

На правах рукописи

КУРИЦИН ИВАН НИКОЛАЕВИЧ

**ВЫЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СХЕМ ОБРАБОТКИ ПОЧВ  
НЕТРАДИЦИОННЫМ УДОБРЕНИЕМ НА ОСНОВЕ  
ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД**

03.00.16 – экология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

КАЗАНЬ – 2009

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии факультета географии и экологии  
Государственного образовательного учреждения высшего профессионального  
образования «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина».

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор  
Селивановская Светлана Юрьевна

Официальные оппоненты: доктор биологических наук,  
профессор Алимова Фаридка Кашифовна  
кандидат биологических наук,  
Петров Андрей Михайлович

Ведущая организация: Башкирский государственный университет

Защита диссертации состоится «10» декабря 2009 г. в 14.30 часов на заседании  
Диссертационного Совета ДМ 212.081.19 при ФГОУ ВПО «Казанский государственный  
университет им. В.И. Ульянова-Ленина» по адресу: 420008, Республика Татарстан,  
г.Казань, ул. Кремлевская, д. 18, ауд 211 (восточное крыло главного здания).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им Н.И. Лобачевского  
Казанского государственного университета по адресу: г.Казань, ул.Кремлевская, д.35.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета,  
кандидат биологических наук, доцент



Р.М.Зелеев

**Актуальность работы.** Любое антропогенное воздействие на экологические системы приводит к их изменению, уровень и направление которого зависит от интенсивности воздействия. К числу таких антропогенных воздействий относится применение нетрадиционных почвенных удобрений, в качестве которых используют осадки сточных вод (ОСВ) и продукты, приготовленные на их основе. ОСВ содержат большое количество органогенных элементов, что позволяет применять их в качестве нетрадиционного удобрения при выращивании сельскохозяйственных культур, рекультивации горных выработок, в зеленом хозяйстве городов, в лесном хозяйстве и ремедиации почв (McGrath et al., 1995; Романов, 1997; Giller et al., 1998; Ros et al., 2006; Calbrix et al., 2007; Fernandez et al., 2009). Однако в составе ОСВ присутствуют и токсичные неорганические и органические соединения, что существенно ограничивает их использование (Евилевич, Евилевич, 1988; Hue, 1995; Касатиков с соавт., 1992, 1997, 1999; Page, 1996; Латыпова с соавт., 2002). Снизить содержание токсикантов возможно за счет предварительной обработки ОСВ методом компостирования. Особое внимание должно быть уделено способам утилизации ОСВ станций очистки крупных городов, так как именно эти ОСВ содержат большое количество токсикантов. В этом случае предпочтение следует отдавать такому способу утилизации ОСВ, который бы не повлек за собой поступление токсикантов в органы растений, используемые в пищу. Однако растения – не единственные компоненты экосистем, испытывающие воздействие токсичных компонентов ОСВ. В первую очередь влиянию подвержены почвенные микроорганизмы. В то же время именно микроорганизмы ответственны за биологическую трансформацию веществ в почве, которая делает питательные вещества доступными для растений, и за устойчивое функционирование почв в целом. Почвенное микробное сообщество играет ключевую роль и в восстановлении нарушенных почв, поэтому информация об особенностях функционирования почвенного микробного сообщества способствует более точному управлению почвенными процессами, целью которого является улучшение качества почв.

Традиционно улучшение качества почв оценивают на основе химических характеристик, определяемых аналитическими методами (Садовникова, Касатиков, 1995; Wong, 2002; Минеев с соавт., 2003). Однако с точки зрения выполнения почвой функций среды обитания, более адекватными и релевантными являются характеристики, устанавливаемые биологическими методами. В настоящее время состояние микробного сообщества оценивается на основании ряда показателей, набор которых определяется каждым автором индивидуально (Brookes, 1995; Ананьева с соавт., 2002, Perez-de Mora et al., 2006; Bastida et al., 2008). Однако такой подход, более грамотный с точки зрения экологии, менее однозначен в силу вариабельности биологических параметров. Более того, при принятии практических решений, например, выборе эффективной схемы обработки почвы, возникает проблема

интерпретации результатов. Возможным решением этой проблемы является использование математических методов, которые в почвенной микробиологии пока не нашли широкого применения (Vepsalainen et al., 2001; Водопьянов с соавт., 2004; Иутинская, 2005; Macdonald et al., 2007).

**Цель настоящей работы** – анализ эффектов от использования компоста из осадков сточных вод в качестве нетрадиционного удобрения для восстановления нарушенных почв на микробные сообщества серой лесной почвы и сеянцы сосны обыкновенной и разработка алгоритма выявления устойчиво эффективных схем обработки почв компостом.

#### **Задачи исследования.**

1. Определить в ОСВ станции очистки г. Казани и компостах на их основе содержание металлов и органического вещества и оценить пригодность компостов для использования в качестве нетрадиционного удобрения.

2. В условиях многолетнего полевого эксперимента в лесном питомнике проанализировать влияние внесения компостов из ОСВ на некоторые характеристики серой лесной почвы.

3. Оценить воздействие компостов из ОСВ, применяемых в качестве почвоулучшителя по различным схемам (разные дозы и периодичность), на число и биометрические показатели сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*).

4. Изучить эффекты обработки серой лесной почвы лесного питомника компостами из осадка сточных вод на общую микробную биомассу, респираторную и потенциальную азотфиксирующую активности микробного сообщества.

5. Исследовать влияние компостов на дегидрогеназную и уреазную активности серой лесной почвы.

6. Разработать алгоритм для выявления устойчиво эффективных схем обработки почв нетрадиционным удобрением и реализовать его в виде программы.

**Научная новизна.** В условиях многолетнего мелкоделяночного эксперимента изучена динамика ответной реакции микробного сообщества серой лесной почвы на внесение компостов из ОСВ крупного промышленного города и впервые показано, что эффект от их внесения выражается в асинхронной флуктуации биологических показателей почв, что свидетельствует о невозможности определения эффективности применения нетрадиционного удобрения на основе анализа однократно отобранной пробы и по одному из показателей. Впервые предложен алгоритм и создана программа для выявления устойчиво эффективных схем обработки почв нетрадиционным удобрением по комплексу показателей с учетом их временной динамики. Программа позволяет статистически достоверно оценивать полученные результаты на основе построения нелинейных моделей поведения каждого из показателей во времени для контрольной схемы, расчета вероятностных характеристик соотношения значений показателей опытной и контрольной схемы и последующего анализа данных методом

кластерного анализа. Полученные результаты вносят вклад в развитие представлений о функционировании сообществ почвенных микроорганизмов в условиях одновременного воздействия благоприятных (внесение дополнительного питательного субстрата) и неблагоприятных (металлы) антропогенных факторов.

**Практическая значимость работы.** Полученные в диссертационной работе результаты являются основой способа восстановления качества обедненных почв за счет применения нетрадиционных удобрений. Предложенный способ, включающий компостирование ОСВ и применение компостов в качестве улучшителя обедненных почв лесных питомников использован в ГБУ «Пригородный учебно-опытный лесхоз» Республики Татарстан. По результатам проведенных исследований разработана компьютерная программа для выявления устойчиво эффективных схем обработки почв нетрадиционным удобрением. Предлагаемая программа опробована для выявления оптимальной схемы обработки почв компостами из ОСВ станции очистки г.Казани.

Результаты исследований используются при проведении практических работ по курсам «Агроэкологический мониторинг» и «Управление в обращении с отходами» на кафедре прикладной экологии Казанского государственного университета (КГУ) и на кафедре лесных культур и защиты леса Казанского государственного аграрного университета (КазГАУ).

Полученные результаты могут быть использованы при разработке мер по минимизации негативного влияния ОСВ на окружающую среду и совершенствованию отдельных аспектов экологического нормирования хозяйственной деятельности человека.

**Положения, выносимые на защиту:**

– эффект от внесения компостов из ОСВ на микробную биомассу, респираторную и потенциальную азотфиксирующую активности микробного сообщества серой лесной почвы выражается в увеличении амплитуды и асинхронизации флуктуации анализируемых параметров;

– предложенный алгоритм, включающий получение экспериментальных данных об изменении показателей состояния микробного сообщества, построение нелинейных моделей поведения каждого из показателей во времени для контрольной схемы, расчет вероятностных характеристик соотношения значений показателей в опытных и контрольной схемах и последующий анализ данных методом кластерного анализа, позволяет выявлять устойчиво эффективные схемы обработки почв нетрадиционным удобрением.

**Личный вклад автора в работу** состоит в выполнении экспериментальной части диссертации, обсуждении результатов и формулировании выводов на их основе. Соавторами публикаций являются научный руководитель – д.б.н., проф. Селивановская С.Ю., д.х.н., проф., заведующая кафедрой прикладной экологии Латыпова В.З., руководитель института прикладной микробиологии Гиссенского Университета (ФРГ) проф. С. Шнель, участвовавшие в обсуждении результатов. В создании программы для

математической обработки результатов принимал участие к.ф.-х.н., д.б.н., проф. А.А. Савельев. При проведении мелкоделяночных опытов в лесном питомнике консультации оказывал д.с.-х.н., проф. Н.М. Ведерников.

**Апробация работы.** Материалы работы докладывались на XI, XII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов – 2004», «Ломоносов – 2005» (Москва, 2004, 2005); Международной студенческой научно-практической конференции «Устойчивое развитие: экологические, экономические, социальные и правовые аспекты» (Екатеринбург, 2005); XLIII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Пермь, 2005); Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы аграрной науки и пути их решения» (Ижевск, 2005); XII, XIII, XVII Международной молодёжной научной конференции «Туполевские чтения» (Казань, 2005, 2007, 2009); VI, VII Республиканской конференции «Актуальные экологические проблемы Республики Татарстан» (Казань, 2004, 2007); Всероссийской конференции «Лес, лесной сектор и экология республики Татарстан» (Казань, 2006); Международной научной конференции «Экология и биология почв: проблемы диагностики и индикации», (Ростов-на-Дону, 2006); I Экологическом форуме Прикамья (Набережные Челны, 2007); III Международной конференции «Микробное разнообразие: состояние, стратегия сохранения, биотехнологический потенциал», (Пермь, 2008); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Фундаментальные достижения в почвоведении, экологии, сельском хозяйстве на пути инновациям» (Москва, 2008); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований» (Казань, 2009); XIV Международной конференции «Ферменты микроорганизмов в биотехнологии и медицине» (Казань, 2009).

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в 5 статьях и 16 тезисах докладов.

**Структура и объём диссертации.** Работа изложена на 143 страницах, содержит 10 таблиц и 43 рисунка, состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов исследования, результатов и обсуждения, выводов, списка литературы, включающего 254 источников, из которых 171 на иностранном языке, и приложения.

**Благодарности.** Автор выражает огромную признательность научному руководителю – д.б.н., проф. С.Ю. Селивановской за поддержку и внимательное отношение к работе; д.х.н., проф., зав. каф. прикладной экологии факультета географии и экологии КГУ В.З. Латыповой и сотрудникам кафедры за помощь и теплую рабочую атмосферу; д.б.н., к.ф.-м.н., проф. каф. моделирования экосистем факультета географии и экологии КГУ А.А. Савельеву и к.х.н. ст.н.с. Д.А. Семанову за помощь в проведении статистической обработки результатов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Обзор литературы

В обзоре литературы приведены основные характеристики ОСВ и современные способы их обработки. Представлены данные об использовании ОСВ в качестве удобрения.

Большая часть обзора литературы посвящена рассмотрению публикаций, о влиянии ОСВ и продуктов их переработки на микробные сообщества почв. Проведен анализ распространенности методов оценки состояния микробных сообществ – микробной биомассы, респираторной, азотфиксирующей и ферментативной активностей почв. Выявлено, что применение ОСВ оказывает как положительное, так и негативное воздействие на микробные сообщества, обусловленное составом ОСВ, почвенными характеристиками и способами обработки почвы.

Отдельный раздел посвящен анализу публикаций, рассматривающих методы математического анализа результатов полевых опытов, который свидетельствует о растущей потребности в данных методах исследований. Однако эти публикации единичны, более того, в литературе не представлены подходы, позволяющие интерпретировать совокупность результатов, полученных различными биологическими методами в динамике долговременных полевых экспериментов.

### Глава 2. Объекты и методы исследования

Объекты исследования, схема мелкоделяночного эксперимента. Объектами исследования служили почвы, микробные сообщества серой лесной почвы, сеянцы сосны обыкновенной *Pinus sylvestris L.*, выращиваемые в ГБУ «Пригородный учебно-опытный лесхоз».

Для обработки почвы использовали компосты из ОСВ, образующихся на станции очистки сточных вод г. Казани. Компосты готовили в полевых условиях из ОСВ, опилок и торфа в соотношении 1:1:1 (по массе). Первое внесение компоста осуществляли в дозах 30, 60 и 90 т га<sup>-1</sup> весной 1999 года. Второе внесение компоста из ОСВ осуществляли весной 2001 года. На половину участков, обработанных в 1999 году, компост вносили повторно в дозах 25, 50 и 75 т га<sup>-1</sup> (варианты 25, 50, 75). На вторую половину участков в данную ротацию компост не вносили (варианты 30, 60, 90). Для того, чтобы оценить эффект более высоких доз компоста на новые, необработанные ранее участки, компост вносили в дозах 100, 150, 175 т га<sup>-1</sup> (варианты 100, 150, 175). В 2003 году участки были вспаханы и оставались под паром. Третью обработку почвы компостом проводили весной 2004 г. На участки вариантов 30, 60, 90 вносили компост в дозах 30, 45 и 60 т га<sup>-1</sup> соответственно. Аналогичное внесение осуществляли на участки вариантов 25, 50 и 75 (30, 45 и 60 т га<sup>-1</sup> соответственно). На участки вариантов 100, 150 и 175 компосты не вносили. Все опытные участки были заложены в четырех повторностях и расположены рандомизированно.

Весной 1999, 2001, 2004 годов участки были засеяны семенами сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. Семена сосны обыкновенной (2 класс, всхожесть 94-95%) высевали сеялкой СКП-6 по 5-строчной схеме. Норма высева – 1,2 г на 1 м строчки. Сеянцы сосны выращивали в течение 2 лет (ротация сеянцев сосны – 2 года), затем сеянцы выкапывали и пересаживали в природные лесные массивы.

Аналитические методы. Характеристики ОСВ, компостов и почв устанавливали в соответствии с методами, указанными в ГОСТ. Влажность определяли как потерю веса после высушивания образца при 105<sup>0</sup>С в течение 24 ч (ГОСТ 25713-85, 1985). Содержание органического углерода ( $C_{орг}$ ) определяли мокрым окислением 0,167 М  $K_2Cr_2O_7$  с последующим титрованием 0,1М  $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  (ГОСТ 26213-91, 1992). Значения pH определяли потенциометрическим методом в водном (1:1) и солевом 1,0 М KCl (1:25) экстрактах (ГОСТ 26483-85, 1985). Содержание азота ( $N_{общ}$ ) определяли по методу Кьельдаля (ГОСТ 26715-85, 1985). Валовое содержание металлов в ОСВ, компостах и почвах определяли после мокрого окисления образца конц.  $HNO_3$  и 3%  $H_2O_2$ . Оценку содержания металлов проводили методом атомной абсорбционной спектроскопии на приборе AAnalyst-300 (Perkin-Elmer, Nalwalk, USA; Методические ..., 1989).

Определение характеристик сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Учет сеянцев, сохранившихся к осени, и выход стандартных растений проводили в трех средних строчках в конце первого и второго вегетационных сезонов каждой ротации посевов сосны. В конце вегетационного сезона отбирали сеянцы сосны (по 100 штук каждого варианта), очищали от остатков почвы, высушивали, отделяли по корневой шейке надземную часть от корневой и измеряли высоту и биомассу надземной части.

Методы оценки состояния почвенного микробного сообщества. С каждого участка отбирали по пять почвенных образцов с глубины 0 – 10 см методом конверта. Образцы освобождали от корневых остатков, просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм и до начала анализа хранили в бумажных пакетах при 4<sup>0</sup>С.

Определение суммарной микробной биомассы ( $C_{микр}$ ) проводили экстракционно-фумигационным методом (ISO 14240-2, 1997). Базальную респираторную активность ( $V_{basal}$ ) почвенного микробного сообщества определяли по количеству выделяемого  $CO_2$  титрованием после его поглощения щелочью (Bioassays..., 1995). Метаболический коэффициент ( $qCO_2$ ) рассчитывали как отношение дыхания необогащенной почвы к уровню микробной биомассы (Anderson, Domsch, 1993). Потенциальную активность азотфиксации почвенного микробного сообщества определяли ацетиленовым методом (Методы..., 1991; Гарусов с соавт., 1998). Дегидрогеназную активность почвы определяли методом Ленарда, основанным на колориметрическом измерении формазана (ТТФ), образующегося в результате восстановления 2,3,5-трифенилтетразолий хлорида (ТТХ) (Хазиев, 2005). Уреазную активность определяли методом Галстяна, основанным на колориметрическом определении аммиака реактивом Несслера (Хазиев, 2005).

Статистические методы анализа. Измерение всех параметров проводили не менее чем в трехкратной повторности. Достоверность различий полученных результатов оценивали с использованием коэффициента Стьюдента ( $P > 0,95$ ). Для имитации результатов экспериментов был применен метод рандомизации (Efron, Tibshirani, 1993, Davison, 1997). Для описания изменений показателей во времени были использованы нелинейные обобщенные аддитивные модели (generalized additive models, GAM) (Hastie, 1990). Для объединения массивов данных в группы применяли кластерный анализ (Айвазян с соавт., 1989). Кластеризацию данных осуществляли методом Варда (Дюран, Оделл, 1977). Для написания программы использовали программный пакет R (R: A language ..., 2000).

### Глава 3. Результаты и обсуждение

#### Характеристика ОСВ станции очистки г. Казани и компостов на их основе

Исходные ОСВ и полученные на их основе компосты, применяемые для восстановления качества почв, были охарактеризованы по содержанию органического вещества и металлов (табл. 1).

Таблица 1

#### Характеристика осадков сточных вод и компостов компостовна их основе

Показатель	ОСВ для компоста второго внесения	Компост (второе внесение)	ГОСТ Р. 17.4.3.07-2001	Directive 86/278/CEE
$C_{орг}$ , %	41±9	35±6	не менее 20	не менее 30
$N_{общ}$ , %	2,6±0,5	1,7±0,3	не менее 0,6	не менее 0,6
$pH_{КС1}$	6,8±0,2	6,1±0,1	5,5-8,5	5,5-8,5
Влажность, %	80±4	54±4	не более 80	не более 85
$Cr$ , мг кг <sup>-1</sup>	89±19	67±12	1000	–
$Cd$ , мг кг <sup>-1</sup>	23±5	12±2	30	20-40
$Ni$ , мг кг <sup>-1</sup>	250±53	77±14	400	300-400
$Cu$ , мг кг <sup>-1</sup>	1311±275	312±45	1500	1000-1750
$Pb$ , мг кг <sup>-1</sup>	254±15	166±37	500	750-1200
$As$ , мг кг <sup>-1</sup>	0,41±0,08	0,1±0,02	20	–
$Zn$ , мг кг <sup>-1</sup>	2105±442	646±74	3500	2500-4000
$Hg$ , мг кг <sup>-1</sup>	0,81±0,17	0,2±0,03	15	3

Установлено, что содержание органического вещества (по  $C_{орг}$ ) в компостах изменяется в интервале от 27 до 37 % , что соответствует требованиям, предъявляемым ГОСТ 17.4.3.07-2001 (2001). Аналогичные данные о содержании  $C_{орг}$  в компостах, приготовленных из ОСВ, представлены в зарубежной литературе (Ros et al., 2006; Larcheveque et al., 2008; Bastida et al., 2008).

Установлено, что в приготовленных компостах присутствуют металлы. В наибольшем количестве представлены медь и цинк – 158–312 и 520–646 мг кг<sup>-1</sup> соответственно. Наименьшим содержанием характеризовались мышьяк и ртуть – 01–0,2

мг кг<sup>-1</sup>. Сравнение содержания металлов в исходных ОСВ и компостах, приготовленных на их основе, показывает, что в компостах их содержание снижается в 1,5–4,2 раза (табл. 1). Такой результат является преимуществом данного метода обработки. Аналогичный эффект отмечен в ряде работ (Ros et al., 2006; Busby et al., 2007; Bastida et al., 2008; Ramirez et al., 2008). Полученные компосты по содержанию металлов соответствуют требованиям ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 (2001) и могут быть использованы в качестве нетрадиционного удобрения. Содержание металлов в полученных нами компостах также соответствует требованиям Директивы стран ЕС 86/278/СЕЕ (1986).

#### Влияние компостов из ОСВ на качество серой лесной почвы

Содержание  $C_{\text{орг}}$  в исходной почве лесного питомника находилось в пределах 0,42 – 0,71%. Почва характеризовалась слабощелочным значением рН ( $pH_{\text{H}_2\text{O}}$  7,6–7,7,  $pH_{\text{KCl}}$  7,1 – 7,2). При анализе гранулометрического состава выявлено содержание физической глины в количестве 16%. Соотношение песка, пыли и ила составило 29, 68 и 3%. Совокупность полученных результатов позволила отнести почву к песчано-пылевой супеси. Анализ содержания металлов в почве лесного питомника показал, что их значения не превышают установленных нормативов (ГН 2.1.7.2041-06).

Первое внесение компоста не привело к достоверному увеличению содержания металлов в почве. При втором внесении компоста обнаружено увеличение в образцах ряда вариантов содержания Cd, Cr, Cu и Pb относительно почв необработанных участков в 1,8–2,7, 1,1–2,4, 1,7–2,5 и 1,1–2,5 раз соответственно. Анализ содержания металлов в почве после третьего внесения компоста из ОСВ показал, что увеличение их содержания по сравнению с контрольным вариантом обнаружено в некоторых вариантах в случае кадмия (1,2–2,0 раз), хрома (1,1–2,0 раз), меди (1,1–1,4 раз), цинка (1,1–1,4 раз) (табл. 2). В целом необходимо отметить, что содержание ни одного из анализируемых металлов не достигло уровня ПДК, а также значений, установленных в странах ЕС в качестве предельных для почв, обработанных ОСВ (McGrath et al., 1995). Полученные результаты в основном согласуются с данными, представленными в литературе. Так, ряд авторов свидетельствуют о том, что внесение осадков не приводит к накоплению металлов выше ПДК (Минеев 1990; Касатиков с соавт., 1997; Smith, 2008; Delibacak et al., 2009). В то же время в литературе представлены данные как об увеличении содержания металлов в почве выше ПДК (Касатиков с соавт., 1992; Кутукова, Плеханова, 2002; Минеев с соавт., 2003), так и об отсутствии увеличения вовсе (Мерзлая с соавт., 1995; Cornu et al., 2001).

В почвах, обработанных компостом, было также определено содержание органического вещества. К концу второго вегетационного сезона после первого внесения компоста уровень  $C_{\text{орг}}$  во всех вариантах опыта снизился практически до уровня контрольного варианта. Во вторую ротацию посевов сосны для тех участков, на которые производилось внесение компоста (варианты 25, 50, 75, 100, 150 и 175), обнаружено увеличение содержания  $C_{\text{орг}}$  в почве, прямо пропорциональное дозе

внесения. В образцах почв, отобранных на участках с внесением компоста в 1999 году (варианты 30, 60 и 90), содержание  $C_{орг}$  находилось на уровне контрольного варианта. При оценке содержания  $C_{орг}$  после третьего внесения компоста установлено, что на участках вариантов 25, 50, 75, 30, 60 и 90 его уровень оказался выше по сравнению с контрольным вариантом, на который компост не вносили (табл. 2). В то же время на участках, где компост не вносили (вариант 100, 150 и 175), содержание органического вещества оказалось незначительно выше контрольного варианта. В целом полученные результаты согласуются с данными, представленными в литературе о том, что внесение ОСВ способствует увеличению содержания органического вещества почв (Касатиков с соавт., 1999; Кутукова, Плеханова 2002; Минеев с соавт., 2003; Ros et al., 2006; Enwall et al., 2007).

Таблица 2

Содержание органического вещества ( $C_{орг}$ , %) и металлов ( $mg\ kg^{-1}$ ) в почвах при третьем внесении компоста

Вариант	$C_{орг}$ , %	Металлы					
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Контр	0,9±0,1	0,20±0,01	22,1±3,2	7,5±1,9	18,1±3,9	12,3±1,8	34,6±5,2
30	1,1±0,1	0,40±0,06	43,4±10,1	12,2±3,3	20,4±6,3	14,2±2,9	42,3±11,3
60	1,1±0,1	0,40±0,02	38,2±9,2	11,0±2,8	21,5±5,6	15,4±2,3	43,5±9,2
90	1,4±0,1	0,24±0,05	24,4±5,6	7,4±1,4	19,0±2,9	11,8±1,9	48,5±10,1
25	1,2±0,1	0,22±0,02	25,8±6,2	7,6±1,7	18,3±5,1	12,9±2,5	35,4 ± 8,5
50	1,3±0,1	0,30±0,06	33,7±6,9	9,5±2,2	17,5±4,7	14,4±3,3	41,9±10,7
75	1,5±0,2	0,40±0,07	32,2±4,2	10,7±3,8	18,9±3,9	14,4±3,1	40,5±11,2
100	1,0±0,1	0,31±0,03	30,1±8,1	8,8±1,7	15,4±3,5	12,3±2,5	31,6±7,8
150	1,1±0,1	0,36±0,06	29,5±7,3	9,3±2,1	17,0±4,7	12,7±2,1	31,9±4,2
175	1,0±0,3	0,35±0,07	21,4±5,1	7,5±2,4	18,9±6,8	11,9±1,4	35,4±5,6

Влияние компоста из осадка сточных вод на сеянцы сосны обыкновенной *Pinus sylvestris L.*

Внесение компостов во все три ротации посевов сосны приводило к увеличению числа сеянцев на 1 погонный метр строчки по сравнению с контрольным вариантом (рис. 1). Минимальное количество сеянцев, как в контрольном, так и в опытных вариантах, выявлено во вторую ротацию посевов сосны. Это связано с холодной и сухой погодой во время посева, обусловившей низкую всхожесть и высокий отпад растений.

Внесение компоста в первую ротацию посевов не повлияло на высоту и биомассу надземной части растений. Однако при определении морфометрических показателей

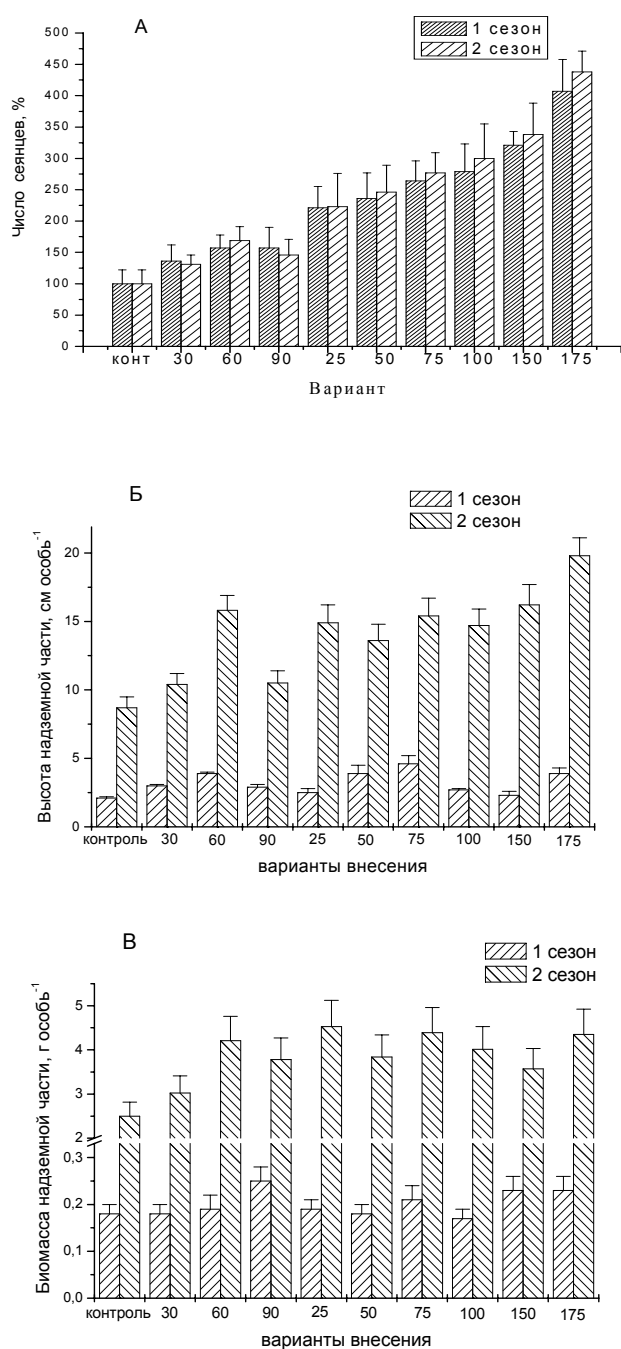


Рис 1. Влияние компоста из ОСВ на количество (А), высоту (Б) и биомассу (В) сеянцев сосны во вторую ротацию посевов

сеянцев сосны второй ротации было выявлено, что сеянцы вариантов 25, 50, 75, 100, 150 и 175 оказались выше по сравнению сеянцами контрольного варианта: максимальное превышение в первый вегетационный сезон демонстрировали сеянцы варианта 75 (2,2 раз), а во второй вегетационный сезон – варианта 175 (2,3 раз). Биомасса сеянцев опытных вариантов была выше таковой в контрольном варианте в среднем в 1,6 раза. (рис. 1). Стимулирующий эффект в отношении высоты и биомассы растений выявлен и для сеянцев третьей ротации посевов сосны вариантов 25, 50, 75, 30, 60 и 90. В случае вариантов 100, 150 и 175 обнаруженный положительный эффект не был достоверным. Совокупный анализ результатов определения числа и биометрических характеристик сеянцев, полученных в трех ротациях, показывает, что наибольший положительный эффект внесение компоста оказало во вторую ротацию посевов сосны. Вероятно, это может быть связано с тем, что благотворный эффект от внесения компоста в большей мере проявляется на фоне неблагоприятных климатических условий.

### Влияние компоста из ОСВ на микробное сообщество серой лесной почвы

Первая ротация посевов сосны. В пробах необработанной почвы, отобранных в течение первой ротации посевов сосны, обнаружен достаточно низкий суммарный запас микробной биомассы ( $C_{\text{микр}}$ ) – 0,2–1,1 мг  $C_{\text{микр}} \text{ г}^{-1}$ . Внесение компоста вызывало увеличение уровня биомассы до 1,7, 2,1 и 6,3 мг  $C_{\text{микр}} \text{ г}^{-1}$  для вариантов 25, 50 и 75 соответственно. К концу второго вегетационного сезона уровень микробной биомассы опытных вариантов оказался сопоставимым с уровнем биомассы в контрольном варианте.

Уровень  $V_{\text{basal}}$  в контрольном варианте изменялся в пределах 0,08–0,52  $\text{мгСО}_2\text{-С г}^{-1} \text{24ч}^{-1}$ . Для участков с внесением компоста выявлены асинхронные колебания большой амплитуды, особенно в начальный период исследования, что, скорее всего, связано с внесением доступного органического вещества, приводящего к дестабилизации микробного сообщества.

На протяжении всего периода исследования метаболический коэффициент в образцах контрольной почвы изменялся в интервале 0,15–0,48  $\text{мгСО}_2\text{-С мг}^{-1} \text{24ч}^{-1}$ . Максимальные значения  $q\text{СО}_2$  обнаружены на ранних этапах исследования в вариантах 50 и 75 и обязаны как увеличению респираторной активности, так и снижению уровня микробной биомассы, вызванной гибелью интродуцированных микроорганизмов. Однако последующее снижение значений метаболических коэффициентов до уровня, а в ряде случаев и ниже контрольного варианта к концу второго вегетационного сезона, свидетельствует о стабилизации почвенного сообщества.

Оценка азотфиксирующей активности показала, что в большинстве проб, отобранных на участках 50 и 75, ее уровень оказался выше по сравнению с контрольным вариантом в 3–7 раз, а к концу сезона снижался до его уровня. Активность азотфиксации в пробах варианта 25 находилась на уровне либо ниже контрольного варианта.

Вторая ротация посевов сосны. Уровень  $S_{\text{микр}}$  в образцах серой лесной почвы, отобранных на участках контрольного варианта в течение двух вегетационных сезонов второй ротации посевов сосны, изменялся от 0,12 до 0,49  $\text{мгС}_{\text{микр}} \text{г}^{-1}$  почвы, причем максимальные значения обнаружены в пробах, отобранных весной (рис. 2). Второе внесение компоста в умеренных дозах (варианты 25, 50 и 75) увеличивало уровень микробной биомассы, а к концу первого вегетационного сезона уровень биомассы

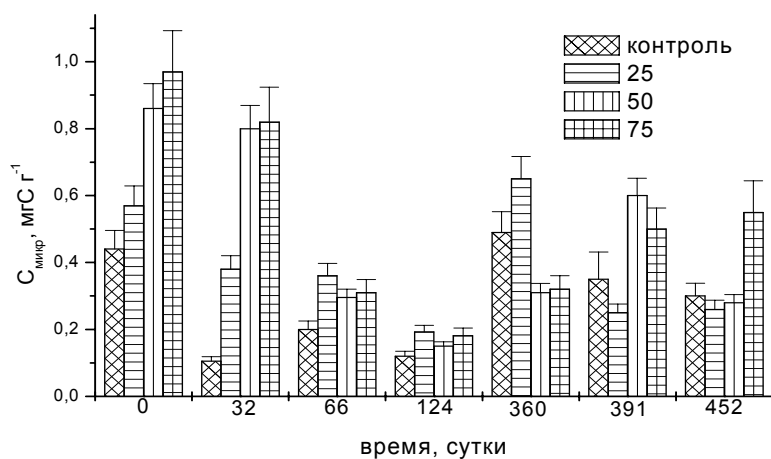


Рис. 2. Изменение уровня микробной биомассы в контрольной почве и в почве вариантов 25, 50 и 75

оказался аналогичен таковому в контрольном варианте. Во второй вегетационный сезон выявлено отсутствие дозозависимого поведения анализируемого параметра и синхронности в его изменениях. Внесение высоких доз компоста (варианты 100, 150 и 175) также привело к увеличению уровня микробной биомассы почвенного микробного сообщества. Эффект наблюдали на протяжении двух вегетационных сезонов, однако для различных вариантов максимальные значения биомассы отмечены в разные периоды времени. Отсутствие стимулирующего эффекта на биомассу выявлено в вариантах 30, 60 и 90. Различия в

эффектах, вызываемых компостами, связаны, во-первых, с исчерпанием питательного субстрата, что подтверждается результатами определения биомассы в вариантах 30, 60 и 90. Во-вторых, эти различия могут быть обусловлены присутствием в составе компостов металлов. Однако при сопоставлении значений содержания металлов в образцах почв нашего эксперимента с представленными в литературе концентрациями, снижающими уровень микробной биомассы (McGrath et al., 1995), установлено, что их содержание оказалось ниже, что свидетельствует том, что металлы не оказывают решающего влияния на микробную биомассу.

Респираторная активность микробного сообщества серой лесной почвы контрольного варианта изменялась в интервале от 0,02 до 0,26  $\text{mgCO}_2\text{-C g}^{-1} 24 \text{ ч}^{-1}$ . Повторное внесение компоста (варианты 25, 50 и 75) привело к снижению респираторной активности сообщества в первый месяц, а во втором вегетационном сезоне ее уровень в опытных вариантах либо превышал либо достоверно не отличался от контрольного варианта. Ни в одном из образцов почвы вариантов 100, 150 и 175 уровень респирации не оказался достоверно ниже, а на 66 и 124 сутки исследования он был выше такового контрольного варианта. Минимальный уровень респираторной активности был обнаружен в вариантах 30, 60 и 90, отражающих последствие компоста, и был сопоставим с уровнем дыхания в контрольном варианте. Именно эти варианты демонстрировали колебания активности, синхронные с таковыми в контрольном варианте.

Стимулирующий эффект в течение первых лет после внесения компостов из ОСВ отмечается авторами ряда публикаций, которые связывают это с благотворным влиянием дополнительного органического субстрата (Peres-Piqueres et al., 2006; Enwall et al., 2007; Domene et al., 2009). В то же время эффект увеличения респираторной активности может быть связан и с присутствием токсичных компонентов, в частности металлов, увеличение концентрации которых создает дополнительную энергетическую нагрузку на почвенные микроорганизмы, связанную с механизмом формирования толерантности (Witter, Dahlin, 1995; Giller et al., 1998). Согласно же данным других авторов, присутствие металлов в почве может вызывать снижение почвенного дыхания (Dar, 1994, 1997; Rost, 2001). Сравнение данных, представленных в литературе (McGrath et al., 1995; Moreno et al., 2003), с содержанием металлов в образцах исследуемых почв показывает, что в нашем случае содержание металлов ниже значений, при которых наблюдались существенные нарушения в энергетическом метаболизме микробных клеток. Таким образом, некоторое увеличение респираторной активности следует рассматривать как результат внесения дополнительного энергетического субстрата.

Повторное внесение компоста (варианты 25, 50 и 75) не привело к достоверному увеличению  $q\text{CO}_2$  по сравнению контрольным вариантом. Значения  $q\text{CO}_2$ , существенно ниже таковых в контрольном варианте, на протяжении обоих вегетационных сезонов обнаружены при анализе почвенных образцов 100, 150 и 175. При анализе результатов, полученных для вариантов последствие компоста (30, 60 и 90), обнаружено, что в

целом значения  $q\text{CO}_2$  были соизмеримы с таковыми в контрольном варианте. Поскольку согласно данным литературы, увеличение метаболического коэффициента используется как универсальный индикатор почвенного стресса под влиянием металлов (Brooks, 1995, Благодатская с соавт., 2001), отсутствие его существенного увеличения в нашем случае может свидетельствовать об отсутствии негативного влияния компоста на почвенное микробное сообщество.

Уровень азотфиксации в образцах вариантов 25, 50 и 75 достоверно не отличался от такового в контрольном варианте за исключением варианта 75 на 66 сутки измерения (рис. 3). В случае внесения высоких доз компоста (варианты 100, 150 и 175) обнаружено ингибирование азотфиксации, наиболее выраженное в первый месяц после внесения. К концу второго вегетационного сезона достоверных различий в уровне азотфиксации

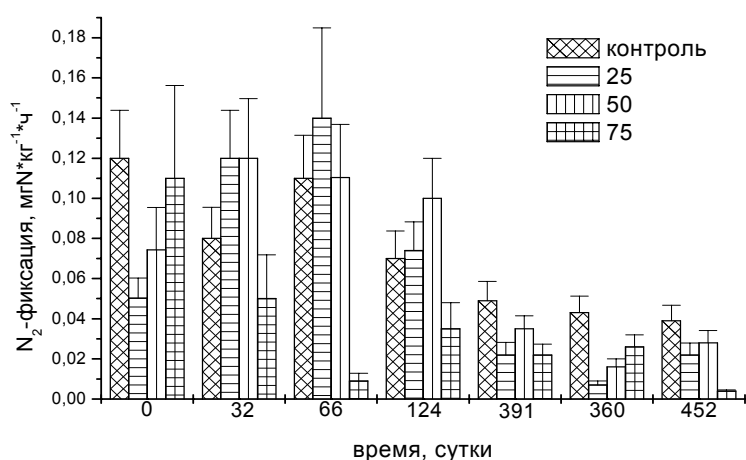


Рис. 3. Изменение азотфиксирующей активности в контрольной почве и в почве вариантов 25, 50 и 75

контрольного и опытных вариантов не было выявлено. В вариантах 30, 60 и 90 уровень азотфиксирующей активности в первый вегетационный сезон и в начале второго оказался ниже по сравнению с уровнем в контрольном варианте, однако по большей части это снижение было недостоверным.

Дегидрогеназную и уреазную активности почвы определяли в первый вегетационный сезон второй ротации сосны. Установлено, что характер изменения дегидрогеназной активности идентичен как в контрольном, так и в опытных вариантах. Внесение компоста не привело к достоверному увеличению дегидрогеназной активности, однако не было выявлено и достоверного негативного влияния компонентов компоста. Аналогичный эффект от внесения компостов был обнаружен нами при анализе изменения уреазной активности почвы. Поскольку результаты определения ферментативной активности почв не позволили нами выявить какие-либо различия в опытных и контрольном варианте, в дальнейшем эти показатели не использовали.

Третья ротация посевов сосны. Уровень микробной биомассы в образцах почв, отобранных на участках контрольного варианта, несущественно изменялся в течение всего периода исследования ( $0,8-1,0 \text{ мгС}_{\text{микр}} \text{ г}^{-1}$ ) (рис. 4). На протяжении двух вегетационных сезонов уровень биомассы вариантов 25, 50 и 75 был выше либо ниже контрольного варианта. Отсутствие выраженных закономерностей установлено и для остальных опытных вариантов. Скорее всего, отсутствие существенного увеличения в

микробной биомассе при третьем внесении компоста может быть связано с тем, что уровень микробной биомассы на участках контрольного варианта во время третьей ротации посевов сосны оказался в среднем в 2 раза выше по сравнению с таковым в первую и вторую ротации. Это, вероятно, обусловлено тем, что в год, когда участки находились под паром, почва была перепахана и контрольные участки получили органическое вещество с опытных участков.

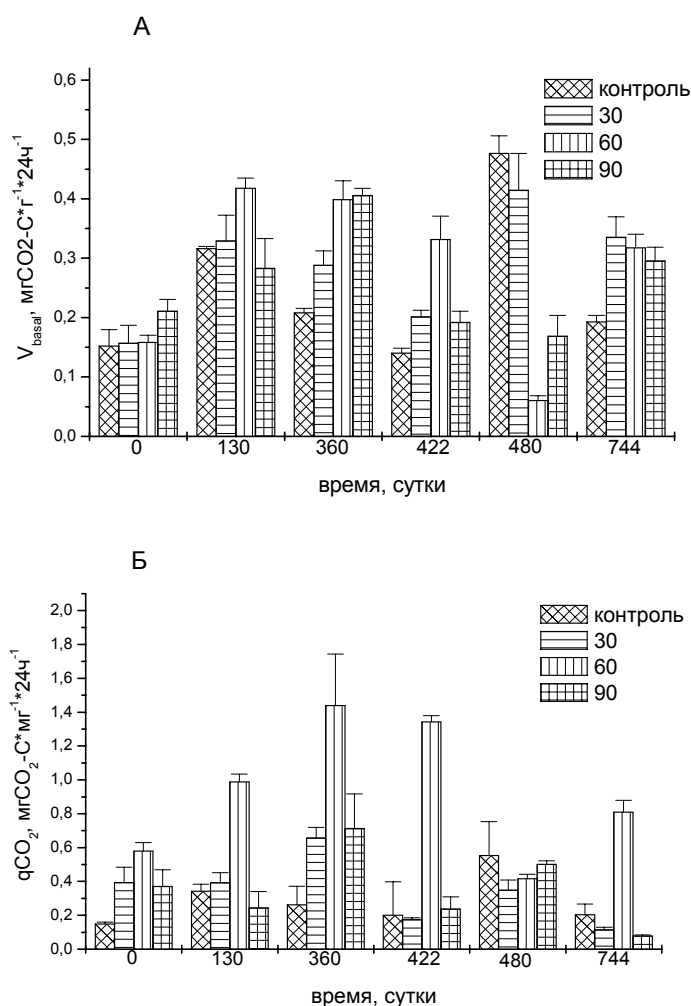


Рис. 4. Изменение респираторной активности (А) почвенного микробного сообщества и метаболического коэффициента (Б) в контрольной почве и в почве вариантов 30, 60 и 90

Третье внесение компоста на участки вариантов 50 и 75 привело к увеличению минерализующей активности микроорганизмов, причем стимулирующий эффект от внесения компоста наблюдали на протяжении обоих вегетационных сезонов. Во всех образцах почв вариантов 30, 60 и 90, отобранных на протяжении всего периода исследования, за исключением образцов 480 суток, уровень респираторной активности в опытных образцах оказался выше уровня в контрольном варианте (рис. 4). На участках вариантов 100, 150 и 175, которые в третью ротацию не обрабатывали компостом, не было обнаружено каких-либо выраженных зависимостей ответного отклика микробного сообщества от дозы внесения.

Невысокие значения респираторной активности при достаточно постоянном уровне микробной биомассы обусловили достаточно низкий и мало изменяющийся в динамике опыта метаболический коэффициент в почвенных образцах контрольного варианта ( $0,15 - 0,55 \text{ мгСО}_2\text{-С мгС}^{-1} \text{ 24ч}^{-1}$ ). При внесении компоста в вариантах 25, 50 и 75 наблюдалось дозо-зависимое увеличение  $q_{\text{CO}_2}$ , связанное с аналогичным увеличением респираторной активности. В дальнейшем значения  $q_{\text{CO}_2}$  в опытных вариантах были как выше, так и ниже таковых в контрольных образцах. Низкий уровень микробной биомассы обусловил высокий метаболический коэффициент в варианте 60. В остальных же случаях этой группы вариантов значения метаболического

коэффициента находились на уровне контрольного варианта. Существенное увеличение значений метаболического коэффициента выявлено, в почвенных образцах вариантов 100, 150 и 175, отобранных на 130 сутки исследования. Во всех остальных пробах, отобранных в разные моменты времени, значения  $qCO_2$  существенно не отличались от контрольного варианта.

Анализ изменений уровня фиксации атмосферного азота, показывает, что закономерности, обнаруженные нами в первые две ротации посевов сосны, в целом сохраняются и при третьем внесении компоста. Внесение компоста приводило к достоверному снижению уровня азотфиксации в вариантах 25, 50 и 75. Однако во второй вегетационный сезон уровень азотфиксации в опытных вариантах оказался в основном сопоставим с уровнем контрольного варианта. Меньший ингибирующий эффект на азотфиксирующую активность почвы оказало внесение компоста в вариантах 30, 60 и 90. В отличие от предыдущих групп вариантов, колебания уровня азотфиксирующей активности в почвах вариантов 100, 150 и 175 и контроле были синхронными.

Полученные нами данные подтверждают известное положение о флуктуационном характере почвенных процессов. Как свидетельствуют приведенные в работе результаты, антропогенное вмешательство в виде вносимого компоста приводит к изменению процессов, связанному с необходимостью адаптации сообщества, и колебательные процессы начинают различаться по фазе. Результатом является то, что в опытных вариантах наблюдается не синхронное с контролем изменение параметров, что не дает возможность сделать заключение о преимуществе того или иного способа обработки почвы по одномоментно отобранной пробе почвы и существенно усложняет процесс интерпретации результатов, особенно при такой задаче, как выбор оптимального варианта обработки почвы. Возможным решением этой проблемы является использование математических методов.

#### Разработка алгоритма статистической оценки эффективности различных схем внесения компоста из ОСВ

При разработке алгоритма в качестве исходных данных были использованы значения показателей - микробной биомассы, респираторной и азотфиксирующей активностей.

Для формализации анализа влияния компоста из ОСВ на микробное сообщество почв рассматривали модель развития случайного процесса во времени. Обозначили через  $X^0(t) = \langle x_1^0(t), x_2^0(t), x_3^0(t) \rangle$  вектор численных показателей состояния микробного сообщества контрольной площадки в момент времени  $t$ , где  $x_1(t)$  – респираторная активность,  $x_2(t)$  – азотфиксирующая активность почв и  $x_3(t)$  – уровень микробной биомассы. Аналогично, через  $X^m(t) = \langle x_1^m(t), x_2^m(t), x_3^m(t) \rangle$  обозначили вектор численных показателей состояния микробного сообщества опытной площадки в момент времени  $t$ , на которой применяется  $m$ -я схема внесения компоста. Причем значения каждого

параметра представлены тремя повторностями  $x_i^m(t) = (x_i^m(t,1), x_i^m(t,2), x_i^m(t,3))$ . Считается, что наблюдаемый процесс имеет систематическую и случайную (стохастическую) составляющие, причем случайные составляющие, соответствующие опытной и контрольной площадкам, предполагаются независимыми, а процесс, соответствующий контрольной площадке не стационарным (микробиота почвы не находится в стабильном состоянии). Значения показателей состояния рассматриваются как независимая (по времени и повторностям) выборка и могут быть использованы для моделирования распределения вероятностей значений для контрольной площадки в произвольный момент времени.

Поскольку традиционно количество повторностей в биологических исследованиях невелико, на следующем этапе было проведено увеличение объема выборки методом рандомизации – получение новых сочетаний значений показателей в каждый момент времени за счет выборки с возвратом из имеющихся; это возможно в силу указанной ранее независимости этих значений. Таким образом, было получено 999 «траекторий во времени» для численных значений показателей состояния микробного сообщества, согласованных с имеющимися данными. В результате вектор численных показателей состояния в момент времени  $t$  микробного сообщества опытной площадки был представлен следующим образом:  $x_i^m(t) = (x_i^m(t,1), x_i^m(t,2), \dots, x_i^m(t,n))$ .

Для дальнейшего анализа совокупности данных, значения всех параметров были переведены в относительные единицы. Для этого были построены модели изменения трех анализируемых параметров в контрольном варианте. Поскольку изменение показателей во времени нелинейно, были использованы нелинейные обобщенные аддитивные модели (рис. 5).

Математическое ожидание значений состояния  $E[x_i^0(t)] = g_i^0(t)$  есть гладкая функция от времени, т.е. модель имеет вид  $x_i^0(t) = g_i^0(t) + \varepsilon$ ,  $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ , где  $g_i^0(t)$  – гладкая функция,  $\sigma_\varepsilon^2$  – дисперсия ошибки.

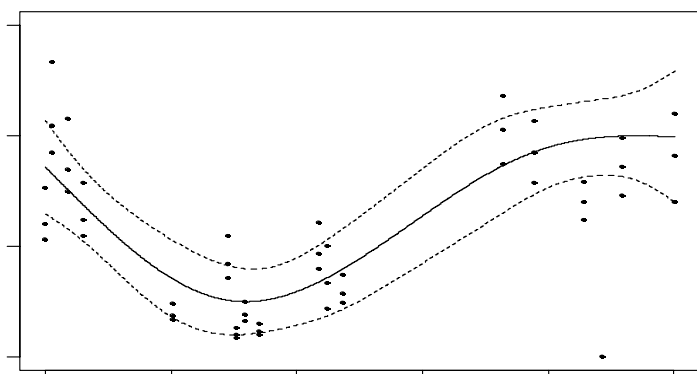


Рис. 5. Генерализованная аддитивная модель изменения микробной биомассы в контрольном варианте

Поскольку для построения функции  $g_i^0(t)$  используются выборочные значения, то вместо истинной функции  $g_i^0(t)$  мы получаем функцию  $f_i^0(t)$ , которая может быть представлена в виде  $f_i^0(t) = g_i^0(t) + \delta_f$ ,  $\delta_f \sim N(0, \sigma_f^2)$  где  $\sigma_f^2$  – дисперсия среднего (прогноза). Считается, что ошибки  $\delta_f$  и  $\varepsilon$  независимы,

поэтому их дисперсии складываются. Далее была определена вероятность того, что значение параметра в опытном варианте будет отличаться от значений контрольного варианта. Для этого рассчитывали остатки от генерализованной аддитивной модели:

$$x_i^0(t) = f_i^0(t) + \delta_f + \varepsilon_i^0, \quad d_i^m(t) = x_i^m(t) - f_i^0(t), \quad d_i^0(t) \sim N(0, \sigma_f^2 + \sigma_\varepsilon^2), \quad I_i^m(t) = F_0(d_i^m(t)),$$

где  $x_i^m(t)$  – численный показатель состояния в момент времени  $t$  микробного сообщества опытной площадки (для контроля  $m=0$ ),  $f_i^0(t)$  – генерализованная аддитивная модель,  $d_i^m(t)$  – разность наблюдаемого и модельного значений, и  $F_0(d)$  – функция распределения разностей для  $d_i^0(t)$  контрольного варианта.

На следующем этапе, зная распределение  $x^0(t)$ , мы определили вероятность того, что значение параметра в опытном варианте будет отличаться от значений контрольного варианта. Таким образом, получили вектор  $I^m(t) = \langle I_1^m(t), I_2^m(t), I_3^m(t) \rangle$ , где  $I_i^m(t)$  – значение отклонения для  $i$ -го параметра.

Для вычисления усредненной вероятности, в каждой временной точке полученные векторы  $I^m(t)$  усредняются по числу рандомизированных «траекторий» что приводит к получению векторов  $P^m(t) = \langle P_1^m(t), P_2^m(t), P_3^m(t) \rangle$ , являющихся оценками усредненной вероятности в моменты времени (1, 2, 3, ...  $t$ ).

Таким образом, каждая почвенная проба, отобранная в отдельной временной точке, может быть представлена тремя средними значениями вероятности превышения контроля по параметрам: респирация, азотфиксирующая активность, микробная биомасса. Эти значения использовали в качестве характеристик почвенных проб, отобранных в соответствующие моменты времени.

Одной из практических задач исследования было выявление оптимальных схем обработки почвы нетрадиционным удобрением. Мы предположили, что если основным фактором, влияющим на состояние микробного сообщества, будут являться доза и периодичность внесения компостов, то варианты одной схемы внесения должны быть похожими, и, наоборот, при разных схемах внесения они должны различаться. Для того, что бы подтвердить эту идею, мы применили кластерный анализ, в частности, метод иерархической кластеризации, основанный на матрице расстояний между

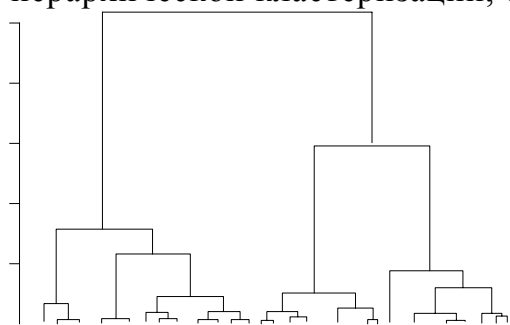


Рис. 6. Дерево иерархической кластеризации

векторами вероятности отличия значений опытного варианта от контрольного (рис. 6). Расчет расстояния между векторами вероятности проводили с использованием евклидова расстояния. Кластеризацию осуществляли методом Варда. На основании дерева иерархической кластеризации выделяли 3 кластера.

Анализ распределений значений усредненных вероятностей, характеризующих объекты, помещенные в тот или иной кластер, позволил вычислить усредненные характеристики кластеров и дать им содержательную интерпретацию (табл. 3).

Таблица 3

## Характеристика кластеров

Кластер	Средняя вероятность, оцененная по показателям		
	респирация	азотфиксация	микробная биомасса
1	0,70	0,58	0,81
2	0,73	0,58	0,27
3	0,32	0,3	0,29

Согласно общим представлениям, увеличение уровня респираторной активности при неизменном уровне микробной биомассы либо его увеличение в сравнении с необработанной почвой можно считать положительным эффектом от

внесения удобрений. Так же расценивается и увеличение уровня микробной биомассы и активности азотфиксации (McGrath et al., 1995; Brookes, 1995; Ананьева с соавт., 2002; Perez de Mora et al., 2005). Исходя из этого, наилучшими характеристиками обладали объекты, объединенные в 1 кластер.

На следующем этапе нами было определено распределение объектов по

кластерам (табл. 4). Установлено, что в кластер с наилучшими характеристиками попали объекты всех вариантов внесения, однако наибольшая их доля относительно общего количества объектов приходилась на варианты 75, 100 и 175 (по 61% от общего числа объектов). Далее следовали варианты 25 и 50, у которых в первый кластер попали по 50% объектов, взятых в анализ. В то же время необходимо обратить внимание на третий кластер, который характеризовался низкими

Таблица 4

## Распределение объектов по кластерам

Вариант обработки	Кластер		
	№1	№2	№3
30	7	4	7
60	4	6	8
90	5	5	8
25	9	4	5
50	9	6	3
75	11	5	2
100	8	4	1
150	6	5	2
175	8	2	3

вероятностями по всем трем параметрам. Такая низкая вероятность (0,29–0,32) свидетельствует о том, что в более двух третях отобранных проб положительный эффект от внесения компоста не наблюдался. Исходя из этого, чем меньше объектов какого-либо варианта попадет в наихудший (третий) кластер, тем меньшую настороженность должен вызвать данный вариант обработки. Этому требованию соответствовали варианты 75 и 100. Действительно, именно у этих вариантов в кластер 3 попало минимальное количество объектов.

Таким образом, на основании характеристик, присущих каждому из выделенных кластеров, и анализа распределения объектов по кластерам можно выделить схемы обработки почвы, оказывающие наиболее устойчивый благоприятный эффект на микробные сообщества – варианты 75 и 100.

### ВЫВОДЫ

1. Компостирование осадков сточных вод станции очистки крупного промышленного города (г. Казань) приводит к снижению содержания металлов в 1,5 –

4,2 раз; максимальное содержание Cd, Cr, Ni, Zn, Pb, As, Hg в компостах составляет 12, 97, 94, 646, 166, 0,2 и 0,2 мг кг<sup>-1</sup> соответственно. Компосты, приготовленные из осадков сточных вод, характеризуются высоким содержанием органического вещества (27-37%). Совокупность установленных характеристик позволяет использовать компосты в качестве нетрадиционного удобрения.

2. Установлено, что следствием внесения компостов из осадка сточных вод является, с одной стороны, увеличение органического вещества в почве, с другой – увеличение содержания металлов, не носящее дозо-зависимого эффекта. Показано, что содержание металлов в почве не превысило установленных предельно допустимых концентраций.

3. В условиях многолетнего эксперимента выявлено, что внесение компостов из осадков сточных вод в серую лесную почву лесного питомника приводит к увеличению числа семян сосны обыкновенной *Pinus sylvestris L.* и их биометрических показателей, что обусловлено увеличением содержания органического вещества в почве. Оценка последствий компоста не выявила достоверных стимулирующих эффектов на семена сосны. Наибольший эффект от внесения компоста проявляется при неблагоприятных погодных условиях.

4. Показано, что обработка почвы компостами в различных дозах (25 – 175 т га<sup>-1</sup>) и с различной периодичностью вызывает достоверные изменения в общей микробной биомассе, респираторной и потенциальной азотфиксирующей активностей микробного сообщества серой лесной почвы. Эффект от внесения выражается в увеличении амплитуды и асинхронизации флуктуации анализируемых параметров, что связано с дестабилизирующим действием дополнительного органического вещества.

5. Установлено отсутствие достоверных ( $P > 0,95$ ) отличий уровня дегидрогеназной и уреазной активностей почв, обработанных компостом из осадка сточных вод от уровня активностей необработанной почвы, что свидетельствует о нецелесообразности применения этих показателей для регистрации ответного отклика микробного сообщества на внесение нетрадиционного удобрения.

6. Предложен алгоритм, реализованный в виде программы, для выявления устойчиво эффективных схем обработки почв нетрадиционным удобрением, включающий получение экспериментальных данных об изменении показателей состояния микробного сообщества, построение нелинейных моделей поведения каждого из показателей во времени для контрольной схемы, расчет вероятностных характеристик соотношения значений показателей в опытных и контрольной схемах и последующий анализ данных методом кластерного анализа. Реализация предложенного алгоритма позволила выявить, что оптимальной схемой обработки почвы является применение компоста из осадка сточных вод в дозе 75 т га<sup>-1</sup> с периодичностью один раз в два года или однократно 100 т га<sup>-1</sup>.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Селивановская С.Ю., **Курицин И.Н.**, Савельев А.А. Оценка эффективности применения нетрадиционного удобрения на основе осадков сточных вод // *Агрохимия*. – 2006. – №5. – С.68 – 75.
2. **Курицин И.Н.**, Селивановская С.С., Шнель С. Активность и численность почвенных диазотрофов при внесении нетрадиционного милиоранта // *Ученые записки Казанского государственного университета. Естественные науки*. – 2008. – Т.150. – Кн.4. – С.209 – 213.
3. **Курицин И.Н.**, Селивановская С.С. Оценка отдаленных эффектов применения нетрадиционного удобрения // *Вестник Татарстанского отделения Российской экологической академии*. – 2004. – №3. – С. 41 – 45.
4. **Курицин И.Н.**, Губаева Л.А. Повышение продуктивности почв лесных питомников с помощью внесения нетрадиционного удобрения // *Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2004»*. – М.: МГУ, 2004. – С. 83 – 84.
5. **Курицин И.Н.**, Губаева Л.А. Активность почвенных микробных сообществ, формирующихся при долговременном воздействии нетрадиционного удобрения // *Материалы Международной молодежной научной конференции «XII Туполевские чтения»*. – Казань, 2004. – Т.1. – С. 239 – 240.
6. **Курицин И.Н.** Изменение состояния микробных сообществ серой лесной почвы при внесении нетрадиционного удобрения // *Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2005»*. – М.: МГУ, 2005. – Т.6. – С. 64 – 66.
7. **Курицин И.Н.**, Селивановская С.Ю., Латыпова В.З. и др. Экологическое нормирование внесения компоста из осадка сточных вод в почву лесного питомника // *Материалы всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы аграрной науки и пути их решения»*. – Ижевск: Изд-во Ижевской ГСХА, 2005. – Т 2. – С. 248 – 252.
8. **Курицин И.Н.** Устойчивое функционирование почвенных микробных сообществ в условиях длительного применения нетрадиционного удобрения // *Тезисы докладов международной студенческой научно-практической конференции “Устойчивое развитие: экологические, экономические, социальные и правовые аспекты”*. – Екатеринбург: Полиграфист, 2005. – С.51 – 52.
9. **Курицин И.Н.** Оптимизация дозы и периодичности внесения компоста из осадков сточных вод в почву лесного питомника с использованием кластерного анализа // *Материалы Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения»*. – Казань, 2005. – Т.1. – С. 233 – 234.
10. **Курицин И.Н.** Оценка ответного отклика микробных сообществ на внесение компоста из муниципальных осадков сточных вод // *Материалы IV*

- Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Экология и научно-технический прогресс». – Пермь: ПГТУ, 2005. – С.432 – 434.
11. **Курицин И.Н.**, Селивановская С.Ю. Применение методов математической статистики для интерпретации результатов биологической оценки почв // Материалы международной научной конференции «Проблемы устойчивого функционирования водных и наземных экосистем». – Ростов-н/Д: КОПИЦЕНТР, 2006. – С. 263 – 265.
  12. **Курицин И.Н.**, Гидиятуллин А.А., Никитин А.Р. и др. Некоторые итоги многолетнего применения нетрадиционного удобрения для увеличения продуктивности почвы лесного питомника // Материалы VI Республиканской научной конференции «Экологические проблемы республики Татарстан». – Казань: Отечество, 2006. – С. 203 – 212.
  13. Ведерников Н.М., Латыпова В.З., **Курицин И.Н.** и др. Увеличение продуктивности почв лесных питомников за счет применения нетрадиционного удобрения // Материалы всероссийской научной конференции «Лес, лесной сектор и экология республики Татарстан». – Казань: Казанск. гос. ун-т, 2006. – С. 47 – 52.
  14. **Курицин И.Н.**, Чурсина М.А., Гумерова Р.Х и др. Разработка алгоритма определения оптимальной схемы внесения компоста из осадка сточных вод в обедненные почвы лесного питомника // Материалы VII Республиканской научной конференции «Актуальные проблемы республики Татарстан». – Казань: Отечество, 2007. – С. 104 – 105.
  15. **Курицин И.Н.**, Селивановская С.Ю. Восстановление нарушенных почв с помощью нетрадиционного удобрения // Материалы I Экологического форума экологов Прикамья «Экология Прикамья». – Наб. Челны, 2007. – С. 73 – 74.
  16. **Курицин И.Н.**, Селивановская С.Ю., Шнель С. Влияние нетрадиционных почвоулучшителей на нитрогеназную и респираторную активности серой лесной почвы // Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Фундаментальные достижения в почвоведении, экологии, сельском хозяйстве на пути к инновациям». – М.: МГУ, 2008. – С. 103 – 105.
  17. **Курицин И.Н.** Использование компоста из осадка сточных вод города Казани в лесном питомнике. // Регионы России: власть и общество в условиях социальных рисков – Казань: КГТУ, 2008. – С. 421 – 425.
  18. **Kuritsin I.N.**, Selivanovskaya S.Yu. Effect of unconventional soil organic fertilizer on microbial process and community structures // Microbial diversity: current situation, conservation strategy and biotechnological potential: Proceeding of III International Conference / Institute of Ecology and Genetics Microorganisms, Russian Academy of Sciences. – Perm, 2008. – P.196 – 197.
  19. **Курицин И.Н.** Влияние внесения органических отходов на всхожесть и характеристики сеянцев сосны обыкновенной // Материалы Всероссийской

научной конференции с международным участием «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований». – Казань: Казанск. гос. ун-т., 2009. – С.132 – 133.

20. **Курицин И.Н.,** Селивановская С.Ю. Использование биологических параметров отражающих состояние круговорота углерода в почве при внесении осадка сточных вод // Материалы Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения». – Казань, 2009. – Т. II. – С. 27 – 28.
21. **Kuritsin I.N.** Effect of composted sewage sludge on biomass and activity microbial community of Naplic Greyzem // 14<sup>th</sup> International Conference «Microbial enzymes in Biotechnology and Medicine». – Kazan, 2009. – P.36 – 37.