы между ее органическими и неорганическими соединениями, в качестве оценочного интегрального показателя в данной работе была принята биологическая активность почвы. Наиболее информативной ее составляющей является дыхание микроорганизмов: базальное дыхание широко используется для определения текущего физиологического статуса почвенной микробиоты [Zibilske, 1994; Alef, 1995], субстрат-индуцированное дыхание можно рассматривать как модель потенциальной способности микроорганизмов к минерализации органического вещества [Anderson, Domsch, 1978].

В наших исследованиях была установлена высокая активность почвенных микроорганизмов как по показателю БД, так и СИД, которые были в 3,5 и 5,9 раз выше, чем данные показатели в почвах конвенциональных хозяйств и залежи. Таким образом ожидается, что в почвах хозяйств с органическим типом землепользования минерализация органического вещества и высвобождение сульфатной серы как побочного продукта данного процесса происходило более интенсивно, особенно с учетом высокого температурного фона в условиях Крымского полуострова. На это указывает и самое низкое из изученных хозяйств содержание органического вещества в почве органических виноградников, которое в среднем составляло 2,6% против 3,4-3,5% в почвах традиционных виноградников и залежи.

По мере повышения содержания  $S_{\text{подв}}$  показатель рН (водная вытяжка) снижался в обоих горизонтах исследуемых почв, причем аналогичное снижение рН при применении элементарной серы подтверждалось как полевыми, так и лабораторными исследованиями других авторов [Slaton et al., 2001; Yang et al., 2007]. Для почв со щелочной реакцией среды, на которых возделываются виноградники Южного берега Крыма, подобный эффект приводит к нейтрализации щелочности почвенного раствора и активизации гетеротрофных микроорганизмов, минерализующих органическое вещество.

Это объясняет выявленную в нашем исследовании достоверную обратную корреляционную зависимость между показателя-

ми рН и субстрат-индуцированного дыхания в почвах органических хозяйств. В результате сера включается в состав микробной массы и частично переходит в почву в сульфатной форме.

Таким образом, сопутствующий применению серосодержащих пестицидов в органических виноградниках Южного берега Крыма процесс подкисления почвенного раствора также активизирует минерализацию органического вещества и высвобождает дополнительное количество биодоступной серы в почву, хотя количественные характеристики данного процесса остаются неизвестными и являются предметом дальнейшего изучения.

Накопление серы в почве ампелоценозов может также иметь негативные экологические последствия для сопредельных сред. Известно, что миграционные потери серы вследствие вымывания сульфат-ионов из почвы являются одной из главных статей ее расхода, хотя и сильно зависят от почвенно-климатических условий. Немногочисленные исследования на эту тему применительно к ампелоценозам свидетельствуют о том, что сера в виноградных насаждениях подвержена вымыванию из корнеобитаемого слоя, главным образом, в хорошо обеспеченных влагой регионах и при использовании орошения. В частности, интенсивное выщелачивание сульфат-иона отмечалось в теплом и влажном климате региона Апулия юго-востоке Италии и на орошаемых виноградниках северной Калифорнии [Provenzano et al., 2011; Hinckley et al., 2011a]. При сильном переувлажнении и возникновении анаэробных условий возможны также газообразные потери серы из почвы.

В условиях Севастопольского района Республики Крым, где запасы почвенной влаги чаще всего выступают лимитирующим фактором урожайности, потери подвижной серы в результате процессов вымывания в течение вегетационного сезона при отсутствии ирригационных систем оцениваются как незначительные. Дисбаланс между поступлением и расходом серы в сторону первой статьи может привести к ее накоплению в верхних горизонтах почв во время вегетации растений винограда, что было установлено в настоящем исследовании для почв винодельческих хозяйств с органическими виноградниками.

Таким образом, наши исследования указывают на необходимость уделять больше внимания последствиям применения

серы в составе пестицидов и агрохимикатов, в особенности, в органической системе землепользования с учетом региональных и местных климатических особенностей.

1. Исследования на коричневых легкоглинистых почвах под виноградными насаждениями Южного берега Крыма, возделываемыми по органическим и традиционным технологиям, показали существенное накопление подвижной серы в почвах органических хозяйств, содержание которой в 1,8 – 3,4 раза превышало данный показатель в почвах традиционных хозяйств и залежи как следствие разрешенного применения серосодержащих средств защиты растений в органическом виноделии.

2. Увеличению содержания биодоступной серы в почве органических хозяйств способствовала повышенная минерализация органического вещества, вызванная высокой активностью почвенного микробиома и благоприятными почвенно-климатическими условиями. Так, показатель субстрат-индуцированного дыхания в почве органических хозяйств оказался в 3,5 и 5,9 раза выше, чем в почвах традиционных хозяйств и залежи соответственно.

3. Нейтрализация щелочной реакции почвенного раствора вследствие повышенного содержания сульфат-ионов дополнительно усиливала минерализацию органического вещества, что подтверждалось наличием обратной корреляционной зависимости между рН и показателем субстрат-индуцированного дыхания в почвах органических хозяйств.

4. Исходя из невысокой вероятности вымывания сульфатов из корнеобитаемого слоя вследствие невысокого количества осадков, выпадающих за вегетационный период в условиях Южнобережной зоны виноделия, можно ожидать повышения содержания серы в винодельческой продукции, что отрицательно отразится на ее качественных характеристиках и терруарной идентичности.

#### **4.3.4 Влияние возраста закладки виноградника на латеральную миграцию серы в почвах склоновых ампелоценозов в условиях Автономного края Воеводина Республики Сербия**

Содержание подвижной серы и значения коэффициентов латеральной дифференциации в почве автономных и транзитных ландшафтов под виноградниками представлены в таблице 4.3.5.

Таблица 4.3.5. Содержание подвижной серы ( $S_{\text{подв}}$ , мг/кг) и коэффициенты латеральной дифференциации (L) в почве автономных и транзитных ландшафтов под виноградниками региона Фрушка Гора

Местоположение хозяйства	Тип элементарного ландшафта	Глубина, см					
		0-5		5-15		15-30	
		$S_{\text{подв}}$	L	$S_{\text{подв}}$	L	$S_{\text{подв}}$	L
<b>Традиционная система культивирования</b>							
г. Ириг, с/п Турско Брдо	A <sub>1</sub>	35,61	-	28,57	-	6,79	-
	A <sub>2</sub>	3,77	0,11	9,74	0,34	6,25	0,92
	A <sub>3</sub>	6,18	0,17	6,34	0,22	48,97	7,21
г. Ириг, с/п Плавуля	T <sub>1</sub>	3,21	-	3,77	-	3,14	-
	T <sub>2</sub>	4,65	1,44	2,72	0,72	3,55	1,13
	T <sub>3</sub>	3,57	1,11	3,04	0,81	2,21	0,70
г. Сремски Карловци, с/п Чушилово (вост. экспоз.)	T <sub>1</sub>	0,09	-	0,09	-	0,06	-
	T <sub>2</sub>	0,11	1,22	0,08	0,89	0,08	1,33
	T <sup>за</sup>	0,22	2,44	0,08	0,89	0,09	1,50
г. Сремски Карловци, с/п Чушилово (сев. экспоз.)	T <sub>1</sub>	0,06	-	0,06	-	0,09	-
	T <sub>2</sub>	0,09	1,50	0,09	1,50	0,09	1,00
	T <sup>за</sup>	0,08	1,33	0,07	1,17	1,07	11,89
<b>Архаичная система культивирования</b>							
г. Сремски Карловци, с/п Черат	T <sub>1</sub>	2,25	-	4,15	-	6,47	-
	T <sub>2</sub>	38,82	17,25	37,40	9,01	9,84	1,52
	T <sup>за</sup>	36,15	16,07	24,44	5,89	2,44	0,38
<b>Интенсивная система культивирования</b>							
г. Сремски Карловци, с/п Липовац	T <sub>1</sub>	23,80	-	6,29	-	1,83	-
	T <sup>за</sup> I террасы	42,30	1,78	14,43	2,29	1,06	0,58
	T <sup>за</sup> II террасы	53,76	2,26	2,03	0,32	1,70	0,93

В соответствии с классификацией, принятой в зарубежных странах [Аристархов, 2016], почвы рассматриваемых ампелоценозов отличались широким диапазоном содержания  $S_{\text{подв}}$  от низкого (менее 5,0 мг/кг) до высокого (более 35 мг/кг почвы).

Так, содержание  $S_{\text{подв}}$  в почве хозяйств, практикующих традиционные технологии культивирования, различалось на три порядка. Наиболее высокие значения зафиксированы в более чем 300-летнем винограднике у с/п Турско Брдо, которые составили 35,61 и 28,57 мг/кг в горизонтах 0-5 и 5-15 см, соответственно, наименьшие – в 15-летнем винограднике у с/п Чушилово склона северной экспозиции, которые составили 0,06-0,09 мг/кг в зависимости от элемента ландшафта и глубины отбора.

По данным, представленным в таблице 4.3.5, все исследованные транзитные ландшафты были охвачены миграционными потоками  $S_{\text{подв}}$  разной интенсивности от трансэлювиальных фаций верхних частей склонов до трансаккумулятивных фаций подошвы склонов. В результате в геохимически сопряженных элементах ландшафта образовались зоны выноса и накопления подвижной серы. Особенно выраженной аккумуляцией  $S_{\text{подв}}$  в горизонте 0-5 см почвы средней и нижней части склонов отличались хозяйства у с/п Черат и Липовац, в которых содержание  $S_{\text{подв}}$  достигало, соответственно, 36,15-38,82 и 42,30-53,76 мг/кг почвы, причем в миграцию был вовлечен не только поверхностный горизонт 0-5 см, но и горизонт 5-15 см.

По некоторым данным, повышенное содержание серы в почве ампелоценозов увеличивает доступность растениям азота и его усвоение, что может отрицательно влиять на органолептические и физико-химические показатели получаемой винодельческой продукции посредством снижения накопления в ягодах винограда фенольных соединений, определяющих качество виноматериала и его принадлежность к определенному терруару [Mocali et al., 2020].

Обнаружено наличие характерной для определенных горизонтов почвы корреляционной зависимости между содержанием  $S_{\text{подв}}$ , системой культивирования и возрастом виноградника. Так, при традиционной системе в верхних горизонтах почвы накапливалось достоверно меньше подвижной серы, чем в архаичной и интенсивной (уровень значимости  $p = 0,019$  и  $0,084$

в горизонтах 0-5 и 5-15 см, соответственно), тогда как влияние системы культивирования на содержание  $S_{\text{подв}}$  в горизонте 15-30 см оказалось недостоверным. Напротив, статистически значимое ( $p = 0,022$ ) увеличение накопления  $S_{\text{подв}}$  в горизонте 15-30 см отмечалось в почве виноградников возрастом более 200 лет по сравнению с молодыми насаждениями.

Таким образом, в горизонтах 0-5 и 5-15 см достоверное влияние на накопление  $S_{\text{подв}}$  оказывала система культивирования, тогда как в горизонте 15-30 см – возраст виноградника. Исключением явилось высокое накопление  $S_{\text{подв}}$  в поверхностном слое почвы молодого виноградника у с/п Липовац, которое на 2-3 порядка превышало данный показатель для аналогичных по возрасту насаждений у с/п Чушилово, что, по всей видимости, объяснялось специфическими условиями проявления склоновых процессов в данной локации, приведенными ниже.

Тесная корреляционная связь ( $p < 0,05$ ) была установлена также между интенсивностью латеральной миграции  $S_{\text{подв}}$ , крутизной и протяженностью склона. Так, высокие крутизна и длина склона, его выпукло-вогнутая форма, а также особенности применяемых технологических процессов в молодом промышленном винограднике у с/п Липовац, таких как отсутствие растительности в междурядьях, расположение рядов вдоль склона и интенсивная механическая обработка междурядий, по всей видимости, усилили миграцию подвижной серы по профилю склона ( $L = 1,78$  и  $2,29$  в горизонтах 0-5 и 5-15 см, соответственно), так что уровень ее накопления в поверхностном горизонте почвы трансаккумулятивных фаций был сравним и даже превышал таковой в почве 200-летнего виноградника у с/п Черат. Интенсивное накопление  $S_{\text{подв}}$  установлено также в почве нижней части покатого склона крутизной  $8^\circ$  под виноградником у с/п Чушилово восточной экспозиции ( $L = 2,44$  в горизонте 0-5 см).

Максимальной контрастностью латеральной дифференциации  $S_{\text{подв}}$  отличалась трансаккумулятивная фация в хозяйстве у с/п Черат ( $L = 16,1$  и  $5,89$  для горизонтов 0-5 и 5-15 см, соответственно). Накопление  $S_{\text{подв}}$  в почве данного возрастного виноградника наблюдалось не только в нижней, но и в средней части склона, причем миграцией была охвачена вся изученная часть профиля почвы мощностью 30 см, чему способствовали

равномерная штамбовая схема посадки кустов по всему склону, его естественная задерненность и высокая крутизна, отсутствие механической обработки почвы.

В слабополгих, пологих и слабопокатых склоновых элементах ландшафта крутизной до  $5^\circ$  и с задернением междурядий винограда в хозяйствах у сельских поселений Плавуля и Чушилово также наблюдался транзит  $S_{\text{подв}}$ , но менее интенсивный ( $L = 1,00-1,50$ ).

Представляет интерес распределение подвижной серы в автономном элювиальном ландшафте пологого склона надпойменной террасы, на котором культивировался виноградник возрастом более 300 лет у с/п Турско Брдо. В данном ампелоценозе наблюдалось накопление  $S_{\text{подв}}$  в почве верхней, наиболее выровненной части пологого склона (рис. 2а) в горизонтах 0-5 и 5-15 см на уровне 36,51 и 28,57 мг/кг соответственно, что, возможно, было вызвано дополнительным поступлением серы в поверхностный слой почвы данной локации в результате ее расположения в 10 м от дороги с интенсивным движением автотранспорта.

Исходя из низких значений коэффициентов латеральной дифференциации на уровне 0,11-0,34 в располагающихся ниже по склону элювиального геохимического ландшафта точках отбора наблюдался преимущественный вынос рассматриваемого элемента из верхних горизонтов почвы с накоплением в горизонте 15-30 см, в котором значение коэффициента  $L$  составило 0,92 и 7,21 соответственно в средней  $A_2^3$  и нижней  $A_3^3$  частях склона. В связи с этим можно предположить, что в данном типе ландшафта накопление преобладало над выносом, а радиальная миграция подвижной серы вглубь профиля почвы – над латеральной.

Исследования на бурых лесных остаточно-карбонатных почвах склонового ландшафта под виноградными насаждениями в районе Национального парка Фрушка Гора Автономного края Воеводина Республики Сербия показали, что содержание подвижной серы в латеральной структуре элементарных ландшафтов возрастало от трансэлювиальных фаций верхних частей склонов к нижним трансаккумулятивным, чему способствовала высокая крутизна и протяженность склонов, а также отсутствие

задернения междурядий и расположение рядов вдоль склона в промышленном винограднике интенсивного типа.

Как следствие, такие склоны выступали не только областью транзита, но и аккумуляции подвижной серы на уровне 23,8-53,76 и 24,44-37,40 мг/кг в горизонтах почвы 0-5 и 5-15 см, соответственно, что классифицируется как средний и высокий уровень накопления. Миграционные потоки и аккумуляция подвижной серы в трансаккумулятивных элементарных ландшафтах могут стать причиной ухудшения качественных характеристик производимых виноматериалов и загрязнения сопредельных сред.

#### **4.3.5. Агрэкологические особенности содержания и распределения меди в почвах ампелоценозов**

Применение медьсодержащих фунгицидов для борьбы с болезнями растений имеет давние традиции с того момента, когда в 1885 году Пьер-Мари Алексис Мильярде случайно обнаружил эффективность нейтрализованного медного купороса для борьбы с мучнистой росой виноградной лозы [Ayres, 2004; La Torre et al., 2018]. Это открытие произвело революцию в сельскохозяйственном производстве, поскольку было получено первое эффективное средство защиты растений от фитопатогенов.

Несмотря на то, что с тех пор было открыто множество противогрибковых активных веществ, препараты на основе меди по-прежнему широко используются как в традиционном, так и в органическом земледелии, что обусловлено их многочисленными преимуществами и отсутствием достойных альтернатив. Одним из основных достоинств меди является ее широкий спектр активности против бактерий, оомицетов, аскомицетов и базидиомицетов, включая болезни мирового масштаба, такие как мучнистая роса винограда и альтернариоз картофеля.

Среди других полезных агрономических свойств медьсодержащих препаратов называют их высокую эффективность в дождливую погоду, минимизирующий риск развития устойчивых штаммов патогенов механизм действия, относительно низкую острую токсичность для наземных позвоночных, а также низкую стоимость [Lamichhane et al., 2018].

При всех отмеченных преимуществах имеются также существенные недостатки применения медьсодержащих фунгицидов, которые привели к постепенному введению ограничений на их использование в странах Евросоюза. Главными экологическими рисками считаются накопление меди в почве виноградников, плодовых садов и оливковых рощ с последующей миграцией в базовых компонентах экосистем и перемещением по пищевым цепям, получение продукции ненадлежащего качества, а также негативное воздействие на почвенную биоту [Lamichhane et al., 2018].

Максимальное количество меди, разрешенное для применения в защите растений, в настоящее время ограничено европейским законодательством дозой 28 кг на гектар в течение 7 лет (Регламент ЕС № 2018/1981) [Commission Implementing Regulation (EU) No 2018/1981 of 13 December 2018]. Исходя из включения фунгицидов на основе меди в список кандидатов на замещение (часть E приложения к Регламенту ЕС № 540/2011) [Commission Implementing Regulation (EU) No 540/2011 of 25 May 2011], можно сказать, что конечной целью, которую преследует Еврокомиссия, является постепенный отказ от этого вида препаратов. В отдельных европейских странах (Дания, Финляндия, Нидерланды, Швеция, Норвегия) применение соединений меди в качестве защитного средства уже полностью запрещено [La Torre et al., 2018]. В органическом земледелии фунгициды и удобрения на основе меди пока разрешены (Регламент ЕС № 2021/1165) [Commission Implementing Regulation (EU) No 2021/1165 of 15 July 2021].

В европейской базе данных Topsoil проекта LUCAS, в рамках которого было выполнено единовременное обследование землепользования и растительного покрова 25 государств Европейского Союза, концентрация меди в 342 почвенных образцах, отобранных на виноградниках (1,6% от общего количества образцов почв с участков с разным типом землепользования), была наиболее высокой и составила в среднем 49,26 мг/кг с очень высокой вариабельностью между странами [Ballabio et al., 2018].

Кроме того, в почвах под виноградниками обнаружена наибольшая доля (14,6%) почвенных образцов с содержанием меди,

превышающим установленный в Европе допустимый уровень в 100 мг/кг [Tóth et al., 2016]. В основном, речь идет о виноградниках из регионов Франции и Италии. Так, на виноградниках во французских провинциях Аквитания, Лангедок–Руссильон и Прованс–Альпы–Лазурный берег в половине образцов почвы концентрация меди превышала пороговое значение [Panagos et al., 2018]. В итальянской провинции Тренто средняя концентрация меди составила 220,9 мг/кг, в провинции Эмилия–Романья – 110,44 мг/кг. Эти данные согласуются с фактом, что Франция и Италия закупают наибольшие объемы фунгицидов в Европейском Союзе.

Последствия применения медьсодержащих противогрибковых препаратов для защиты винограда во многом зависят от практикуемых в разных странах агротехнических приемов его культивирования. Технологии и способы выращивания, применяемые сорта, система содержания междурядий, дозы и частота защитных обработок и многое другое, несомненно, оказывают влияние на уровень загрязнения медью почв ампелоценозов.

Так, применение медьсодержащих фунгицидов в Испании не имеет таких давних традиций, как в Италии и Франции, что, возможно, связано с более засушливым климатом. Кроме того, длительность исторического периода, в течение которого проводились обработки препаратами на основе меди и их системность, как свидетельствуют результаты исследований, способствует более высокому накоплению элемента в почве ампелоценозов [Brunetto et al., 2017]. В этой связи представляет большой научный интерес характер накопления и распределения меди по склону и профилю почвы в результате многолетнего систематического применения в составе фунгицидов в районах с многовековой историей виноделия. К ним по праву относится Балканский винодельческий регион, где виноград начали выращивать задолго до греков и римлян.

В связи с этим целью настоящей работы явилась экологическая оценка накопления и миграции меди в почве в результате длительного применения медьсодержащих фунгицидов в возрастных (более 200 лет) ампелоценозах склонового типа в условиях горной гряды Фрушка Гора Автономного края Воеводина Республики Сербия.

#### 4.3.6. Влияние возраста заложения виноградника и крутизны склона на накопление и миграцию меди в почве ампелоценозов в условиях Автономного края Воеводина Республики Сербия

Оба исследуемых виноградника располагались в историческом винодельческом регионе на склонах горной гряды Фрушка Гора, культура возделывания винограда в котором охватывает период в более чем пять столетий.

Несмотря на длительный период культивирования винограда в обоих хозяйствах, валовое содержание меди в почве данных ампелоценозов достоверно отличалось (табл. 4.3.6).

Таблица 4.3.6. Валовое содержание меди (Cu, мг/кг) в почве транзитного ландшафта под виноградниками с традиционной (с/п Плавуля) и архаичной (с/п Черат) системой культивирования региона Фрушка Гора, Республика Сербия

Местоположение хозяйства	Тип элементарного ландшафта	Глубина, см					
		0-5		5-15		15-30	
		Ряд	Междурядье	Ряд	Междурядье	Ряд	Междурядье
г. Ириг, с/п Плавуля	T <sub>1</sub>	54,3	52,4	50,1	50,1	43,4	47,8
	T <sub>2</sub>	67,2	53,9	56,1	45,0	62,0	59,6
	T <sub>3</sub>	56,7	48,3	66,5	56,6	62,8	53,5
г. Сремски Карловци, с/п Черат	T <sub>1</sub>	109,0	84,5	95,1	73,7	61,9	41,0
	T <sub>2</sub>	132,7	127,6	72,3	73,9	59,4	52,8
	T <sup>эа</sup>	128,3	136,6	146,1	189,4	247,5	228,5

Почва транзитного участка склона, на котором располагался виноградник у с/п Черат, характеризовалась в 2,0-2,3; 1,3-2,2 и 1,4-3,9 раза большим уровнем накопления меди в рядах и в 1,6-2,8; 1,5-3,3 и 4,3 раза – в междурядьях в горизонтах 0-5, 5-15 и 15-30 см, соответственно, по сравнению с виноградником у с/п Плавуля.

Валовое содержание меди в почве виноградника у с/п Плавуля не отличалось высокой контрастностью в зависимости от типа элементарного ландшафта, тем не менее различия по данному показателю между верхней и нижней частью склона оказались достоверны (рис. 4.3.9).

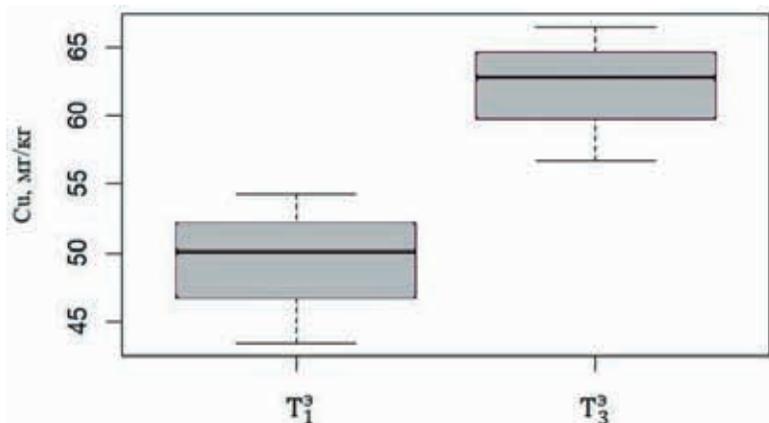


Рис. 4.3.9. Валовое содержание меди (Cu) в почве ампелоценоза у с/п Плавуля в пределах транзитного ландшафта склона согласно критерию Краскела-Уоллиса ( $p=0,049$ ).

В рядах валовое содержание меди варьировало в диапазоне от 43,4 до 67,2 мг/кг, в междурядьях – от 45,0 до 66,5 мг/кг. Исходя из значений коэффициента латеральной дифференциации (табл. 4.3.7), миграция меди с накоплением средней силы ( $L = 1,1-1,6$ ) наблюдалась в ряду в горизонте 5–15 см ( $L = 1,12$  и  $1,33$ ) и, в особенности, в ряду и междурядье в горизонте 15-30 см ( $L = 1,43$  и  $1,45$  в средней и нижней транзитной части склона, соответственно).

В поверхностном слое почвы 0–5 см накопление средней силы происходило в средней части склона и только в ряду. Таким образом, заметное накопление меди в винограднике у с/п Плавуля можно отметить в нижней транзитной части склона с усилением в рядах на 17% по сравнению с междурядьями на глубине от 5 до 30 см.

Таблица 4.3.7. Коэффициенты латеральной дифференциации (L) меди в почве транзитного ландшафта под виноградниками с традиционной (с/п Плавуля) и архаичной (с/п Черат) системой культивирования региона Фрушка Гора, Республика Сербия.

Местоположение хозяйства	Тип элементарного ландшафта	Глубина, см					
		0-5		5-15		15-30	
		Ряд	Междурядье	Ряд	Междурядье	Ряд	Междурядье
г. Ириг, с/п Плавуля	T <sub>2</sub>	1,24	1,03	1,12	0,90	1,43	1,25
	T <sub>3</sub>	1,04	0,92	1,33	1,13	1,45	1,12
г. Сремски Карловци, с/п Черат	T <sub>2</sub>	1,22	1,51	0,76	1,00	0,96	1,29
	T <sup>а</sup>	1,18	1,62	1,54	2,57	4,00	5,57

Значительно более контрастным было распределение по склону меди в почве виноградника у с/п Черат (рис. 4.3.10). Необходимо отметить, что в отличие от виноградника у с/п Плавуля, охватывающего транзитные фации элементарного ландшафта, ампелоценоз у с/п Черат включал и трансаккумулятивную фацию. И именно в ней были зафиксированы наиболее высокие уровни накопления меди от 128,3 мг/кг в поверхностном горизонте до 247,5 мг/кг на глубине 15-30 см.

Трансэлювиальная фация средней части склона была затронута миграционными процессами только в поверхностном слое почвы как рядом с кустами, так и между ними. Так, в горизонте почвы 0–5 см транзитной фации средней части склона содержание меди возросло на 22% у кустов и на 51% – между кустами по сравнению с верхней частью склона, чего не наблюдалось в горизонтах 5–15 и 15–30 см. Эти данные подтверждаются низкими значениями коэффициента латеральной дифференциации, свидетельствующие либо об отсутствии миграции, либо о незначительном выносе элемента.

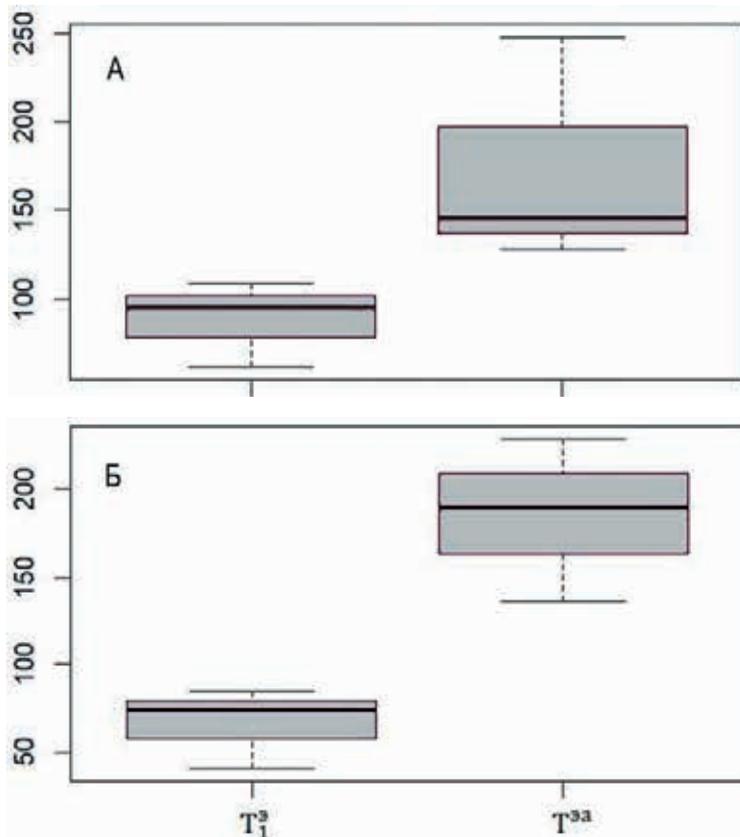


Рис. 4.3.10. Валовое содержание меди (мг/кг) по склону в почве ампелоценоза у с/п Черат согласно критерию Краскела-Уоллиса (А – у кустов ( $p = 0,049$ ), Б – между кустами ( $p = 0,049$ )).

В почве трансаккумулятивной фации подошвы склона у кустов коэффициент  $L$  достигал значений 1,18; 1,54 и 4,0 в горизонтах 0-5, 5-15 и 15-30 см, соответственно. Аналогичная тенденция была характерна и для почвы между кустами, причем содержание меди в ней оказалось даже выше, чем непосредственно у кустов. Коэффициенты латеральной дифференциации здесь составили 1,62; 2,57 и 5,57 мг/кг в горизонтах 0-5, 5-15 и 15-30 см, соответственно, что в 1,4-1,7 раз выше, чем непосредственно у кустов. Таким образом, в винограднике у с/п Черат происходило

усиление миграционных потоков меди вниз по склону на глубине 5-15 см и, в особенности, 15-30 см по сравнению с поверхностным горизонтом, который, впрочем, также был охвачен миграционными процессами, но в меньшей степени.

Следует особо отметить вовлеченность участков почвы между кустами в транзит меди по склону, который по своей интенсивности даже превышал миграцию элемента на участках у кустов, что подтверждается статистически (рис. 4.3.10). Очевидно, это объясняется особенностями архаичной системы культивирования винограда, которая применяется в данном хозяйстве.

Равномерное расположение штамбов по склону способствовало охвату обработками медьсодержащими пестицидами всей площади склона, на которой располагался виноградник, что привело к загрязнению медью поверхностного слоя почвы в средней и нижней части склона, а также более глубоких горизонтов почвы в нижней части склона. Кроме того, с учетом высокой крутизны склона активный транзит меди от трансэлювиальных к трансаккумулятивной фации может быть связан также с усилением частоты ливневых осадков, которое фиксируется в последние годы в Автономном крае Воеводина [Malinović-Milićević et al., 2018].

Необходимо отметить, что значения валового содержания меди в почве нижней части склона под 200-летним виноградником у с/п Черат превысили значения максимально допустимого количества (МДК) меди, установленного в Республике Сербия (90 мг/кг для среднесуглинистых почв) [Правилник о допунама правилника..., 2016], в 1,4-1,5; 1,6-2,1; 2,5-2,8 раза соответственно в горизонтах 0-5, 5-15 и 15-30 см. В верхней и средней транзитной части склона также наблюдалось превышение нормативного значения в поверхностном горизонте на 21-47%.

Отмеченные уровни накопления меди в почве виноградника у с/п Черат оказались также выше допустимого количества данного элемента в почвах, установленного в Европейском Союзе (100 мг/кг), и выше величины ориентировочно-допустимой концентрации (ОДК) для почв со схожими агрохимическими характеристиками, установленной в Российской Федерации (132 мг/кг, СанПиН 1.2.3685-21).

Таким образом, высокое валовое содержание меди в почве трансаккумулятивной фации геохимически сопряженного ландшафта связано с длительным историческим периодом использования данной территории под виноградники (более 200 лет), многолетним использованием медьсодержащих противогрибковых препаратов, высокой частотой их применения, особенностями практикуемой в хозяйстве архаичной системы культивирования винограда, которая характеризуется равномерным распределением штамбов по склону, а также высокой крутизной склона. Даже постоянная задерненность склона и отсутствие механического воздействия на почву между кустами не смогли остановить миграцию меди как вниз по склону, так и вглубь почвенного профиля.

Таким образом, исследования, проведенные на бурой лесной остаточно-карбонатной почве под возрастными (более 200 лет) виноградниками, расположенными в условиях склонового ландшафта в регионе Фрушка Гора (Автономный край Воеводина, Республика Сербия) показали наличие последствия длительного и систематического применения медьсодержащих фунгицидов, которое выражалось в накоплении меди в верхнем слое почвы (0-30 см) и ее перераспределении по склону от трансэлювиальных фаций верхней и средней его части к нижним трансэлювиальной и трансаккумулятивной.

В почве под виноградником с большей крутизной склона в его транзитной части наблюдалось в 1,5-4,3 раза более высокое валовое содержание меди по сравнению с виноградником, который располагался на склоне меньшей крутизны, а уровень содержания меди в почве нижней части склона достигал 128,3-136,6; 146,1-189,4 и 247,5-228,5 мг/кг в горизонтах 0-5, 5-15 и 15-30 см, соответственно, что в 1,4-2,8 раз превышало значения максимально допустимого количества меди, установленного в Республике Сербия.

Архаичная система культивирования винограда, подразумевающая равномерное распределение отдельно стоящих кустов по склону, способствовала более однородному распределению меди по всей площади в отличие от традиционной шпалерно-рядовой системы, при которой в рядах накапливалось больше элемента, чем в междурядьях.

## Список использованной литературы

1. *Аристархов А.* Сера в агроэкосистемах России: мониторинг содержание в почвах и эффективность их применения // *Международный сельскохозяйственный журнал*. – 2016. – № 5. – С. 39–47.
2. *Борисенко М.Н., Алейникова Н.В., Галкина Е.С., Радионовская Я.Э.* Фитосанитарное состояние виноградных насаждений Крыма // *Защита и карантин растений*. – 2015. – № 6. – С. 21–26.
3. *Галкина Е.С., Алейникова Н.В.* Сравнительный анализ многолетней динамики развития основных болезней винограда в условиях Крыма // «Магарач». Виноградарство и виноделие. – 2019. – V. 21(3). С. 244–249. doi: 10.35547/IM.2019.21.3.011.
4. *Глазовская М.А.* Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. – Смоленск: Ойкумена, 2002. – 288 с.
5. *Жуйков Д.В.* Сера и микроэлементы в агроценозах (обзор) // *Достижения науки и техники АПК*. – 2020. – Т. 34. – № 11. – С. 32–42. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11105.
6. *Зинченко В.А.* Химическая защита растений: средства, технология и экологическая безопасность. – М.: Колос С, 2005. – 232 с.
7. *Маслова И.Я.* Воздействие содержащих серу аэротехногенных веществ на некоторые агрохимически значимые процессы и свойства почв // *Агрохимия*. – 2008. – № 6. – С. 80–94.
8. *Нортон Р., Миккельсен Р., Дженсен Т.* Значение серы в питании растений // *Питание растений*. – 2014. – № 3. – С. 2–5.
9. Правилник о допунама правилника о унутрашњој организацији и систематизацији радних мјеста у министарству саобраћаја и веза // *Службени гласник Републике Српске* – Број 56. – 11.7.2016. – С. 16.
10. *Alef K., Nannipieri P.* *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. – Academic Press, 1995. 608 p.
11. *Anderson J.P.E., Domsch K.H.* A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 1978. V. 10. Issue 3. P. 215–221. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8).
12. *Ayres P.* Alexis Millardet: France's forgotten mycologist // *Mycologist*. – 2004. – Vol. 18(1). – P. 23–26. – DOI:10.1017/S0269915X04001090.
13. *Ballabio C., Panagos P., Lugato E., Huang J.-H., Orgiazzi A., Jones A., Fernández-Ugalde O., Borrelli P., Montanarella L.* Copper distribution in European topsoils: An assessment based on LUCAS soil survey // *Science of The Total Environment*. – 2018. – 636. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.268.
14. *Blum S.C., Lehmann J., Solomon D., Caires E.F., Alleoni L.R.F.* Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization in soil //

Geoderma. 2013. V. 200-201. P. 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.003>

15. Brunetto G., Comin J.J., Miotto A., de Moraes M.P., Sete P.B., Schmitt D.E. et al. Copper and zinc accumulation, fractionation and migration in vineyard soils from Santa Catarina State, Brazil // SciELO journals. Dataset. – 2017. – DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.5720539.v1>.

16. Dad M.J., Abdollahi L. Changes in soil organic carbon, nitrogen and sulphur along a slope gradient in apple orchard soils of Kashmir Himalaya // Journal of Mountain Science. 2021. V. 18. P. 2377-2387. doi: 10.1007/s11629-021-6764-9.

17. European Commission. Commission Implementing Regulation (EU) No 2018/1981 of 13 December 2018 Renewing the Approval of the Active Substances Copper Compounds, as Candidates for Substitution, in Accordance with Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council Concerning the Placing of Plant Protection Products on the Market, and Amending the Annex to Commission Implementing Regulation (EU) No 540/2011. 2018. – Режим доступа: [http://data.europa.eu/eli/reg\\_impl/2018/1981/oj](http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2018/1981/oj)

18. European Commission. Commission Implementing Regulation (EU) No 2021/1165 of 15 July 2021 Authorising Certain Products and Substances for use in Organic Production and Establishing Their Lists. 2021. Режим доступа: [http://data.europa.eu/eli/reg\\_impl/2021/1165/oj](http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2021/1165/oj)

19. European Commission. Commission Implementing Regulation (EU) No 540/2011 of 25 May 2011 Implementing Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council as Regards the List of Approved Active Substances (Text with EEA relevance). – Режим доступа: [http://data.europa.eu/eli/reg\\_impl/2011/540/oj](http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2011/540/oj)

20. Gao M., Lu X., Huang Y., Liu N., Yang J. Impact of long-term application fertilizer on soil total sulphur and valid sulphur. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, Vol. 1. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/207/1/012068>.

21. Gikas G.D., Parlakidis P., Mavropoulos T., Vryzas Z. Particularities of fungicides and factors affecting their fate and removal efficacy: A review. Sustainability. 2020. V. 14, article number 4056. doi: 10.3390/su14074056.

22. Gorbunov R.V., Gorbunova T.Yu., Drygval A.V., Tabunshchik V.A. Change of Air Temperature in Crimea // Environment and Human: Ecological Studies. 2020. V. 10. № 3. P. 370–383. (In Russ.) doi: 10.31862/2500-2961-2020-10-3-370-383.

23. Hinckley E.-L., Fendorf S., Matson P. Short-term fates of high sulfur inputs in Northern California vineyard soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2011a. V. 89. P. 135-142. doi: 10.1007/s10705-010-9383-3.

24. Hinckley E.-L., Matson P. Transformations, transport, and potential unintended consequences of high sulfur inputs to Napa Valley vineyards // Pro-

ceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2011. – V. 108. – P. 14005-140010. – doi: 10.1073/pnas.1110741108.

25. *Hinckley E.S., Kendall C., Loague K.* Not all water becomes wine: Sulfur as an opportune tracer of hydrochemical losses from vineyards // *Water Resources Research*. – 2008. – V. 44. – W00401. <https://doi.org/10.1029/2007WR006672>.

26. *La Torre A., Iovino V., Caradonia F.* Copper in plant protection: Current situation and prospects // *Phytopathologia Mediterranea*. – 2018. – Vol. 57. – P. 201-236. – DOI: 10.14601/Phytopathol\_Mediterr-23407.

27. *Lamichhane J.R., Osdaghi E., Behlau F., Köhl J., Jones J.B., Aubertot J.-N.* Thirteen decades of antimicrobial copper compounds applied in agriculture. A review // *Agron. Sustain. Dev.* – 2018. – Vol. 38. – 28. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0503-9>.

28. *Malinović-Miličević S., Mihailovic D., Radovanovic M., Drešković N.* Extreme Precipitation Indices in Vojvodina Region (Serbia) // *Journal of the Geographical Institute «Jovan Cvijić» SASA*. – 2018. – Vol. 68. – P. 1-15. – DOI: 10.2298/IJGI1801001M.

29. *Mocali S., Kuramae E.E., Kowalchuk G.A., Fornasier F., Priori S.* Microbial Functional Diversity in Vineyard Soils: Sulfur Metabolism and Links With Grapevine Plants and Wine Quality // *Frontiers in Environmental Science*. – 2020. – V. 8. – 23 p. – doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020>.

30. *Panagos P., Ballabio C., Lugato E., Jones A., Borrelli P., Scarpa S., Orgiazzi A., Montanarella L.* Potential Sources of Anthropogenic Copper Inputs to European Agricultural Soils // *Sustainability*. – 2018. Vol. 10. – 2380. – DOI: 10.3390/su10072380.

31. *Provenzano M., El Bilali H., Simeone V., Mondelli D., Baser N.* Total sulphur contents over a three-year period in different organic vineyards of Apulia region, South-Eastern Italy // *Italian Journal of Agronomy*. – 2011. – V. 6:e27. – P. 171-175. – doi: 10.4081/ija.2011.e27.

32. *Seralini G.E., Douzelet J., Halley J.C.* Sulfur in Wines and Vineyards: Taste and Comparative Toxicity to Pesticides // *Food and Nutrition Journal*. – 2021. – 6: 231. – DOI: 10.29011/2575-7091.100131.

33. *Skura E., Koto R., Lika E., Shahini S., Sallaku F.* Comparative characteristics of plant protection against copper and sulphur influence // *Scientific Horizons*. – 2023. – V. 26. – doi: 10.48077/scihor.26(1).2023.52-61.

34. *Slaton N.A., Norman R.J., Gilmour J.T.* Oxidation Rates of Commercial Elemental Sulfur Products Applied to an Alkaline Silt Loam from Arkansas // *Soil Science Society of America Journal*. – 2001. – V. 65. – P. 239-243.

35. *Tóth G., Hermann T., Da Silva M.R., Montanarella L.* Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety // *Environ. Int.* – 2016. – Vol. 88. – P. 299–309. – DOI: 10.1016/j.envint.2015.12.017.

36. *Vukosavljevic V., Zunic D., Todic S., Matijasevic S.* (2016). Organic viticulture in world, Serbia and region // *Acta agriculturae Serbica*. – 2016. – V. 21. – P. 155-166. – doi: 10.5937/AASer1642155V.

37. *Vystavna Yu., Rushenko L., Diadin D., Klymenko O., Klymenko M.* Trace metals in wine and vineyard environment in southern Ukraine // *Food Chem.* – 2014. – V. 146. – P. 339-344. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.091>.

38. *Xu C., Wang S., Chen Z., Lv J., Luo L., Li J., Ma Y.* (2016) Sulphur speciation and availability in long-term fertilized soil: evidence from chemical fractionation and S K-edge XANES spectroscopy // *European Journal of Soil Science*. – 2016. – V. 67(5). – P. 666–675. – <https://doi.org/10.1111/ejss.12364>.

39. *Yang Zh., Haneklaus S., Singh B., Schnug E.* Effect of Repeated Applications of Elemental Sulfur on Microbial Population, Sulfate Concentration, and pH in Soils // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2008. – V. 39. – P. 124-140. – doi: 10.1080/00103620701759079.

40. *Zibilske L.M.* Carbon Mineralization // *Methods of Soil Analysis: Part 2 Microbiological and Biochemical Properties*, 5.2. 1994. Book Series: SSSA Book Series. Chapter 38. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c38>.

### **Agroecological features of the content and distribution of mobile sulfur and copper in the soils of ampelocenoses of the Southern Coast of Crimea and the Autonomous Region of Vojvodina of the Republic of Serbia**

*Andreeva I.V., Gabechaya V.V.*

**Abstract:** The data on the total copper content and mobile sulphur content in soil, as well as their migration along the slope of different-aged ampelocenoses with different land use systems in the Southern coast of Crimea and the Autonomous Province of Vojvodina of the Republic of Serbia are presented. Both conventional and organic farms showed a significantly higher accumulation of total copper and mobile sulphur in the upper soil horizons. This may lead to a decrease of the quality characteristics of the produced wine materials and pollution of the environment components. The migration of the studied elements from autonomous to dependent elementary landscapes was observed in vineyards of both locations. However, the intensity of this migration varied depending on the age of the vineyard, the steepness and shape of the slope, the bush and row spacing management systems.

#### 4.4. Экологическая оценка пространственного варьирования и сезонной динамики потоков $N_2O$ и $CH_4$ из почвы в условиях города

*Сыну М.Т., Тихонова М.В., Кузов Н.А., Патутин А.А.*

**Аннотация:** В статье рассматривается экологическая оценка сезонности эмиссии парниковых газов таких, как метан и оксид азота (I), их пространственное варьирование в зависимости от микрорельефа, сказывающегося на условиях увлажнения, в городских условиях в посадках Ивы пурпурной (*Salix purpurea*) на Экологическом стационаре РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. При оценке учитывались показатели, такие как температура и влажность почвы, которые являются определяющими характеристиками интенсивности эмиссионных потоков метана и оксида азота (I) из почв. Установлено влияние сезонности на эмиссию потоков  $N_2O$  и  $CH_4$  в различных вариантах микрорельефа в посадках Ивы пурпурной (*Salix purpurea*) в черте города.

Глобальные изменения климата и функционирования биоты, во многом определяемые ростом в атмосфере концентрации парниковых газов, стоят в ряду приоритетных проблем современной экологии [Solomon и др., 2007; Stocker и др., 2013]. Одним из факторов, который ускоряет климатические изменения, меняет состав и качество биоты, является быстрый и слабо контролируемый рост городских территорий. Значительная часть парниковых газов, выделяющихся в атмосферу, поступает из антропогенных источников или почв сильно подверженных рекреационной нагрузке [Саржанов и др., 2015].

На территории Московской области ведется кадастр выбросов парниковых газов из таких источников, как: стационарные единицы, выбросы которых связаны с энергопотреблением и прямыми утечками, транспорт, отходы, промышленные процессы, сельское и лесное хозяйство, но он не учитывает эмиссию парниковых газов из городских почв. Многолетними исследованиями установлено, что почвы также являются источником парниковых газов (ПГ), таких как углекислый газ ( $CO_2$ ), метан ( $CH_4$ ) и оксид азота (I) ( $N_2O$ ). Поскольку объемы концентрации

и потоков могут быть значительными, необходимы точные количественные оценки для получения данных по глобальным потокам ПГ, необходимых для прогнозирования глобальных изменений и исследований климата [Кулачкова и др., 2018].

При ускоренном строительстве городов происходят структурные изменения естественного почвенного покрова, трансформация переноса веществ и энергии, в результате чего, наблюдается повышенное продуцирование парниковых газов в атмосфере. При строительстве часто происходит засыпка территории насыпными грунтами, которые могут содержать строительные или бытовые отходы, нарушающие газообмен почвы, что вызывает более интенсивную эмиссию газов и сокращает скорость естественного возобновления почвенного покрова.

Целью данной работы было изучение пространственного варьирования и сезонной динамики потоков  $N_2O$  и  $CH_4$  из почвы в условиях городской территории, имеющей подтопления и неоднородность микрорельефа, для количественной оценки потоков и возможности прогнозирования динамики изменения поступления ПГ в атмосферу.

### **Объекты и методы**

Для проведения исследований сезонной динамики эмиссии парниковых газов было выбрано Западное поле на территории экологического стационара РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Территория экологического стационара более века испытывала интенсивную антропогенную нагрузку, проводились испытания сельскохозяйственной техники, выпас скота, некоторое время поля использовались для складирования сенокоса.

Западное поле уникально своим расположением. Объект находится в центре мегаполиса, имеет повышенную антропогенную нагрузку, территория стационара окружена с двух сторон дорожной сетью, что дополнительно влияет на гидрологический режим (рис. 4.4.1). При этом, по почвенно-климатическим условиям территория является продолжением фации лесной опытной дачи (ЛОД). Для использования данного объекта в научных целях в 2018 году был проведен ряд агрохимических мероприятий, но почвенный состав остался неоднороден, и в

разных частях поля имеет некоторые отличия, после чего в июле 2018 года была произведена высадка 346 саженцев Ивы пурпурной (*Salix purpurea*).



Рис. 4.4.1 Ситуационное расположение объекта исследования

Часть территории объекта была засыпана грунтом, в результате чего почвенный покров территории имеет неоднородную структуру, и довольно искаженный почвенный профиль, местами горизонт В1 имеет площадь поверхности около 20 м<sup>2</sup> (рис. 4.4.2).

Исследуемый участок характеризуется неоднородным микрорельефом, что способствует скоплению осадков в микропонижениях, образуя места подтопления, особенно в весенний период и в периоды обильных осадков. В центре поля имеется небольшая западина и сток воды направлен к краю поля через центр (рис. 4.4.3).

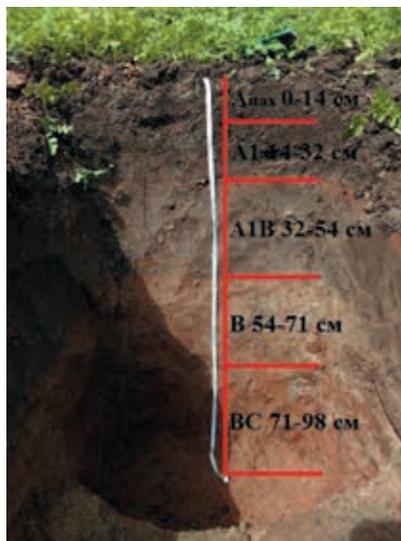


Рис. 4.4.2. Почвенный разрез на Западном поле

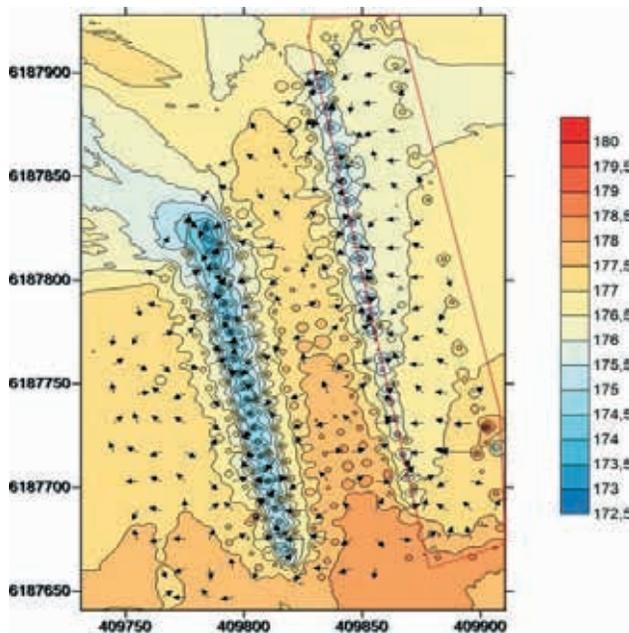


Рис. 4.4.3. Неоднородность микрорельефа поля с распределением влаги

Уровень грунтовых вод составляет 94 см. С северной и восточной стороны от экспериментального участка на расстоянии 2-3 м располагаются неисправные каналы для сбора воды бывшей ирригационной системы. Весной 2019 года была осуществлена засыпка данной траншеи минеральной частью слоем 50 см, следующий слой – торф 50 см, что позволит отрегулировать режим поверхностного стока на западном поле.

Исследование динамики потоков  $N_2O$  и  $CH_4$  проводилось при помощи метода отбора проб воздуха из напочвенных экспозиционных камер (в модификации ЛАМП, патент № 2518979), которые были установлены на вкопанные основания. Отбор воздуха производился с интервалом времени 0-30-60 минут в пронумерованные и герметично закупоренные виалы, которые в дальнейшем были проанализированы на хроматографе «Хроматэк – Кристалл 5000.2» [Тихонова и др., 2013].

Динамичность эмиссии парниковых газов, варьированность во времени и пространстве зависит от многих факторов: неоднородность микрорельефа, микробиологическая активность почвы, почвенное дыхание, распределение микроорганизмов, грибов, корней в верхних почвенных горизонтах, температура и влажность почвы [Бузылев, Тихонова, 2022].

Особое воздействие оказывают климатические факторы, количество осадков и температурный режим. Также на интенсивность эмиссии влияют процессы, связанные с антропогенной деятельностью (переуплотнение почвы, подтопление участков, которое может быть связано с изменением гидрологического режима территории, «запечатывание» почвы в процессе застройки и проведения магистралей и др.), в связи с чем необходимо проводить регулярный мониторинг на городских территориях с целью составления кадастра эмиссионных процессов [Тихонова и др., 2015].

Так как исследуемый объект имеет подтопление в центральной части, неоднородную структуру почвенных грунтов, неоднородность микрорельефа (перепад высот в 1,6 метра), для измерения потоков парниковых газов он был разбит на 4 равных участка, в каждом из которых находится по 4 основания для экспозиционных камер, в сумме количество точек, из которых отбирались образцы, составило 16 (рис. 4.4.4).



Рис. 4.4.4. Расположение точек отбора на Западном поле Экологического стационара

В результате проведенных измерений потоков  $N_2O$  и  $CH_4$  была выявлена значительная сезонная динамика и пространственная изменчивость в зависимости от расположения точек отбора в микрорельефе.

В ходе проведенного трехлетнего мониторинга эмиссии  $N_2O$  в весенний, летний и осенний периоды за 2019-2021 гг. была получена выраженная сезонная варьированность эмиссии оксида азота (I) и его пространственная изменчивость. Максимальные значения эмиссии наблюдались в апреле 2019 года ( $0,24 \text{ мг } N_2O/m^2$  в день), в августе 2020 года ( $0,25 \text{ мг}/m^2$ ), а также в сентябре 2021 года ( $0,28 \text{ мг}/m^2$ ). Исходя из полученных средних данных по сезонам (весенний период –  $0,13 \text{ мг } N_2O/m^2$  в день, летний –  $0,10 \text{ мг } N_2O/m^2$  в день, осенний –  $0,11 \text{ мг } N_2O/m^2$  в день),

наибольший сток эмиссии приходится на весенний и осенний периоды, что может быть связано с тем, что в этот период наблюдается наибольшее количество влаги в почве, в апреле – из-за снеготаяния, в сентябре из-за большого количества осадков (рис. 4.4.5-4.4.7).

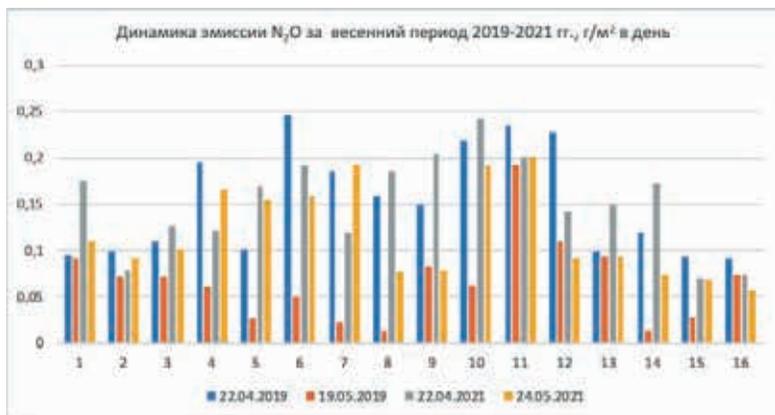


Рис. 4.4.5. Эмиссия N<sub>2</sub>O за весенний период 2019-2021 гг.



Рис. 4.4.6. Эмиссия N<sub>2</sub>O за летний период 2019-2021 гг.



Рис. 4.4.7. Эмиссия N<sub>2</sub>O за осенний период 2019-2021 гг.

Пиковые значения наблюдались в точках 6, 10, 11 и 12 (см. рис. 4.4.4). Исходя из данных, полученных за 2019-2021 годы, можно предположить, что это связано с особенностями территории исследования и влагозадержанием на участках с микропонижениями. Точки, где наблюдаются высокие значения расположены в центральной части участка, где близкое залегание грунтовых вод, в результате чего, эта часть подтапливается, особенно в весенний период, а также во время выпадения обильного количества осадков. Основываясь на мониторинговых данных, описанных в других научных работах, для максимального выделения оксида азота I, необходимо содержание влаги в почве не менее 40%.

Минимальные значения эмиссии N<sub>2</sub>O были определены в мае 2019 года (0,01 мг N<sub>2</sub>O/м<sup>2</sup> в день), в августе 2021 года (0,01 мг N<sub>2</sub>O/м<sup>2</sup> в день) а также в сентябре 2021 года (0,05 мг/м<sup>2</sup>). Минимальные значения потока наблюдались в точках 14, 15, 16 и 8 (см. рис. 4.4.4), что может быть также связано с краевым расположением точек отбора, по границе с которыми находятся более переуплотненные почвы, так как расположены тропы.

По результатам мониторинга за почвенными потоками метана в 2019-2021 г. отмечается также их сезонная изменчивость и варьированность в зависимости от расположения в рельефе. В отличие от потоков оксида азота I эмиссия метана зависит не только от влажности почвы и, следовательно, количества осад-

ков за период, но и от температуры, которая сказывается на прогревании почвы.

Анализируя полученные данные по сезонам, можно сказать, что наибольшая эмиссия метана характерна для летнего периода и составляет  $4,122 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2$  в день, для осеннего периода сток составляет  $3,306 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2$  в день, для весеннего периода характерен минимальный сток –  $3,099 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2$  в день.

Максимальное значение эмиссии метана за весь период исследования составляет  $5,574 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2$  в день и наблюдается в июле 2019 года в точке 11, минимальное значение эмиссии –  $2,035 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2$  в день в октябре 2020 года в точке 5 (рис. 4.4.8-4.4.10).



Рис. 4.4.8. Эмиссия  $\text{CH}_4$  за весенний период 2019-2021 гг.



Рис. 4.4.9. Эмиссия  $\text{CH}_4$  за летний период 2019-2021 гг.



Рис. 4.4.10. Эмиссия CH<sub>4</sub> за осенний период 2019-2021 гг.

Результаты мониторинга метана за период исследования, показали, что пиковые значения в большинстве случаев наблюдаются в точках 6,7,11 и характерны для теплого периода (май, июнь, июль, август и сентябрь). Для точек, в которых зафиксированы пиковые значения, характерны микропонижения и близкое залегание грунтовых вод, в результате чего наблюдается подтопление верхних почвенных горизонтов и, следовательно, продуцируется большой поток метана.

Минимальные значения эмиссии метана наблюдаются в апреле и октябре и характерны для точек 2, 5, 12, 13, 16, расположенных по периметру поля.

Доминирующими факторами, влияющими на максимальный эмиссионный сток метана в условиях исследуемой территории, являются наибольшая теплообеспеченность и влагообеспеченность почвы.

## Заключение

Мониторинговые исследования почв в городских условиях создают хорошие предпосылки для создания кадастра потоков парниковых газов из почвы, контроля и прогнозирования глобальных изменений как на уровне отдельных городов, так и целых областей.

Экспериментальным путем было определено, что удельный вклад  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  за весь период исследования в общую эмиссию парниковых газов относительно небольшой (по сравнению с углекислым газом), но имеет сезонную зависимость и приуроченность к особенностям рельефа на мониторинговых участках.

На значения эмиссий влияют географические, экологические и климатические факторы в совокупности. Пиковые значения эмиссии потоков  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  из почв, в большинстве случаев, наблюдаются на участках склонных к переувлажнению и лучшему прогреванию почвенных горизонтов. Следовательно, при смещении наибольших температурных значений и изменении количества осадков по сезонам максимальные показатели потоков также будут сдвигаться в сторону увеличения температуры и влажности.

### Список использованной литературы

1. Бузылев А.В. Пространственно-временное распределение влажности и динамики эмиссии парниковых газов из верхних почвенных горизонтов в пойменных залежных землях Башмаковского района Пензенской области / А.В. Бузылев, М.В. Тихонова, А.И. Руденский // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 6(54).

2. Роль городских почв в регулировании эмиссии парниковых газов в атмосферу / С.А. Кулачкова, Я.И. Лебедь-Шарлевич, Н.В. Можарова, А.М. Николаева // Городские исследования и практики. – 2018. – Т. 3, № 3(12). – С. 48-68.

3. Саржанов Д.А. Анализ пространственного разнообразия и временной динамики почвенных потоков парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) в условиях представительных урбэкоэкосистем г. Курска / Д.А. Саржанов, И.И. Васенев, Р. Валентини // АгроЭкоИнфо. – 2015. – № 6(22). – С. 6.

4. Экологическая оценка пространственно-временной изменчивости почвенной эмиссии  $\text{N}_2\text{O}$  на лесном участке природного заказника «Петровско-Разумовское» / М.В. Тихонова, А.С. Епихина, М.М. Визирская [и др.] // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. – 2013. – № 5. – С. 93-104. – EDN QIВНМ.

5. Тихонова М.В. Экологическая оценка пространственно-временной изменчивости почвенной эмиссии  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  из дерново-подзолистых почв представительной лесной экосистемы Московского мегаполиса (на примере ЛОД РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева):

специальность 03.02.08 «Экология (по отраслям)»: Дис... канд. биол. наук / Тихонова Мария Васильевна. – М., 2015. – 140 с.

6. IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller eds. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2007. – P. 137-669.

7. IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley eds. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2013. – P. 167-869.

### **Ecological assessment of spatial variation and seasonal dynamics of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from soil in urban conditions**

*Spynu M.T., Tikhonova M.V., Kuzov N.A., Patutin A.A..*

**Abstract:** The article considers the ecological assessment of the seasonality of greenhouse gas emissions such as methane and nitric oxide (I), their spatial variation depending on the microrelief, which affects the conditions of humidification in urban conditions in the plantings of Willow purpurea (*Salix purpurea*) at the Ecological Station of the Russian State Agrarian University-Moscow State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. The assessment took into account indicators such as soil temperature and humidity, which are the determining characteristics in the intensity of emission fluxes of methane and nitrogen oxide (I) from soils. The dependence of seasonality on the emission of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes in various microrelief variants in the plantings of the Purple Willow (*Salix purpurea*) in the city has been established.

## 5. Экологический мониторинг и оценка эмиссии парниковых газов в условиях водных экосистем

### 5.1. Стихийные гидрологические явления как пример климатических изменений

*Лисина И.А., Василевская Л.Н., Беленев С.А.*

**Аннотация:** При анализе условий возникновения и развития наводнения (вызванного влиянием тайфуна Хиннамнор) в сентябре 2022 г. на реке Партизанская, установлено, что на фоне климатических изменений и орографических особенностей юго-востока Приморского края выпали интенсивные осадки, связанные с развитием глубокой конвекции в системе бывшего тайфуна, которые, наряду с повышенным увлажнением поверхности водосбора в предыдущие летние месяцы и антропогенным воздействием в бассейне, явились причиной наводнения, приведшего к крупному экономическому ущербу.

Возросшие в последнее время темпы изменения климата влияют на все сферы человеческой деятельности. Человечество подчас не успевает к ним адаптироваться. Изменение климата на региональном уровне (ландшафтные зоны, бассейны рек) имеет индивидуальный характер. Наибольшую опасность воздействия на экономику и население Приморского края представляют стихийные гидрологические явления, из которых самыми критичными являются паводки, возникающие в результате ливневых дождей. Они причиняют крупный экономический ущерб (разрушение участков автомобильных дорог, множества мостов и жилых домов, гибель посевов и домашних животных).

Недостаточный учет аномального характера гидрометеорологических явлений, в том числе и по причине антропогенных воздействий на водосбор (вырубка лесов, распашка территорий) и русло реки (за счет естественного и искусственного сужения), приводит к негативным последствиям для человека и экосистемы в целом. Поэтому для Приморского края проблема изучения, обобщения и дифференциации причин, вызывающих наводнения, не теряет актуальности и имеет важное значение

для понимания современного состояния и возможностей дальнейшего социально-экономического развития этих территорий, а также для эффективного управления ими. Ниже оценены причины, обусловившие наводнение в бассейнах рек юго-восточной части Приморского края, на примере реки Партизанской.

Остаточно-пойменные почвы в долине реки Партизанской используются как земли сельскохозяйственного назначения для выращивания овощей и корнеплодов. Окруженная горами Сихотэ-Алиня долина реки хорошо защищена от ветров и туманов и не зря названа первопоселенцами Золотой – здесь плодородные черноземные земли. Именно на них в крае возрождают промышленное садоводство. В долине Партизанской очень мягкий климат и самые плодородные земли на всем побережье Японского моря.

В настоящее время в Партизанском муниципальном районе и Партизанском городском округе идет перераспределение земельного фонда, довольно значительная часть которого используется как сельскохозяйственные угодья. Сельскохозяйственными землями занято 2,3% территории (2,57% в Партизанском районе и 1,29% в Партизанском ГО). Большинство сельскохозяйственных угодий приурочено к долине р. Партизанская и ее притокам, что, вероятно, можно обосновать повышенным плодородием почв в данном месте и облегченным использованием водных ресурсов для нужд сельского хозяйства. Как правило, они находятся на незначительном удалении от населенных пунктов и/или транспортных узлов. Вне долины р. Партизанская и ее притоков сельскохозяйственные угодья не встречаются. Доля сельского хозяйства составляет 16,7% в ВРП Партизанского района и 6,5% в ВРП Партизанского ГО.

Эта территория по схеме ландшафтного районирования относится к Южно-Приморской горно-долинной провинции Сихотэ-Алиньской физико-географической области. Поверхность поймы сильно пересечена протоками и староречьями и полностью затопляется лишь во время больших паводков, при обычных паводках покрываются водой лишь отдельные пониженные участки.

В летне-осенний период на реке проходит от 2 до 7 паводков. Средняя высота паводка составляет 1-2 м. Чаще все-

го паводки следуют один за другим и, накладываясь друг на друга, обуславливают гребенчатый вид гидрографа стока. Продолжительность такого рода многомодальных паводков достигает 30–35 дней. Наиболее высокие подъемы уровня наблюдаются в августе и сентябре; они обусловлены, как правило, ливневыми осадками или продолжительными обложными дождями.

Дальневосточными учеными-гидрологами [Болгов и др., 2015; Бортин и др., 2020; Бортин, Милаев, 2014; Гарцман, Шамо́в, 2015; Катцов и др., 2022; Шамо́в и др., 2014; Motovilov и др., 2018] изучаются причинно-следственные связи возникновения и развития опасных уровней воды на реках бассейна Тихого океана. Так, по [Гарцман, Шамо́в, 2015] «временная динамика абсолютных значений максимального стока, его аномалий и многолетних циклов водности для рек прибрежной зоны Приморского края не синхронна, за исключением группы рек восточного побережья, а также р. Раздольная. Рекам побережья края свойственна сложная пространственная дифференциация опасных явлений, связанных с высокими уровнями воды, на близко расположенных реках их повторяемость различна». Подтверждением тому является наводнение в сентябре 2022 г на реке Партизанская, вызванное влиянием тайфуна Хиннамнор.

Детальный анализ возникновения наводнения на реке Партизанской включает исследование хода уровней воды, метеорологических условий в бассейне, последовательности развития синоптических процессов с учетом тайфунного влияния на развитие паводочного процесса, оценку изменения залесенности водосбора.

Согласно данным метеорологических наблюдений акватория Японского моря с 1951 по 2021 год претерпевала агрессивное воздействие тайфунов не менее 150 раз. Общее число тайфунов, которые зарождались в этот период в Тихом океане, составляет около 1,6 тысяч, т.е. около 10% из них вышли на Приморский край. Схожие с траекторией тайфуна Хиннамнор треки отмечены в 15 случаях в течение XXI века [РСМЦ Токио...]. Однако, ни один из них не вызвал выдающегося повышения уровня воды в исследуемом районе Приморья за последние 22 года.

Для нахождения гидрологической аналогии с рассматриваемой ситуацией: по рядам максимальных паводочных расходов и уровней воды, а также по траекториям движения тайфунов, вызвавших подъем уровня воды, сопровождающийся выходом воды на пойму, были подобраны годы-аналоги. В итоге детального анализа схожим по вышеперечисленным условиям оказался сентябрь 1980 года (рис. 5.1.1). Динамика повышения уровня р. Партизанская в сентябре 1980 г. аналогична таковой в сентябре 2022 г. Однако паводок в сентябре 1980 года, несмотря на более высокое значение уровня воды, превышающего предел неблагоприятного явления (501 см против 435 см в 2022 г.), не вызвал столь разрушающего наводнения, как в 2022 г.

11-13 сентября 1980 года Приморье ощутило на себе воздействие стихии, виновником которой стал тайфун «Орхид». В предшествующие выходу тайфуна месяцы, почва в бассейне была недонасыщена влагой, поскольку в июле выпало около 55% осадков от нормы, а в августе – всего лишь 35%. В сентябре же, за 3 дня выпало 166 мм, что составило 140% от нормы. В целом за месяц выпало 215 мм, что составляет 182% от нормы.

В 2022 г. обильные осадки 4-6 сентября, выпавшие на переувлажненную почву, обусловили высокое наводнение, почти достигшее уровня неблагоприятного явления (450 см) в долине р. Партизанская. Переувлажнение являлось следствием выпадения особо опасных дождей в конце июня (56 мм), в августе (56 и 64 мм) и по 24 случая, фиксированных на метеостанции Партизанск осадков, в июле и августе с высокой влажностью атмосферного воздуха (средняя за месяц относительная влажность составила 90 % – в июле и 86% – в августе).

В июле в течение 90% метеорологических сроков, а в августе в 74% – фиксировалась облачная погода, зачастую с туманами и моросью. 6 сентября 2022 г. с 7 до 19 часов был зафиксирован максимум осадков 134 мм (по метеостанции Партизанск), что составило месячную норму осадков. Вся территория бассейна реки была охвачена зоной интенсивного дождя (рис. 5.1.2).

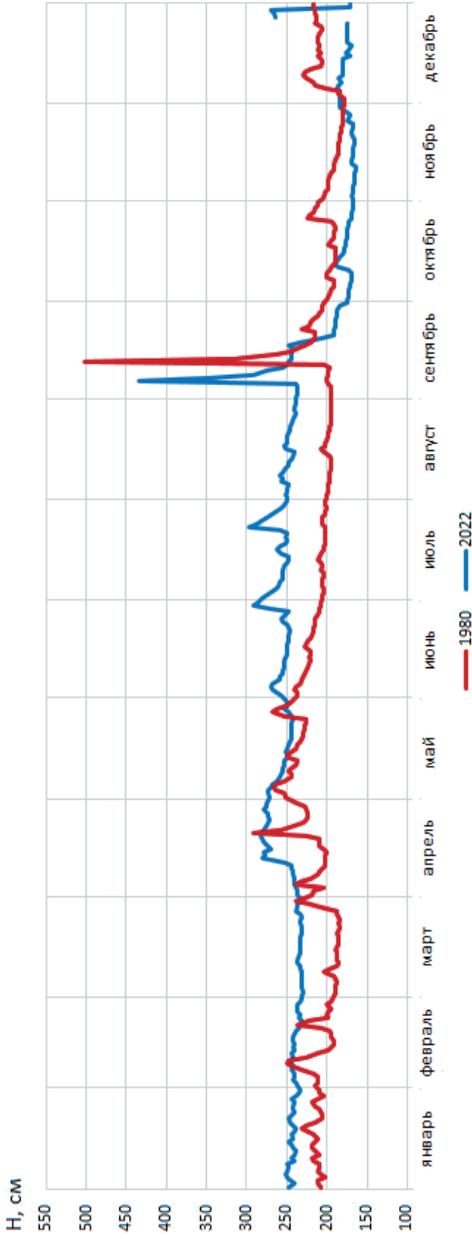


Рис. 5.1.1. График хода уровней воды в створе р. Партизанская – с. Молчановка за 1980 и 2022 гг.



шой интенсивности. Основным фактором наводнений явились дождевые осадки, в результате выхода на территорию восточной части Приморского края тайфуна Хиннамнор.

По материалам аэрологического зондирования атмосферы на станции Садгород состояние атмосферы в период выпадения очень сильных осадков характеризовалось как неустойчивое (доступная конвективная энергия составила 93, CAPE около 107 единиц), атмосфера была влагонасыщена (относительная влажность превышала 90% – что указывает на наличие облачности) в слоях от 0 до 7,5 км; общее содержание влаги во всей толще зондируемой атмосферы за три аэрологических срока составило около 102 мм.

Проведенный анализ гидрометеорологических условий развития выдающегося наводнения в сентябре 2022 г и сравнительная характеристика со сходными условиями наводнения 1980 г., обозначил задачу выяснения причин повышенного уровня нынешнего наводнения. Возможно, причина кроется в антропогенном изменении территории бассейна реки Партизанская. С этих позиций были рассмотрены изменения площадей лесов и пахоты с 2000 по 2022 гг. [Лисина и др., 2022].

Для проведения оценки изменения растительного покрова в районе водосборного бассейна р. Партизанская была подобрана пара ретроспективных спутниковых снимков ИСЗ серии «Landsat» [Gis Lab] с минимальной облачностью: были отображены сцены за 13 июля 2000 г. и за 2 июля 2022 г. с пространственным разрешением 30 м, для которых была проведена процедура атмосферной коррекции и первичной обработки.

В ходе визуальной оценки было выявлено, что в 2022 году площадь земель, занятых какой-либо деятельностью (распаханные поля, вырубка деревьев, урбанизация), занимает гораздо меньшую территорию, чем в 2000 году. К 2022 году произошло зарастание участков, которые в 2000 году были свободны от растительности. Кроме того, к 2022 году произошло зарастание окрестностей населенных пунктов, расположенных вблизи р. Партизанская и ее бассейна.

Кроме этого, на основе отображенных спутниковых сцен был рассчитан вегетационный индекс NDVI и построены индексные изображения для бассейна р. Партизанская (рис. 5.1.3).



NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности – простой количественный показатель фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). Индекс NDVI является самым распространенным для задач количественной оценки растительного покрова, он вычисляется по формуле (5.1.1).

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})}, \quad (5.1.1)$$

где  $\rho_{NIR}$  – коэффициент отражения в ближнем инфракрасном диапазоне (0.76-0.90 мкм),

$\rho_{RED}$  – коэффициент отражения в красной области спектра (0.63-0.69 мкм) [Rouse и др., 1973].

Рассчитанные значения NDVI принимают значения от -1...1. Отрицательные значения указывают на наличие водных объектов, облачности, искусственных материалов (асфальтовые дороги, бетонные сооружения и т.п.) или снежного покрова. Поверхность свободная от растительности обычно принимает значения 0,025, значения в диапазоне от 0,025 до 0,5 указывают на разреженную растительность, густая растительность принимает значения от 0,7 и выше.

Анализ результатов численных оценок также показывает увеличение площади заросших земель, которые в 2000 году были свободны от растительности.

Несмотря на увеличение в последние 22 года площади густой растительности в долине реки Партизанской, в тоже время увеличились и площади, претерпевшие хозяйственные изменения. Мероприятия, выполняемые в бассейне, влекут за собой увеличение жидкого и твердого склонового стока на водосборе. Такая ситуация была обусловлена выпавшими 4 сентября значительными осадками, непосредственно перед выходом тайфуна на территорию юго-восточного Приморья.

Таким образом, подобного отклика, в виде выдающегося наводнения, на выход тропического циклона в бассейне р. Партизанская с 1972 г. не было. В сентябре 2022 г. оно произошло на фоне изменяющегося климата, увеличения интенсивности

ливневых осадков и антропогенного влияния. В перспективе изменение количества средних летних осадков в период 2041-2060 гг. по оценкам ансамблевых моделей СМIP6 для юга Приморского края составит увеличение на 10-20% по отношению к периоду 1995-2014 гг. [Третий оценочный доклад..., 2022].

Изменчивость развития опасных гидрометеорологических процессов является существенной причиной возникновения рисков от наводнений. В силу природных особенностей функционирования гидроклиматической системы и вероятностного характера опасных гидрологических событий предсказание сценария развития наводнений является одной из сложнейших задач.

### Список использованной литературы

1. Болгов М.В., Алексеевский Н.И., Гарцман Б.И., Георгиевский В.Ю., Дугина И.О., Ким В.И., Махинов А.Н., Шалыгин А.Л. Экстремальное наводнение в бассейне Амура в 2013 году: анализ формирования, оценки и рекомендации // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 17-26.

2. Бортин Н.Н., Милаев В.М., Горчаков А.М. Влияние природных и антропогенных факторов на пропускную способность русла реки Амур у города Хабаровска при прохождении паводков // Водное хозяйство России. 2020. № 2. С. 66–82.

3. Бортин Н.Н., Милаев В.М. Исследование многолетней динамики и схема сверхдолгосрочного прогноза наводнений на реке Амур // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 4. С. 45-59.

4. Гарцман Б.И., Шамова В.В. Натурные исследования стокообразования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 6, С. 589-599.

5. Катцов В.М., Павлова Т.В., Говоркова В.А., Мелешко В.П., Спорышев П.В., Хлебникова Е.И., Школьник И.М. Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями СМIP6 // Труды ГГО. 2022. № 604. С. 5-54.

6. Лисина И.А., Василевская Л.Н., Василевский Д.Н., Крамарева Л.С., Шамилова Ю.А. Анализ причин наводнения на реке Партизанская (Приморский край) в сентябре 2022 г. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 1 (387). С. 102-119.

7. РСМЦ Токио. Центр тайфунов. <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html>

8. Сайт Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. <http://www.primgidromet.ru/>

9. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. Санкт-Петербург: Научное издание, 2022. 676 с.

10. Шамов В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Макагонова М.А. Исследования гидрологических последствий современных изменений климата в Дальневосточном регионе России // Вестник ДВО РАН. 2014. № 2. С. 15-23.

11. Gis Lab. Географические информационные системы и дистанционное зондирование. <https://gis-lab.info/qa/landsat-glovis.html>

12. Motovilov Yu G., Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Kalugin A.S., Moreido V.M., Suchilina Z.A., Fingert E.A. Assessing the Sensitivity of a Model of Runoff Formation in the Ussuri River Basin // Water Resources, Maik Nauka/Interperiodica Publishing. 2018. no. 45. P. 128-134 [in Russ.].

13. Rouse J.W. and et al. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, Washington DC. 1973. P. 309-317.

## Natural hydrological phenomena as an example of climate change

*Lisina I.A., Vasilevskaya L.N., Belenov S.A.*

**Abstract:** When analyzing the conditions of the occurrence and development of flooding (caused by the influence of typhoon Hinnamnor) in September 2022 on the Partizanskaya River, it was found that against the background of climatic changes and orographic features of the south-east of the Primorsky Krai, intense precipitation fell due to the development of deep convection in the system of the former typhoon, which, along with increased humidification of the catchment surface in previous summer The months and anthropogenic impact in the basin caused flooding, which led to major economic damage.

## 5.2. Специфика измерений эмиссии парниковых газов в ходе морских экспедиций

*Яцук А.В., Бовсун М.А., Нестерова О.В.*

**Аннотация:** Представлена актуальность и важность проведения морских измерений концентраций и потоков парниковых газов. Рассмотрены основные методические подходы к измерениям газообмена. Представлен опыт проведенных исследований по Дальневосточным морям, предложены направления для дальнейшего развития методического подхода и снижения неопределенностей в измерениях.

Общеизвестно, что Мировой океан играет огромную роль в глобальном балансе энергии, тепла, а также климатически активных газов и является их глобальным регулятором. Метан и углекислый газ являются двумя важнейшими и одними из сильнейших (после водяного пара) парниковых газов (ПГ) атмосферы Земли. Оба компонента принимают активное участие в процессах изменения климата, формировании теплового баланса атмосферы и химических преобразованиях газового состава атмосферы.

Важность океана в процессах эмиссии или поглощения углекислого газа и метана, а также учет всех возможных источников этих газов очевидна для научного мирового сообщества, которое создает интернациональные команды по изучению балансов углерода и потоков парниковых газов в прибрежных и морских экосистемах (Международная инициатива Blue Carbon, проекты SOCAT, GLODAP, MEMENTO и др.).

Атмосферные концентрации метана ( $\text{CH}_4$ ) согласно бюллетеням ВМО продолжают ежегодно увеличиваться, причем в последние годы рекордными темпами. Данный факт однозначно делает  $\text{CH}_4$  вторым по значимости парниковым газом с точки зрения воздействия на климат после двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ) [Sauniois et al., 2020].

Количественные оценки баланса метана до сих пор имеют большие неопределенности. Глобальная эмиссия  $\text{CH}_4$  Мирового океана по разным оценкам составляет: 11-18 Тг/год [Bange

et al., 1994], 6-12 Тг/год [Weber et al., 2019], 5-25 Тг/год [Sainos et al., 2016]. Кроме того, немаловажным фактом является то, что на шельфовые районы приходится около 75% глобального морского потока метана [Bange et al., 1994]. Стоит отметить, что акватория шельфа максимально уязвима к климатическим изменениям и сохранение экосистемных функций данных природных территорий является важнейшей задачей любого прибрежного государства.

Важность данного положения и высокая экологическая ответственность для Российской Федерации определяется суммарной площадью морской акватории – самой большой в мире, составляющей около 8,6 млн км<sup>2</sup> (2,4 % площади Мирового океана). Практически 45% (3,9 млн км<sup>2</sup>) приходится на акваторию шельфа, остальные 4,7 млн км<sup>2</sup> — глубоководные области. Только понимая, какие процессы, с какой интенсивностью и масштабностью происходят на данной площади можно реально понять современную роль морских акваторий РФ в процессах эмиссии/стока парниковых газов. Данные знания чрезвычайно необходимы для разработки и реализации адаптационных мероприятий и будущих природоохранных климатических проектов.

Из-за неравномерности размещения мониторинговой сети, данные о распределении парниковых газов в большинстве регионов суши и Мирового океана основаны на экстраполяции данных с ближайших станций мониторинга или данных спутникового дистанционного зондирования (ДЗЗ).

Для изучения региональных особенностей распределения парниковых газов, безусловно, представляет интерес получение данных с помощью прямых методов измерений, особенно это касается слабоизученных акваторий Мирового океана, существенно отдаленных от станций мониторинга. На основании этого, возрастает важность получения прямых данных по содержанию метана в атмосфере, гидросфере, а также изучению гидрометеорологических параметров, определяющих интенсивность и количественные характеристики газообмена на границе вода-атмосфера.

Проведение прямых попутных судовых измерений, выполненных в морских экспедициях, позволяет получить уникальную информацию о фактическом содержании парниковых газов

в приводной атмосфере, в поверхностном слое воды, изучить механизмы переноса и интенсивность газообмена, а также проанализировать предполагаемые источники аномалий.

Специфика измерений эмиссии парниковых газов в морских условиях лежит в том, что мы имеем дело с двумя подвижными средами (атмосфера и гидросфера) и крайне динамичной граничной системой вода-атмосфера. Комплекс множества влияющих факторов, определяет интенсивность процесса газообмена на границе этих двух оболочек. Кроме того, важно учитывать влияние еще одной оболочки – литосферы (морское дно), со специфическими структурно-геологическими и биогеохимическими факторами, влияющими на процессы газообмена на границе дно-вода.

Сложность и многокомпонентность представленной системы предопределяет необходимость наличия у исследователей крупного комплекса высокотехнологичного оборудования, инфраструктуры и технических средств измерений в общем случае, представленном на *рис. 5.2.1*.

Ключевым фактором в морских исследованиях также является наличие современных и многофункциональных научно-исследовательских судов, позволяющих проводить работы не только во внутренних акваториях РФ, но и в открытых частях Мирового океана.

Наличие подобного комплекса позволяет получать количественные значения концентраций и потоков парниковых газов, оценивать динамику и интенсивность процесса газообмена в системе дно-вода-атмосфера.

Нужно понимать, что оснащенность всеми методами в рамках одного коллектива или организации достаточно затруднительно и затратно, кроме того, нужно учитывать географический охват всех акваторий РФ

Это предопределяет еще одну важную задачу – взаимодействие и объединение усилий различных коллективов по всей стране, работающих по единым методикам для адекватного сравнения получаемых результатов.

В настоящий момент все имеющиеся методические подходы к измерению концентраций и потоков ПГ можно разбить на две основные группы: мобильные (непрерывные, попутные

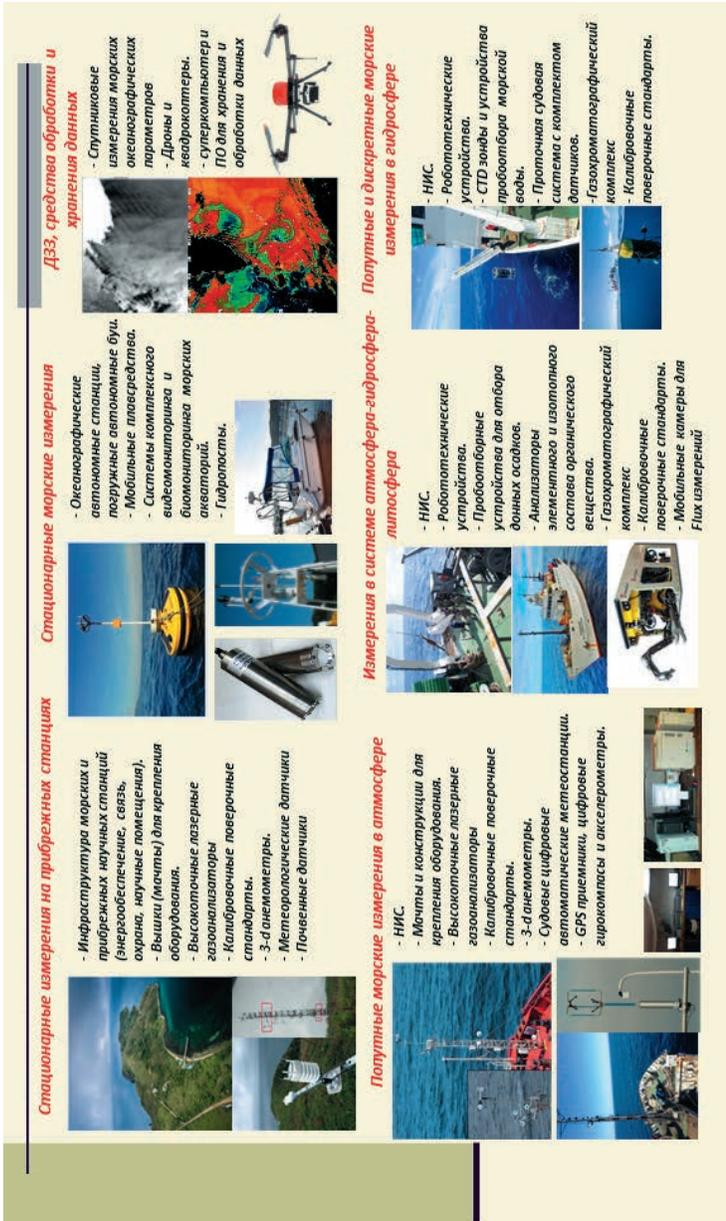


Рис. 5.2.1. Список необходимого оборудования для исследования парниковых газов в морских экосистемах

или дискретные) и стационарные. Ключевое отличие методов заключается в дискретности (скорости измерения и объеме получаемых данных) и технических устройствах (принципах детектирования и точности определения ПГ) для измерения.

К основным методикам измерений относят:

1. Метод пульсационных измерений Eddy Covariance.

2. Камерный метод.

3. Градиентный метод.

4. Классический дискретный отбор проб.

5. Аэрозондирование.

6. ДЗЗ.

7. Комбинированный (к примеру: ДЗЗ + прибрежные непрерывные стационарные измерения + мобильные дискретные измерения).

Из базовых методов анализа ПГ наибольшую распространенность имеют газовая хроматография и лазерная спектроскопия в различных модификациях. Выбор подхода к измерениям обусловлен в первую очередь технической оснащенностью научной группы, географией работ и целевыми задачами исследований. На акваториях окраинных морей востока Азии и прилегающей северо-западной части Тихого океана потоки метана в системе вода-атмосфера изменяются в широких пределах как по площади моря, так и во времени: от поглощения  $-6$  моль/( $\text{км}^2 \cdot \text{сут}$ ) до эмиссии  $500$  моль/( $\text{км}^2 \cdot \text{сут}$ ) [Мишукова и др., 2021]. Концентрации парниковых газов в атмосфере непостоянны и подвержены существенной изменчивости, как суточной, так и сезонной, что наглядно видно даже в масштабе отдельного морского рейса (рис. 5.2.2). Это нужно обязательно учитывать при дискретных измерениях и расчетах потока на границе вода-атмосфера.

На основании большой выборки данных были разработаны авторские методики расчета потока метана на границе вода-атмосфера с учетом влияния на газообмен поверхностного микрослоя [Мишукова, 2007; Мишукова, 2021б]. В международной практике расчет потока метана (в различных интерпретациях) проводится по схожим формулам, согласно работам [Wanninkhof, 1992; Wanninkhof, 2014]. Основные принципиальные и дискуссионные различия заключаются в так называемом

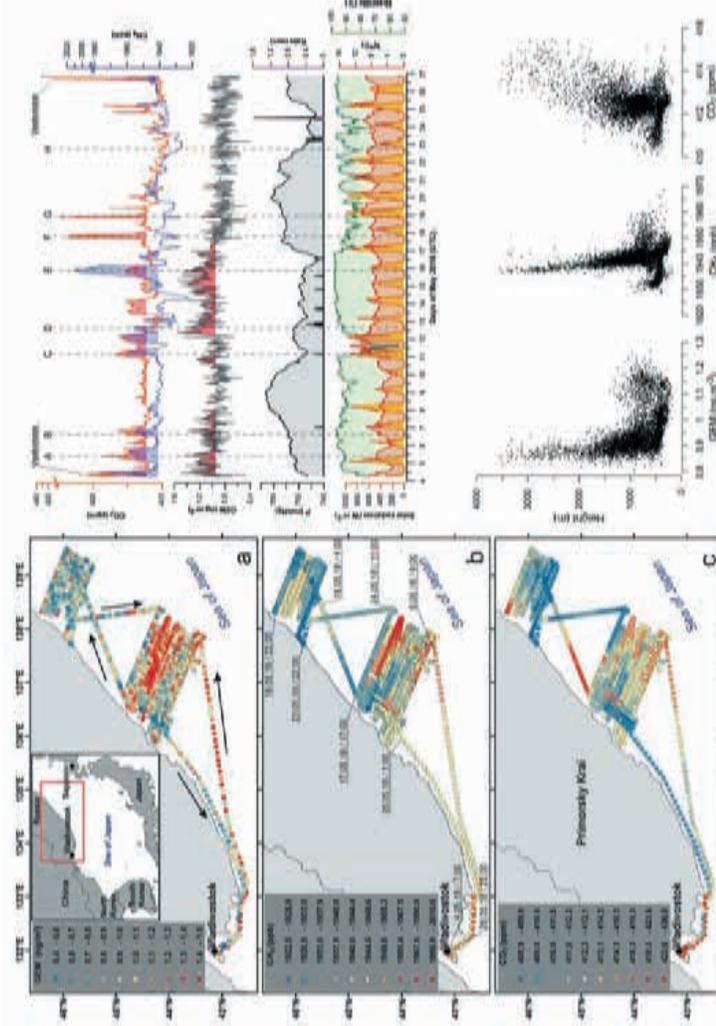


Рис. 5.2.2. Исследования концентрации парниковых газов в приповерхностном слое Японского моря в мае 2018 года и моделирование атмосферного переноса парниковых газов, углекислого газа и метана [Kalinchuk et al., 2022].

коэффициенте параметризации (скорости газообмена) на границе вода-атмосфера. Модельные расчеты данного параметра могут не всегда совпадать с реальными значениями в естественных условиях и вносят дополнительную неопределенность в расчетные значения потока. В связи с этим, важным является измерение ветровых характеристик в реальных морских условиях, что в свою очередь также усложняет техническое комплектование научной группы.

Ввиду сильной изменчивости нами впервые предложена классификация по ранжированию направления и интенсивности значений потоков метана [Мишукова, 2021а; Мишукова, 2021б], которая нуждается в дальнейшей апробации для различных акваторий Мирового океана.

Для снижения имеющихся неопределенностей в морских измерениях парниковых газов необходимо:

- дальнейшее проведение исследований в морских экспедициях с вовлечением новых районов и научных групп для более полного географического охвата всех морских акваторий РФ;
- создание эталонных площадок в рамках морских карбоновых полигонов в различных физико-географических условиях и опорных мониторинговых геотраверсов;
- организация сети прибрежных станций контроля уровня парниковых газов и основных гидрометеорологических параметров;
- внедрение в практику морских экспедиционных работ новейших методов автоматического и непрерывного мониторинга потоков парниковых газов на основе высокоточного газоаналитического оборудования.

Реализация данных мероприятий позволит оценить современный вклад морской акватории РФ в мировой баланс парниковых газов и усилить роль российских исследователей в исследовании Мирового океана.

*Работа выполнена при поддержке Государственного задания Минобрнауки России №FZNS-2023–0019.*

## Список использованной литературы

1. *Bange H.W., Bartell U.H., Rapsomanikis S., Andreae M.O.* Methane in the Baltic and the North Seas and a reassessment of marine emissions of methane // *Global Biogeochem. Cycles.* – 1994. – V. 8 (4). – P. 465-480.
2. *Saunio M., Bousquet P., Poulter et al.* (2016). The global methane budget 2000–2012. *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 697-751.
3. *Saunio M., Stavert A.R., Poulter B. et al.* (2019). The Global Methane Budget 2000–2017, *Earth System Science Data*, 2016. V. 8. P. 697-751.
4. *Kalinchuk V., Yatsuk A., Marchesini L.B., Lopatnikov E., Nesterova O., Valentini R., Aksentov K.* (2022) The first simultaneous and continuous underway measurements of atmospheric gaseous elemental mercury, carbon dioxide and methane in the marine boundary layer: Results of cruise study in the Sea of Japan in May 2018. *Atmospheric Pollution Research* 13(7).
5. *Wanninkhof R.* (1992). Relationship between gas exchange and wind speed over the ocean. *J. Geophys. Res.* 97:7373-7381.
6. *Wanninkhof R.* (2014). Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnol. Oceanogr.: Methods* 12: 351–362.
7. *Weber T., Wiseman N.A., Kock A.* Global ocean methane emissions dominated by shallow coastal waters. *Nat Commun* 10, 4584 (2019).
8. *Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф.* Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода–атмосфера в Дальневосточном регионе. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 159 с.
9. *Мишукова Г.И., Яцук А.В., Шакиров Р.Б.* Распределение потоков метана на границе вода-атмосфера в различных районах Мирового океана // *Геосистемы переходных зон.* – 2021а. – Т. 5. № 3. – С. 240-254.
10. *Мишукова Г.И., Яцук А.В., Шакиров Р.Б., Сырбу Н.С., Валитов М.Г., Пономарева А.Л., Мишукова О.В.* Потоки метана на границе вода-атмосфера и газогеохимические аномалии в донных отложениях северо-западной части Японского моря // *Геология и геофизика.* – 2021б. – Т. 62. № 12. – С. 1686-1704.

## Natural hydrological phenomena as an example of climate change

*Yatsuk A.V., Bavsun M.A., Nesterova O.V.*

**Abstract:** The paper presents the relevance and importance of conducting marine measurements of greenhouse gas concentrations and fluxes. The main methodological approaches to measuring gas exchange are considered. The experience of conducted research in the Far Eastern seas is presented, directions for further development of the methodological approach and reducing uncertainties in measurements are proposed.

### 5.3. Гранулометрический состав и органическое вещество аквапочв Уссурийского залива

*Брикманс А.В., Нестерова О.В., Бовсун М.А.*

**Аннотация:** В работе представлено содержание органического углерода в аквапочвах Уссурийского залива, а также распределение фракций гранулометрического состава принадлежность которых дана по разным классификациям. Исследования показали, что классификация гранулометрического состава, которая дана по треугольнику Ферре более детальная для связывания органического углерода с гранулометрическим составом аквапочв.

Японское море юга Дальнего Востока имеет большое влияние не только на экосистему в целом, но и на формирование окружающей нас прибрежной инфраструктуры. При исследовании Японского моря большое значение имеют такие факторы почвообразования, как рельеф, вода, микро- и макроорганизмы, растительность, и почвообразующие породы. Результатом взаимодействия этих факторов почвообразования являются специфичные типы почв – Аквапочвы.

Аквапочвы это биокосные тела, формирующиеся на дне водоемов под воздействием почвообразовательных процессов, в результате которых формируется органоминеральный комплекс – гумус [Ивлев, Нестерова, 2004]. В настоящее время существует большое количество исследований, связанных с историей и вариациями термина аквапочвы. Например, исследования В.А. Серышева, который признавал факт существования подводных почв и для составления почвенной классификации ввел понятие «аквазем» [Серышев, 1986]. В работах Бахнова В.К. [Бахнов, 2002] рассматривается предположение разделения акваземов на горизонты. В Soil Taxonomy также дано определение похожему термину Aquents [Soil Taxonomy, 1999], которые формируются в болотах, на берегах озер, в поймах рек где почвы постоянно насыщены водой и по гранулометрическому составу преимущественно имеют песчаную фракцию. В связи с этим исследование аквапочв с точки зрения науки почвоведения

является значимым для возможного дальнейшего их определения и нахождения в классификации почв.

Объектами исследования являются аквапочвы, отобранные в ходе экспедиции 85 рейса на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» с помощью геологических колонок с глубин от 11 м до 72,7 м (глубина, без учёта осаднения судна 4,25 м), проводилось послойное изучение образцов до 10 см в шельфовой зоны Уссурийского залива, расположенного в заливе Петра Великого Приморского края.

В исследуемых образцах определяли гранулометрический состав аквапочв методом Н.А. Качинского [Качинский, 1965] и содержание органического углерода по В.А. Серышеву [Серышев, 1986]. Схема-карта отбора образцов представлена на рисунке 5.3.1.

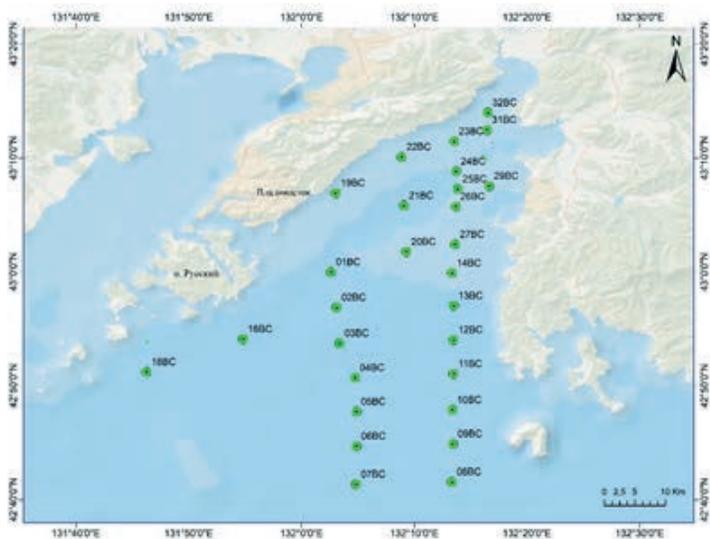


Рис. 5.3.1. Карта-схема отбора образцов аквапочв Уссурийского залива Японского моря

В настоящее время существует проблема в методике определения различных физических, физико-химических и химических свойств этого объекта исследования. Если относить данный объект исследования к аквапочвам, то методики определения свойств таких почв должны быть почвенными.

В связи с этим для исследования аквапчв с точки зрения связи с процессами почвообразования были выбраны два базовых параметра: гранулометрический состав и органический углерод. При диагностике данных почв по гранулометрическому составу в настоящее время существует проблема с выбором метода, а также с классификационной принадлежностью этих почв относительно содержащихся фракций.

Исследования аквапчв показали, что классификации [Безруков, Лисицын, 1960] морских обломочных осадков по гранулометрическому составу они преимущественно относятся к алевролитам крупным (рис. 5.3.2), что показывает достаточно узкий диапазон в распределении фракций, и нет четкой ясности с точки зрения связи с процессами почвообразования.

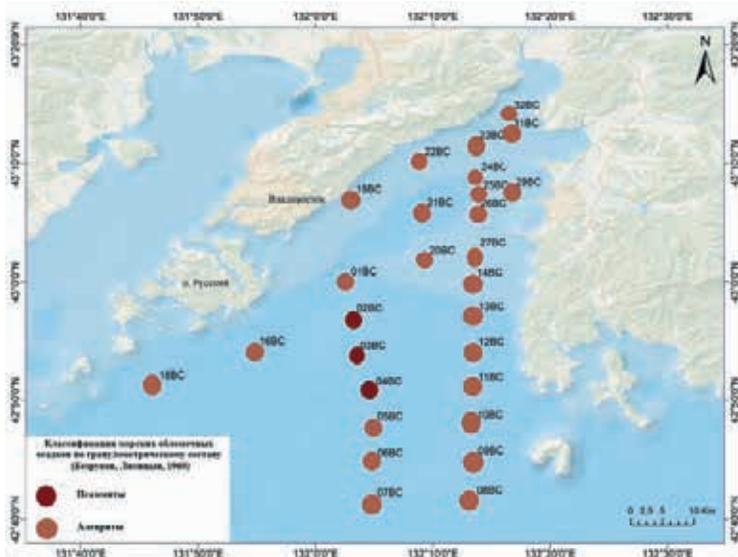


Рис. 5.3.2. Классификация морских обломочных осадков по гранулометрическому составу по Безрукову П.Л., Лисицыну А.П [Безруков П.Л., Лисицын А.П., 1960]

По классификации Н.А. Качинского аквапчвы удалось более детально рассмотреть по соотношению фракций физического песка и физической глины гранулометрического состава, где исследования аквапчв преимущественно показали супесь в

большинстве исследуемых образцов (рис. 5.3.3). Также наблюдалось утяжеление гранулометрического состава в точках, расположенных вблизи береговых линий и терригенных зон, что позволило их диагностировать как легкий суглинок и легкую глину (точки 21, 23, 24, 25, 31,32).

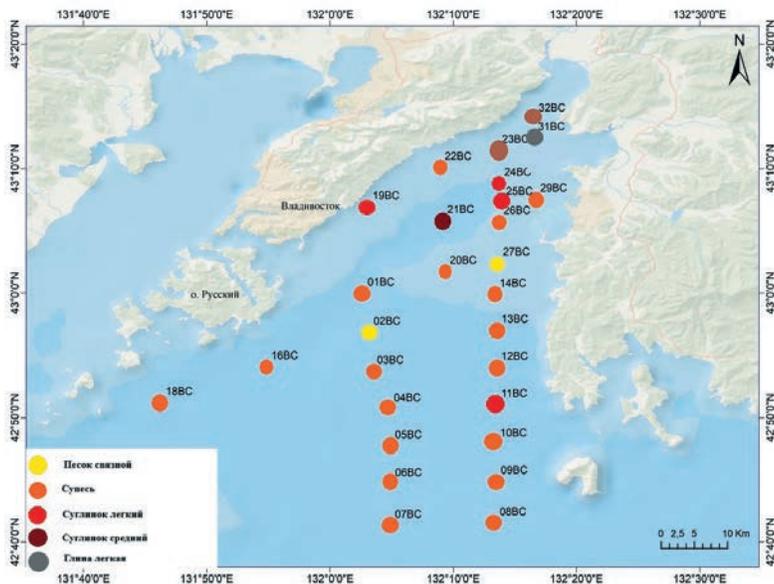


Рис. 5.3.3. Распределение фракций гранулометрического состава по классификации Н.А. Качинского [Качинский, 1958]

Международная классификация с точки зрения связи гранулометрического состава и органического вещества оказалась более удобной для понимания распределения содержания и накопления углерода. Поскольку более подробно показала распределение почвенных частиц в шельфовой зоне Уссурийского залива. Исследования показали, что большинство исследуемых точек, которые удаленные от берега по гранулометрическому составу относятся к опесчаненному суглинку. В четырех образцах (14, 18, 20, 27) гранулометрический состав показал песок. Утяжеление гранулометрического состава до суглинка и пылеватого суглинка (рис. 5.4.4) приходится на точки (21, 23, 24, 31, 32), которые находятся вблизи берега и где присутствует терригенный сток.



Рис. 5.4.4. Классификация по треугольнику Ферре (цит. по [Шейн Е.В., 2005])

По распределению органического углерода аквапочвы условно были разделены на следующие градации: до 0,5%, от 0,5 до 1,0% и более 1%. Таким образом содержание органического углерода более 1,00% приходится на точки преимущественно вблизи берега (21, 23, 24, 25, 31, 32), где проходит транзитная зона и впадают в бухту реки Артёмовка, Петровка, Гамаюнова, Шкотовка, его содержание варьирует от 1,18% до 1,94%, что также подтверждается утяжелением гранулометрического состава в этих точках. Минимум органического углерода (менее 0,50%) в аквапочвах приходится на четыре точки 14, 18, 20, 27, а также это единственные точки, в которых наблюдается легкий гранулометрический состав (песок). Большинство образцов по содержанию органического углерода варьируют от 0,50 до 1,00%. В целом содержание органического углерода в донных отложениях не достигает 2,00% не зависимо от дна рельефа и приближенности точек отбора к берегу.

Таким образом для исследования аквапочв классификация гранулометрического состава по треугольнику Ферре являет-

ся более детальной, чем для морских обломочных осадков по Безрукову П.Л., Лисицыну А.П. и по классификации Н.А. Качинского, поскольку позволяет более наглядно показать связь с содержанием органического вещества в аквапочвах.

*Работа выполнена при поддержке Государственного задания Минобрнауки России №FZNS-2023-0011.*

### Список использованной литературы

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 478 с.
2. *Бахнов В.К.* Почвообразование: взгляд в прошлое и настоящее (биосферные аспекты). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 117 с.
3. *Безруков П.Л., Лисицын А.П.* Классификация осадков современных морских водоемов // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. 1960. – Т. 32. – С. 3-14.
4. *Ивлев А.М.* К вопросу об изучении аквапочв / А.М. Ивлев, О.В. Нестерова // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2004. – № 4(116). – С. 47-52. – EDN HPNBQR.
5. *Качинский Н.А.* Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения // Изд-во академии наук СССР. – 1958. – С. 160.
6. *Серышев В.А.* О классификации и номенклатуре подводных почв // Почвоведение. – 1986. – № 5. – С. 27-34.
7. *Шейн Е.В.* Курс физики почв: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
8. *Jury W.A., Gardner Wiford R., Gardner Walter H.* Soil physics. John Wiley & Sons. Inc, 1991. 293 p. 18.
9. *Mathieu Cl., Pieltain F.* Analyse physique des sols. Paris, New York, Lavoisier, TecDoc. Londres. 1998. 275 p.

### Texture and organic matter of aquapools of the Ussuri Bay

*Brickman A.V., Nesterova O.V., Bovsun M.A.*

Abstract: The paper presents the content of organic carbon in aquasoils of the Ussuri Bay, as well as the distribution of fractions of granulometric composition, the affiliation of which is given according to different classifications. Studies have shown that the classification of granulometric composition, which is given according to the Ferre triangle, is more detailed for the binding of organic carbon with the granulometric composition of aquasoils.

**Васенев И.И., Александров Н.А., Андреева И.В., Барахов А.В., Бауэр Т.В.,  
Беленев С.А., Бовсун М.А., Брикманс А.В., Бузылев А.В., Бурачевская М.В.,  
Васенев П.И., Василевская Л.Н., Габечая В.В., Гилёв А.М., Дудникова Т.С.,  
Жигалева Я.С., Илюшкова Е.М., Козьменко С.В., Кузов Н.А., Лисина И.А.,  
Манджиева С.С., Минкина Т.В., Нестерова О.В., Патугин А.А.,  
Рыбачук Н.А., Сакара Н.А., Семаль В.А., Серегин И.А., Спыну М.Т.,  
Степанов А.В., Сушкова С.Н., Тихонова М.В., Черникова Н.В.,  
Ярославцев А.М., Яцук А.В.**

**Наилучшие доступные почво- и углерод-сберегающие  
технологии природопользования, экологического  
мониторинга и контроля**

Подписано в печать 11.12.23

Формат 60 × 90/16. Гарнитура «Times New Roman»

Печ. л. 15,0. Тираж 500 экз., заказ №

Издатель – Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего  
образования «Российский государственный аграрный университет –  
Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева»

Публикуется в авторской редакции

Изготовлено – ООО «ВИН»

117556, Москва, ул. Фруктовая, д. 7., корп. 1

