

ПОЧВЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Научный журнал

2019

Том 2. Выпуск 1

Свидетельство о регистрации: ЭЛ № ФС 77 - 72325 — сетевое издание от 14 февраля 2018 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес издателя и редакции: 630090, Россия, Новосибирская область, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 8/2, тел.: +7(383) 3639035, ИПА СО РАН, e-mail: redactor@soils-journal.ru, сайт: <https://www.soils-journal.ru>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Титлянова Аргента Антониновна - доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Заместители главного редактора

Дергачева Мария Ивановна - доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Дюкарев Анатолий Григорьевич - кандидат биологических наук, доктор географических наук, заведующий лабораторией мониторинга лесных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Мордкович Вячеслав Генрихович - доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии беспозвоночных животных ФГБУН Институт систематики и экологии животных СО РАН

Якименко Владимир Николаевич - доктор биологических наук, зав.лабораторией агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Члены редколлегии

Сысо Александр Иванович - доктор биологических наук, заведующий лабораторией биогеохимии, директор ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Андроханов Владимир Алексеевич - доктор биологических наук, заведующий лабораторией рекультивации почв, заместитель директора по науке ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Добротворская Надежда Ивановна - доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией рационального землепользования Сибирского НИИ земледелия и химизации сельского хозяйства Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН.

Кирпотин Сергей Николаевич - доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники Института биологии, экологии, почвоведения, сельского и лесного хозяйства Национального Исследовательского Томского государственного университета

Гольева Александра Амуриевна - доктор географических наук, ведущий научный сотрудник отдела географии и эволюции почв ФГБУН Институт географии РАН, председатель Российской ассоциации фитолитологов

Кулижский Сергей Павлинович - доктор биологических наук, проректор по социальным вопросам ФГБУВПО Национального Исследовательского Томского государственного университета

Гопп Наталья Владимировна - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории генезиса и географии почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Ермолов Юрий Викторович - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Кудряшова Светлана Яковлевна - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Танасиенко Анатолий Алексеевич - доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенно-физических ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Лойко Сергей Васильевич - кандидат биологических наук, заведующий почвенным музеем, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды Национального Исследовательского Томского государственного университета

Миронычева-Токарева Нина Петровна - кандидат биологических наук, заведующий лабораторией биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Смоленцев Борис Анатольевич - кандидат биологических наук, заведующий лабораторией географии и генезиса почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Фотев Юрий Валентинович - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории интродукции пищевых растений ФГБУН Центральный сибирский ботанический сад СО РАН

Якутина Ольга Петровна - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Беланов Иван Петрович - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории рекультивации почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Содержание

Наумова Н.Б. От редколлегии	e64
---------------------------------------	-----

Почвы естественных экосистем

Мартынова Н.А., Пушкарева В.С. Экологическая устойчивость почв лесных ландшафтов г. Иркутска и его окрестностей	e48
Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Михайлова Е.В., Колесниченко Л.Г. Растительность и растительное вещество плоскобугристых торфяников	e55

Физика и гидрология почв

Оленченко В.В., Смоленцева Е.Н., Заплавнова А.А., Русалимова О.А., Барсуков П.А. Применение геофизических методов для оценки строения и свойств почв черноземного ряда	e57
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Антропогенные, агрогенные и городские почвы

Попилешко Я.А., Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Антоненко Е.М., Дудникова Т.С. Особенности аккумуляции и трансформации бенз(а)пирена в почве при искусственном загрязнении чернозема обыкновенного	e32
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Юбилеи и памятные даты

Артамонова В.С., Андроханов В.А. К 80-летию профессора Владимира Михайловича Курачёва	e59
Артамонова В.С. 90 лет профессору Надежде Николаевне Наплёковой	e62



ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

Дорогие авторы, рецензенты и читатели журнала!

Во первых, строках первого номера нашего журнала хочется сказать спасибо всем Вам за поддержку и интерес к журналу!

Кажется, что совсем недавно наш журнал получил свидетельство о государственной регистрации, но вот уже опубликован первый номер второго тома.

Время летит стремительно, и, пожалуй, даже быстрее в реалиях современной науки с беспрецедентным давлением со стороны финансирующих организаций, которые вынуждают ученых публиковать полученные результаты как можно скорее в изданиях с определенными библиометрическими показателями. Такое давление имеет много отрицательных последствий; в частности, оно уже снизило и продолжает снижать качество публикуемых материалов, как в отечественных, так и в зарубежных журналах (Wheeler, 1989¹; Sarewitz, 2016²), превращая их попросту в шумовой фон, не имеющий отношения собственно к научному познанию.

Мы прекрасно понимаем, что вряд ли в ближайшем будущем наш журнал будет индексирован в Scopus или Web of Science. Однако мы надеемся, что он делает и будет делать свои, пусть и маленькие, шажки в направлении дальнейшего познания взаимосвязи почв с окружающей средой. И, чтобы эти шажки сделать более заметными в широком потоке движения науки о почве, мы хотим привлечь внимание потенциальных авторов журнала к нескольким простым приемам, с помощью которых можно значительно ускорить и повысить релевантность поиска статей в огромном море публикаций Российского индекса научного цитирования в частности и в интернете в целом.

Заголовок статьи – первое, что видят заинтересованные читатели. Очевидно, что он должен быть максимально точен и не содержать малоупотребимых, непонятных и т.п. терминов. Не стоит заставлять читателей продираться сквозь длинные формулировки: чем короче заголовок, тем больше шансов у статьи быть процитированной (Boer, 2015³). Не стоит также тратить время читателей на неконкретные заголовки, фактически ни о чем, которые – уж так исторически сложилось! – до сих пор популярны. Чтобы было понятнее, о чем идет речь, приведем несколько примеров таких заголовков: «К вопросу о...», «Характеристика...», «Свойства...». Призываем авторов стараться формулировать заголовок так, чтобы он отражал основной результат или вывод статьи. В качестве примера посмотрите заголовки статей в сносках внизу этой страницы. Напомним также, что заголовок должен включать некоторые ключевые слова статьи.

Немного о ключевых словах. Желательно, чтобы они представляли собой комбинацию как самых общих терминов, характеризующих выбранную тему, так и вполне конкретных «узких» терминов.

Следующая по важности для привлечения внимания читателя часть статьи – аннотация. Рекомендуем включать как можно больше ключевых слов в первые два-три предложения аннотации статьи. Не советуем употреблять неконкретные, туманные фразы о том, что «выявлены закономерности...», «установлены зависимости...», «обнаружена связь...» и т.п. без обозначения этих закономерностей, зависимостей, связей. И хотя редакционная коллегия журнала придерживается принципа «автор имеет право» и отвечает за все, что и как написал, расплывчатая информация такого рода притупляет интерес читателя, желание дальше выискивать конкретику в тексте статьи, и, как следствие, уменьшает шансы статьи – и журнала! – быть процитированными.

Еще один очень важный момент, которым авторы, торопясь закончить статью и отправить в редакцию, часто пренебрегают: они сокращают, а в некоторых случаях сводят на нет обсуждение полученных результатов. Но это ведь принципиально неправильный подход! Кто может знать лучше авторов, в каком направлении, в каком разделе они сделали свой мини- (а, может быть, и макси) вклад в продвижение познания? В какой стене и в каком ряду и по соседству с какими другими лежит кирпичик их вклада в концептуальное здание науки? Как полученные ими результаты дополняют и/или меняют накопленную совокупность информации в данной области?

¹Wheeler A.G. The pressure to publish promotes disreputable science // The Scientist. 1989. July 10. Доступно на <https://www.the-scientist.com/opinion-old/the-pressure-to-publish-promotes-disreputable-science-61944>

² Sarewitz D. The pressure to publish pushes down quality // Nature. Vol.533. Iss.147. doi:10.1038/533147a

³ Boer D. Papers with shorter titles get more citations // Nature. doi:10.1038/nature.2015.18246

Каким образом транслируются в другие области? Именно полновесное и детальное обсуждение полученных результатов авторами, прекрасно знающими ситуацию и современное состояние изучаемой проблемы, и делает статью интересной читателям, производя не только библиометрический импакт-фактор (Editorial, 2016⁴), но и реальный научный импакт (Verma, 2015⁵). А ведь именно последнее – как ни банально это звучит! – и является основной целью научной деятельности.

Одним из следствий гонки за публикациями является все большее и большее время, которое ученый вынужден проводить за компьютером, урезая время непосредственного, «живого» общения с почвенно-экологическим объектом. В связи с этим напомним, что формат электронного журнала не ограничивает объем иллюстративного материала, в том числе фотографий. Поэтому призываем авторов активнее пользоваться этой возможностью для демонстрации своих объектов исследования, доставляя огромное удовольствие читателям и удовлетворяя их любопытство.

Итак, вперед к интересным результатам и увлекательным статьям!

Член редакционной коллегии
к.б.н. Н.Б. Наумова

⁴ Editorial. Time to remodel the journal impact factor // Nature. 2016. Vol.535. Iss. 7613 (28 July 2016). doi:[10.1038/535466a](https://doi.org/10.1038/535466a)

⁵ Verma E.M. Impact, not impact-factor // PNAS. 2015. Vol.112. Iss.26. P. 7875-78-76. doi:[10.1073/pnas.1509912112](https://doi.org/10.1073/pnas.1509912112)



ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЧВ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ Г. ИРКУТСКА И ЕГО ОКРЕСТНОСТЕЙ

© 2019 г. Н. А. Мартынова , В.С. Пушкарева

Адрес: ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет, 664003, Россия, г. Иркутск,
ул. К. Маркса 1. E-mail: natamart-irk@yandex.ru

В окрестностях г. Иркутска исследованы лесные почвенно-растительные сообщества с буроземами, дерново-подзолистыми, серыми и серыми метаморфическими почвами, выполняющими важные средо-защитные функции. Сохранение природных дендрокомплексов и их внедрение в структуру жилой застройки, а также укрепление зеленого каркаса города через создание искусственных лесопарковых зон с устойчивым ценотическим составом будет значимо способствовать снижению загрязнения территории. Проведена оценка потенциала экологической устойчивости почв различных районов г. Иркутска и его окрестностей. Разнообразие пород, расчлененность рельефа, суглинистый и глинистый состав почв, наследованный от плейстоценовых лессовидных суглинков и миоценовых глин, относительно высокая гумусированность почв преимущественно гуматно-фульватного состава, хороший травянистый покров с большим биоразнообразием сосново-(осиново)-березовых и других лесов, повышают природную устойчивость почв региона. Наибольшей экологической устойчивостью характеризуются серые и серые метаморфические почвы. Таежные биоценозы значимо способствуют улучшению санитарно-гигиенического и экологического состояния, что вызывает острую необходимость создания зеленого средозащитного каркаса города и его предместий на основе анализа и оценки потенциала экологической устойчивости почвенного покрова. Достаточный уровень плодородия и экологической устойчивости почв исследуемой территории служат устойчивой основой для сохранения реликтовых парковых лесов и формирования культурных и рекреационных ландшафтов в регионе.

Ключевые слова: экологическая устойчивость; сохранение ландшафтов; зеленый каркас; охрана почв

Цитирование: Мартынова Н.А., Пушкарева В.С. Экологическая устойчивость почв лесных ландшафтов г. Иркутска и его окрестностей // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 1. е48. doi: 10.31251/pos.v2i1.48

ВВЕДЕНИЕ

Весьма напряженная экологическая ситуация в городе Иркутске требует радикальных мер по ее улучшению. Формирование экологической инфраструктуры города должно основываться на оценке санитарно-экологической эффективности (средорегулирующего, средозащитного и санитарно-оздоровительного значения) зеленых насаждений, во многом определяемых и свойствами почвенного покрова. Проблема адекватной оценки устойчивости ландшафта приобретает все более важное практическое значение в связи с нарастающим техногенным «давлением».

Нынешнее состояние городских лесных массивов различных типов и категорий показывает высокую степень воздействия негативных факторов, присущих урбанизированным территориям. Это приводит к ослаблению растений, преждевременному старению, поражению болезнями, вредителями и к гибели растений. Эти же факторы влияют на экологические функции городских почв, их плодородие и пригодность для произрастания зеленых насаждений; их способность сорбировать в толще загрязняющие вещества и удерживать их от проникновения в почвенно-грунтовые воды. Таким образом, изучение свойств и особенностей почв необходимо для оценки потенциала экологической устойчивости почвенного покрова и формирования эффективной инфраструктуры зеленого каркаса города и его окрестностей, что и определяет цель и актуальность данного исследования. Сегодня как никогда необходима реабилитация водно-зеленой системы города – сохранение и восстановление ее непрерывности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В перечень лесных массивов, подлежащих учету при разработке всех видов градостроительной документации г. Иркутска, входят лесные массивы пос. Вересовка, пос. «Молодежный», станции Батарейной, окрестностей пос. Плишкино, курорта «Ангара», микрорайона «Юбилейный», реликтовые рощи «Кайской горы», микрорайона «Ново-Мельниково» и «Синюшиной горы», водоохранной зоны Ершовского водозабора и др. Одним из

приоритетных «зеленых» проектов в г. Иркутске является проект развития «Кайской горы» и превращения массива Кайской реликтовой рощи в туристическое «ядро» города на основе сохранения древнего соснового леса.

Объектами исследования послужили почвы лесных массивов различных районов г. Иркутска и его окрестностей. Точки опробования были заложены на разных элементах рельефа и в различных биоценозах (рис. 1).

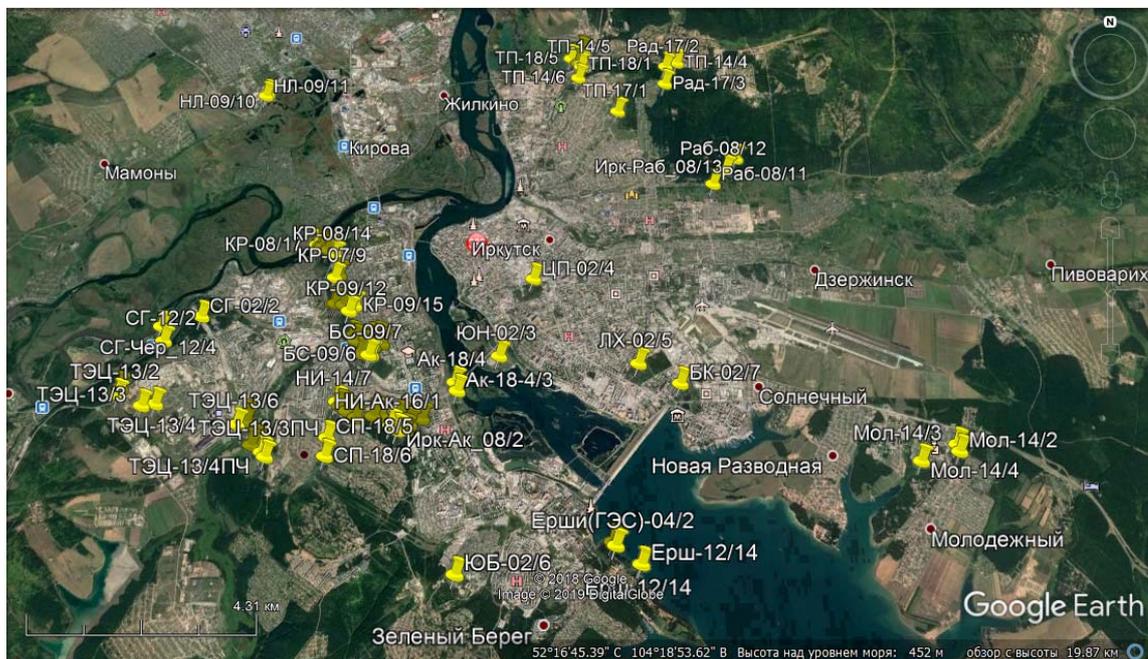


Рисунок 1. Точки опробования лесных почв в г. Иркутске и его окрестностях

Полевые исследования почв, ориентированные на изучение экологической устойчивости и общих физико-химических свойств почв, проводились с применением почвенно-морфологического педо-литологического, ботанического, геолого-геоморфологического и сравнительно-географического методов исследования. На территории исследования было заложено и описано свыше 30 почвенных разрезов. Основные физико-химические свойства почв были определены в 20 почвенных разрезах с помощью общепринятых методов потенциометрии, титрования, фотоколориметрии, гранулометрии и др. (Теория и практика..., 2006) в пробах воздушно-сухих образцов почв.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лесные сообщества и зеленые насаждения играют важную роль в оптимизации экологических условий (уменьшение загазованности и запыленности воздуха, защита от шума и др.), в положительном влиянии на микроклимат территории. Лесные пространства значимо снижают техногенную нагрузку со стороны города и автомагистралей, реализуя свои экологические, санитарно-гигиенические и эстетические функции (Кузеванов и др., 2014), что особенно важно в таких урбанизированных территориях, как г. Иркутск.

По состоянию атмосферного воздуха г. Иркутск относится к числу наиболее загрязненных городов, входя в список 45 городов России с очень высоким уровнем загрязнения территории. Загрязнение является следствием как значительных выбросов от промышленных предприятий, мелких котельных (более 300) и автотранспорта, так и слабыми рассеивающими возможностями атмосферы при преобладающем антициклоне и повышенной влажности воздуха (Воробьева, Коновалова, 1998). Так как г. Иркутск относится к территориям высокой техногенно-антропогенной нагрузки, важной проблемой становится изучение экологического состояния почв и ландшафтов города, и особенно – его лесных сообществ.

Система озеленения г. Иркутска на сегодня не отвечает в должной мере задачам улучшения состояния окружающей среды. В городе отсутствуют крупные зеленые массивы на территории жилой застройки, на улицах города много старых, больных и поврежденных деревьев. В связи с этим возникает необходимость создания экологического каркаса города, которая подразумевает создание

новых зеленых массивов и сохранение старых, подбор древесных и кустарниковых растений, наиболее устойчивых к городским условиям произрастания (Мартынова, Кузеванов, 2015).

Для почвенно-растительного разнообразия и его экологического потенциала необходимо знать и учитывать характерные скорости, направленность, обратимость-необратимость почвообразовательных и почво-изменяющих, ценозо-формирующих процессов, принимая во внимание тот факт, что процессы антропогенной деградации почв и ландшафтов действуют намного быстрее процессов естественного почвообразования и воспроизводства биоценозов.

Почвообразующие породы в г. Иркутске и его окрестностях представлены континентальными, преимущественно терригенными юрскими отложениями, с длительным перерывом и структурным несогласием залегающими на породах нижнего кембрия. Часто юрские отложения перекрыты более молодыми образованиями четвертичного возраста, представленными песками, галечниками, лессовидными покровными суглинками. Разнообразие пород при высокой расчлененности рельефа и неравномерности распределения осадков способствуют произрастанию разнообразных лесных ценозов и обуславливают развитие разных типов почв (рис. 2), среди которых наиболее распространенными являются дерново-подзолистые, серые почвы, серые метаморфические, буроземы и их разновидности (Мартынова, 2010).

Проведенные исследования территории г. Иркутска и его окрестностей показали, что в лесных массивах правобережья р. Ангары – микрорайонах «Радищево» и «Топкинский, а также – в окрестностях города (м-он «Молодежный») под бобово-разнотравно-папоротниково-злаковыми березовыми лесами на миоценовых глинах сформировались дерново-подзолистые ожелезненные ненасыщенные глинистые почвы с кислой реакцией среды и глубоким оподзоливанием (Мартынова и др., 2015). Эти почвы характеризуются повышенным количеством мелко-песчаной фракции в верхних горизонтах (рис. 3Б) при этом наблюдается повышенное содержание частиц пыли в нижних горизонтах почвенного профиля, что мы связываем со сменой режимов синлитогенного осадконакопления и почвообразования в плейстоцене-голоцене. В левобережной части г. Иркутска дерново-подзолистые почвы сформировались на делюво-элювии юрских песчаников в окрестностях м-нов «Ново-Иркутский», «Ерши», «Синюшина гора» и др.

В левобережной части г. Иркутска, в районе Кайской горы, микрорайонов «Академгородок», «Университетский» почвообразующей породой являются четвертичные покровные лессовидные карбонатные (или выщелоченные – в понижениях) суглинки, подстилаемые элюво-делювием юрских песчаников и алевролитов, представленных ожелезненными обломками песчаников и слабоскипающим мелкоземом, что обуславливает развитие здесь под злаково-бобово-осоково-разнотравными сосново-осиново-березовыми разреженными лесами серых почв (рис. 3А) менее кислой – до нейтральной реакцией среды почвенного раствора, с более высокой гумусированностью и насыщенностью обменными катионами (Мартынова и др., 2015).

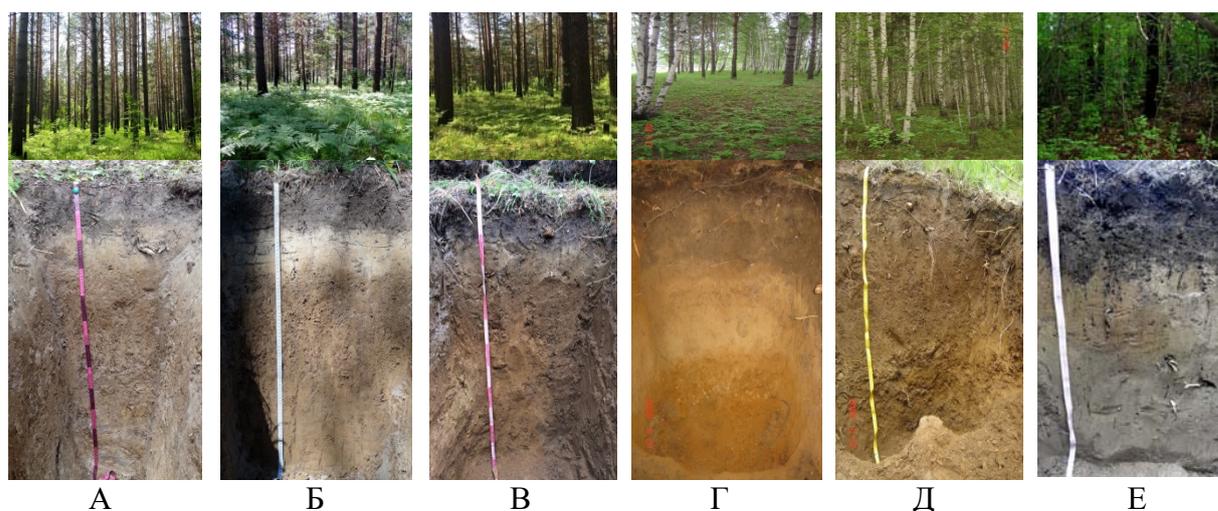


Рисунок 2. Почвы окрестностей г. Иркутска: А – дерново-подзолистая на каолиновых глинах; Б – дерново-подзолистая на элювии миоценовых глин; В – дерново-буро-подзолистая; Г – серая метаморфическая остаточно-карбонатная; Д – бурозем ожелезненный; Е – серая остаточно-карбонатная

Они характеризуются средне- и тяжелосуглинистым гранулометрическим составом с преобладанием крупнопылеватой фракции, характерной для лессовидных пород. Оподзоленность проявляется накоплением по всей выщелоченной толще почвы отмытых скелетан (белесой кремнеземистой присыпки) и формированием рассыпчато-плитчатой структуры. Профиль представлен текстурно-дифференцированной и оглиненной толщей с четко выраженными горизонтами: АО-АЕL-ВТ_r-ВТ-ВC_(ca)-C_{ca}-D_(ca) (по классификации РФ 2004 г.). В профиле встречаются погребенные угольные прослойки. В нижних частях склонов формируются более плодородные темно-серые тяжелосуглинистые почвы с мощной гумусовой толщей: АО-AU-AU_{e1}-ВТ-ВТ_(ca)-ВC_{ca}-C_{ca}-D_{ca}.

Наиболее морфологически выражен оподзоленный горизонт в дерново-подзолистых почвах, сформированных на глинистых породах (каолиновых миоценовых глинах). Но и серые почвы, особенно развитые на водораздельных пространствах левобережной части города, имеют слабую оподзоленность, что подтверждается результатами лабораторно-аналитических исследований. В таблице 1 приведены данные наиболее типичных почвенных разрезов. В оподзоленных горизонтах этих почв реакция среды снижается, составляя в элювиальных горизонтах серых почв 5,7-6,5 и 5,5-5,8 – в автоморфных дерново-подзолистых почвах. Вниз по профилю серых и серых метаморфических почв левобережной части города значения рН возрастают, что связано с почвообразующими породами – карбонатными лессовидными суглинками, перекрывающими юрские песчаники (табл.1). Дерново-подзолистые почвы формируются преимущественно на элювиально-делювиальных отложениях песчаников юрского возраста.

Гумусированность серых почв, относительно высокая (до 5-7 % гумуса) в серогумусовых горизонтах, снижается в гумусово-элювиальных горизонтах до 2-3 % (рис. 3). В иллювиальных горизонтах количество гумуса резко уменьшается, составляя 0,5-0,8%. Гумус преимущественно гуматно-фульватного состава (Сгк:Сфк~0,8). В темно-серых почвах содержание углерода в гумусовых горизонтах повышается, по сравнению с серыми с одновременным увеличением степени его гуматности. В дерново-подзолистых почвах и буроземах высокое содержание углерода растительных остатков подстилки резко падает в серогумусовых горизонтах, достигая порой в почвах, формирующихся на глинистых или лессовидных породах, больших значений (до 10-14%). Часто подстилочные и дерновые горизонты имеют повышенные значения рН, что возможно, объясняется влиянием печного отопления города и выбросов ТЭЦ, а также остаточным влиянием лессовидных окарбончатых суглинков. Карбонаты и щелочные осадки, в свою очередь, способствуют формированию защитной карбонатной пленки на растительных остатках, препятствуя тем самым, их разложению, и способствуя накоплению.

Разнообразие, большая биомасса и высокая степень проективного покрытия травянистого покрова сосново-березовых лесов района исследования, наряду с подщелачивающими выбросами, способствуют повышению содержания обменных катионов в серогумусовых и подстилочных горизонтах, при этом их содержание снижается в элювиальных и элювиально-гумусовых горизонтах дерново-подзолистых и серых почв до 18 мг-экв/100г почвы (Ca+Mg). Серые метаморфические почвы, формируясь на лессовидных суглинках, часто – остаточно-карбонатных, характеризуются более высоким содержанием обменных катионов, чем серые почвы (до 40-60 мг-экв/100 г).

Почвы днищ падей представлены глеевыми серогумусовыми и темногумусовыми почвами, часто – с омергеленным профилем в силу остаточной карбонатности почвообразующих лессовидных суглинков и процессов выщелачивания карбонатов с почв выщележащих ландшафтов, что отражается в щелочной реакции среды всего профиля. Промывной режим почв, приуроченных к пойменным территориям и террасам рек города и их притоков способствует развитию в них иллювиально-глинистого процесса и его «наложению» на другие элементарные почвообразовательные процессы. Темногумусовые глеевые почвы, часто с погребенными гумусовыми горизонтами, характеризуются высоким содержанием гумуса и обменных катионов, что способствует повышению их почвенно-экологического потенциала.

Гранулометрический состав исследуемых почв преимущественно средне- и тяжелосуглинистый, – наследуется от покровных суглинков, на которых они формируются, и неравномерен по профилю. При переходе к подстилающей породе – делювию юрских песчаников гранулометрический состав резко меняется (облегчается) (рис. 3).

Таблица 1

Физико-химические свойства исследуемых типов почв

Горизонты	Глубина, см	pH _{H2O}	pH _{KCl}	Гумус, % *ППП, %	Обменные катионы, мг-экв/100 г		
					Ca	Mg	Σ
Дерново-подзолистая почва (НН-15/1) – Follic-Cutanic Albeluvisol (endoferric)¹							
AO	2–5	6,15	5,56	*17,12	67,5	14,6	82,1
AY _{ao}	5–12	5,71	5,05	15,36	40,4	12,3	52,7
EL	12–26	5,81	4,05	0,21	11,2	6,9	18,0
BEL	26–46	6,05	4,25	0,76	12,7	12,7	25,5
BTel	46–75	5,80	4,41	0,53	22,1	12,11	34,2
BC _{el}	76–90	6,57	4,95	0,41	22,1	9,9	32,0
C _f	90–110	6,81	-	0,28	26,5	10,4	36,9
CD	110–120	6,91	-	0,48	26,5	13,8	40,3
Дерново-подзолистая почва (Paд-17/2) – Follic-Cutanic Albeluvisol (argic epiferric)							
O	0-2	6,80	6,15	*45,30	-	-	-
AY	2-16	6,30	5,46	4,01	-	-	-
EL	16-34	5,53	3,90	0,20	-	-	-
BT _(f)	34-56	5,75	3,89	0,11	-	-	-
BT	56-70	6,15	4,06	0,61	-	-	-
BC	70-95	6,15	4,04	0,96	-	-	-
C1	95-105	5,35	4,24	0,65	-	-	-
C2	>105	6,30	4,86	0,02	-	-	-
Бурозем элювируемый (НН-14/5) – Follic Cambisol (endocutanic)							
AO	2-4	6,31	5,85	*24,20	61,2	25,1	86,3
AY	4-12	5,94	5,45	7,10	32,5	16,2	48,7
BM _{el}	12-60	5,47	4,09	1,16	25,7	12,3	37,9
BM _(h)	60-74	5,71	4,74	1,29	29,7	7,2	36,8
BM _t	65-75	5,88	4,27	0,33	18,0	11,2	29,2
BC	75-90	6,00	4,55	1,01	24,7	11,3	36,0
C	90-107	6,22	4,11	0,33	33,7	14,8	48,5
CD	>107	6,75	4,48	н.о	30,7	9,8	40,5
Серая остаточо-карбонатная (KP-9/15) – Mollic-Cutanic Luvisol (endocalcic)							
AY	0-9	6,25	5,50	7,05	-	-	-
AEL	9-22	6,45	4,90	2,22	-	-	-
BT _{el}	22-45	6,67	4,44	0,78	-	-	-
BC _t	45-65	7,96	-	0,34	-	-	-
BC _(ca)	65-101	7,45	-	0,21	-	-	-
Dca	101 и >	8,20	-	0,12	-	-	-
Серая ожелезненная метаморфизованная (Топ-14/6) – Mollic Luvisol (epicambic endoferric)							
AY _{ao}	0-3	6,75	-	5,22	31,4	13,7	45,1
AY	3-16	5,85	-	3,17	29,4	6,60	36,0
AEL	16-40	5,75	-	0,72	10,0	8,00	18,0
BEL _m	40-68	5,75	-	1,05	17,6	10,3	27,9
BT _{f,m}	68-78	5,65	-	0,35	18,4	11,0	29,4
Серая метаморфическая почва (НН-14/1) – Mollic Luvisol (epicambic)							
AO	1-3	5,95	5,56	*25,07	47,8	33,1	80,9
AEL	3-10	5,95	5,36	14,98	33,7	28,3	62,0
BEL	10-37	5,84	4,04	0,57	12,8	5,4	18,2
BM _{el}	37-48	5,85	4,34	0,48	23,0	13,7	36,7
BM _t	48-60	5,94	4,58	0,48	25,3	9,2	34,6
BC _m	60-80	6,25	4,90	0,98	21,9	8,1	29,9
C	80-95	6,87	-	0,66	25,4	8,8	34,2
Темно-гумусо-глеевая глинисто-иллювируемая омерзленная (СНТ-Ю61-15/3) – Mollic-Hypercalcic Umbrisol (epigleyic)							
AH _{ml}	0-15	8,06	-	*21,53	44,9	13,8	58,7
AU _{ml}	15-25	8,05	-	6,10	59,4	4,9	64,3
BI _{g,ml}	25-45	8,36	-	2,40	40,3	10,34	50,7
BC _{g,ml}	45-55	8,52	-	0,47	30,6	10,2	40,8
C _{g,ml}	55 и >	8,58	-	1,20	30,7	8,4	39,1

¹ по IUSS Working Group WRB, 2014

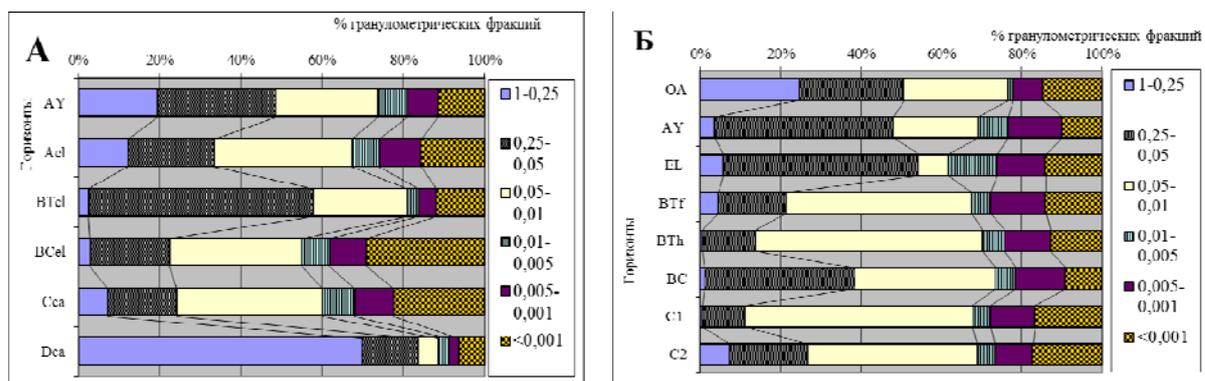


Рисунок 3. Диаграммы гранулометрического состава: А - серая почва (КР-09/15) левобережной (р. Ангары) части города; В – дерново-подзолистая почва правобережной части города (Рад-17/2).

В средней части склонов юго-западной экспозиции развиваются серые метаморфические глинисто-иллювирированные почвы. Фрагментарно на наиболее прогреваемых участках южных и юго-западных пологих склонов под разнотравно-злаково-полынно-бобовой растительностью редкостойных лесных ценозов формируются более плодородные темно-серые метаморфические тяжелосуглинистые почвы с достаточно мощной гумусовой толщей и отсутствием выраженного элювиального горизонта, которые в большинстве своем распаханы: $PU-AU_{(cl)}-AUBM_{yu}-BM_{yu}-BC_m-C$.

На приводораздельных участках формируются буроземы элювирированные со слабокислой реакцией среды, с трендом увеличения pH с глубиной, что связано с наличием в почвообразующей породе (лессовидных суглинках) остаточных карбонатов, препятствующих развитию подзолообразовательного процесса.

Локально на песчаных массивах и делювиальных отложениях юрских песчаников, где промывной режим и кислая реакция среды способствует развитию альфегумусового процесса и ожелезнения профиля, формируются подбуры.

Под остепненными разнотравно-бобово-злаковыми ассоциациями пологих склонов юго-западной экспозиции формируются чернозёмы типичные среднемощные тяжелосуглинистые и чернозёмы глинисто-иллювиальные отдела аккумулятивно-гумусовых почв, обладающие относительно небольшой мощностью, но достаточно высоким содержанием гумуса.

На надпойменных террасах долин притоков р. Иркута (р. Кая и др.) под разнотравно-бобово-полынно-злаковой луговой растительностью на четвертичных аллювиальных отложениях и погребенных луговых почвах формируются черноземовидные типичные (или лугово-черноземные выщелоченные – по классификации 1977 г.) маломощные тяжелосуглинистые почвы с содержанием гумуса до 4-6%.

В поймах рек (Кай, Ангары, Иркута и др.) под разнотравно-бобово-злаковыми лугами с кленом и различными видами ив часто на погребенных аллювиальных серогумусовых глееватых почвах развиваются современные аллювиальные темно-гумусовые глееватые тяжелосуглинистые среднемощные почвы (аллювиальные луговые выщелоченные почвы по классификации 1977 г.).

Вниз по склону почвы обогащаются вымытыми с верхних частей склона карбонатами и имеют, соответственно, менее кислую реакцию среду по всему профилю. Почвы левобережной части города, где покровные лессовидные суглинки часто перекрывают элювиально-делювиальные отложения юрских песчаников, почвы долины р. Кай – луговые и аллювиальные – имеют высокое значение pH – 8,0 и выше по всему профилю. По количеству углерода исследуемые почвы можно охарактеризовать как средне- и малогумусированные.

В понижениях закустаренной части высокой поймы притоков р. Кай с древесно-кустарниковыми ярусами олуговелых ценозов на северо-западе СНТ «Юбилейный-2» под березово-ивовыми травянистыми ассоциациями развиваются темногомусово-глеевые почвы ($AH-AUh-BTi,g-BCg-Cg$) с щелочной реакцией среды, увеличивающейся с глубиной вследствие привнесения карбонатов с вышележащих пространств. Вниз по профилю содержание гумуса и обменных катионов постепенно снижается.

По результатам структурного анализа (рис. 4) исследуемых почв можно сказать следующее:

- наибольшей оструктуренностью характеризуется средняя часть профиля текстурно-дифференцированных и структурно-метаморфических почв;
- в нижней части профиля увеличивается количество пылеватых агрегатов;

➤ структурный анализ подтверждает сложное двухчленное строение профиля почв: педогенную природу агрегированности верхней части профиля и ее литогенную природу – в нижней.

➤ наибольшая оструктуренность характерна для темно-гумусовых, погребенных перегнойно-гумусовых и оглиненных карбонатных горизонтов.

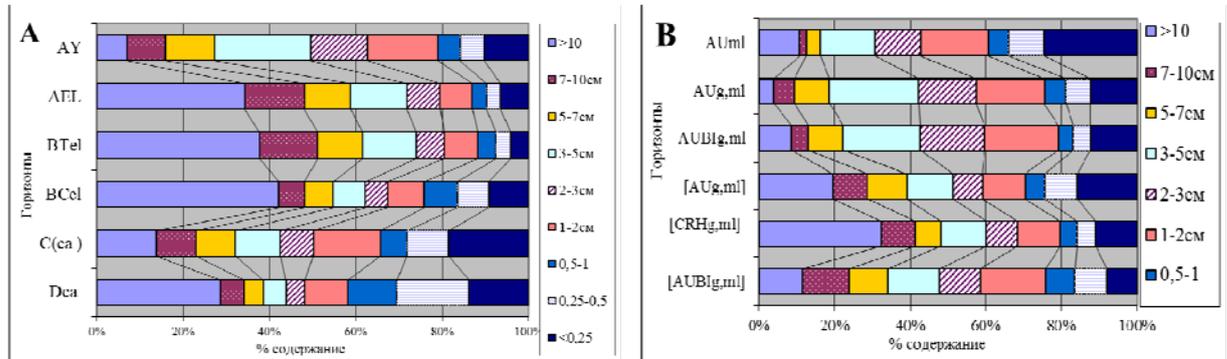


Рисунок 4. Диаграммы структурного анализа исследуемых почв: А – серая остаточно-карбонатная почва (КР-09/15); В – темногумусово-глеевая омергеленная с погребенными перегнойно-гумусовыми горизонтами (КР-09/18).

ОБСУЖДЕНИЕ

Устойчивость природных систем рассматривается сегодня как их некоторое особое специфическое свойство, определяющее потенциал сохранения данной природной системой своего режима функционирования. Это качество индивидуально для различных типов экосистем и ландшафтов и зависит от вида техногенного влияния. Взаимосвязь проявления устойчивости геосистемы с ее сохранением, определяет проявление двух родов (аспектов) устойчивости (Солнцева, 1982): 1-го рода – т.е. способности системы под влиянием внешних воздействий изменяться в пределах допустимых состояний, не выходя за рамки определённого диапазона (*устойчивость противостояния*); 2-го рода – т.е. способности системы возвращаться после возмущения в исходное состояние и сохранять производительную функцию в социально-экономической сфере (*устойчивость нормализации*).

А.Д. Фокин (1995) рассматривает три вида устойчивости природных экосистем, в основе которых лежат механизмы саморегулирования и самоорганизации: структурно-статическая (т.е. способность экосистемы при возмущающих воздействиях сохранять стабильные состав и соотношение между отдельными структурными компонентами системы), функционально-динамическая (т.е. способность сохранять стабильное функционирование через устойчивость и сбалансированность отдельных звеньев биогеохимических потоков и биохимических циклов) и буферность (способность системы сопротивляться воздействию факторам).

Под влиянием техногенных и антропогенных нагрузок в окрестностях города формируются специфические природные ландшафтно-геохимические системы – *технобиогемы* (Глазовская, 1980), обладающие определенным уровнем саморегуляции биогеохимических и почвообразовательных процессов, определяющих их экологическую устойчивость. Теоретические представления о классах водной миграции химических элементов и типах геохимических барьеров, характеризующих, соответственно, классы геохимических ландшафтов, наряду с применением основ генетической классификация почв России позволяют достаточно обоснованно оценивать устойчивость почв и ландшафтов.

Степень устойчивости геосистем определяется литологическим составом пород и грунтов, уровнем и качеством грунтовых вод (т.е. мощностью зоны аэрации), активностью современных экзогенных и геологических процессов, характером почвенного и растительного покрова (Гледко, 2007). Для оценки экологического состояния геосистем и степени их устойчивости необходим комплексный анализ влияния данных факторов.

Интегральную потенциальную устойчивость природных экосистем (которая является выражением их адаптивного биоразнообразия) или эффективность выполнения ими глобальных биосферных функций (интенсивную компоненту устойчивости) можно оценивать через вычисление соотношения общего запаса органического вещества экосистемы к годовому

приросту ее биомассы. Проведенная В.В. Артюховым и А.С. Мартыновым (2013) комплексная теоретическая оценка выявила наибольшую устойчивость для территорий, пространственно совпадающих с зоной средней тайги. Территория Иркутской области с ее огромными таежными пространствами обладает достаточно сбалансированной структурой биоразнообразия, а значит – обладает значительным *ассимиляционным* (как гомеостатических систем) потенциалом устойчивости природных ландшафтов, который способен обеспечить нейтрализацию значительного объема негативных антропогенно-техногенных воздействий.

Сочетание различных факторов и типов почвообразования обуславливает формирование в разных районах города и его пригородов преобладания той или иной составляющей устойчивости почв (Гришина и др., 1991): *геохимической* (способности к самоочищению от продуктов загрязнения); *биологической* (усиления восстановительных и защитных свойств растительности); *физической* (формирование противоэрозийной устойчивости литогенной основы; *интегральной* – т.е. устойчивости ко всему комплексу антропогенного воздействия).

Но относительная устойчивость исследуемых типов почв преимущественно определяется возможностью «сбрасывать» с себя различные вещества-загрязнители и адаптивной способностью или буферностью почв к различным неблагоприятным явлениям. Причем, понимая под устойчивостью не некую абсолютную стабильность, а – «равновесность» подвижных колебаний вокруг некоторого среднего «устойчивого» состояния, можно предполагать большую устойчивость в экосистемах с широкой амплитудой естественных состояний, что значительно снижает риски необратимых трансформационных изменений в них при внешних чрезвычайных воздействиях (как природных, так и техногенных). Благодаря возникновению в экосистеме отрицательных обратных связей происходит «гашение» интенсивности внешнего (техногенного) влияния – т.е. включаются механизмы саморегулирования, в которых важнейшим фактором стабилизации, ремедиации и восстановления состояния является биота. Чем шире амплитуда ее приспособляемости и больше ее разнообразие, тем выше устойчивость экосистемы, важным показателем которой может служить биологическая продуктивность, запасы биомассы, и другие показатели интенсивности биологического круговорота, особенно, если они рассматриваются в комплексе.

При оценке устойчивости почвы возможно оценивать степень деградации и ее составляющие (механическую, химическую, физическую, биологическую) с учетом количественных и скоростных показателей (Смагин и др., 2006).

Оценку устойчивости почв изучали различные авторы: Т.М. Куприянова (1983), В.В. Снакин, П.П. Кречетов, В.Е. Мельченко, И.О. Алябина (Система оценки, 1992) и др. Нами были рассчитаны баллы относительной потенциальной устойчивости исследуемых почв. Для количественной оценки устойчивости почв по отношению к основным антропогенным воздействиям нами были использованы балльные рейтинговые характеристики различных свойств и режимов почв, характеризующих различные виды устойчивости (табл. 2), предложенных различными авторами. Суммарная экологическая устойчивость оценена нами по 7 критериям.

Таблица 2

Критерии рейтинга балльной оценки экологической устойчивости почв

Мощность гумусовой толщи, см	pH _{H2O}	Гранулометр. состав	∑Ca+Mg	Тип водного режима	Тип ландшафта по положению в рельефе	Крутизна склона, градусы	Баллы
< 3	1-2	п-сп	< 10	Мерзлотный	Аквальный	0	1
3 - 10	3-4	лс	10 – 20	Выпотной	Супераквальный	1-2	2
10 – 25	4-5	сс	20 – 30	Непромывной	Аккумулятивный	2-4	3
25 – 50	5-6; 7-8	тс	30– 40	Периодически промывной	Транзитный	4-7	4
> 50	6-7	г	> 40	Промывной	Элювиальный	> 7	5

Предложенный набор показателей отражает как адаптационную *устойчивость противостояния* (мощность гумусового аккумулятивного горизонта, гранулометрический состав, pH, сумма обменных катионов), так и устойчивость *нормализации* (тип водного режима, положение биогеоценоза в ландшафте и показатель крутизны склона) характеризующие способность почвы к восстановлению, следовательно, к проявлению регенерационной

устойчивости. Каждый из показателей устойчивости почвы оценили, как обычно, по 5-ти балльной шкале. Критерии и баллы экологической устойчивости приведены в таблице 2.

Максимально возможное количество баллов по пятибалльной системе для 7 критериев равно 35. Мы оцениваем рейтинговые балльные градации степени устойчивости почв по следующим разработанным нами градациям:

- ✓ 31-35 баллов – почвы с высокой потенциальной устойчивостью;
- ✓ 26-30 баллов – почвы со средней потенциальной устойчивостью;
- ✓ 21-25 баллов – почвы потенциально относительно устойчивые;
- ✓ 15-20 баллов – почвы слабой устойчивости;
- ✓ 10-15 баллов – почвы очень слабой устойчивости.

Анализируя по данным критериям исследуемые типы почв, мы получили сравнительный ряд потенциальной устойчивости исследованных типов почв (см. табл. 3).

Почвы водораздельных пространств (серые и серые метаморфические почвы) более устойчивы к техногенным нагрузкам, чем почвы склонов (буроземы, дерново-подзолистые) и почвы аккумулятивных ландшафтов, куда в конечном счете сносятся и оседают там все загрязняющие вещества.

В днищах балок формируются темногумусово-глеевые омергеленные почвы, характеризующиеся высоким содержанием гумуса, глинистым составом, т.е. достаточно-высоким уровнем природного плодородия. Но «неспособность» «сбрасывать с себя» загрязнения, приводит к накоплению здесь загрязняющих веществ (от ТЭЦ, ИРКАЗа и др. производств), что снижает их экологическую устойчивость.

Степень устойчивости геосистем находится в прямой зависимости от их ранга, который увеличивается «снизу вверх» – от фаций к урочищам, от урочищ к ландшафтам (Исаченко, 1991), что необходимо принимать во внимание при оценке потенциала устойчивости экосистем к внешним воздействиям. Геохимические барьеры способствуют аккумуляции загрязнений в депрессиях, снижая их устойчивость. В то же время привершинные и склоновые ландшафты, очищающиеся от загрязнений, неустойчивы к механическим и физическим нагрузкам (воздействию рекреации, распашки и др.). Поэтому каждый ландшафт характеризуется некоторыми своими особенностями механизмов и порогов устойчивости, «слабых звеньев» и стабилизирующих факторов.

Для многих лесных почв (особенно левобережной части г. Иркутска) нами выявлено подщелачивающее воздействие на подстилочные и дерново-гумусовые горизонты почв зольных выбросов ТЭЦ и котелен города (Мартынова, Барнаков, 2016).

Остаточная карбонатность лёссовидных суглинков, на которых формируются почвы левобережья Ангары, также усиливает почвенно-экологический потенциал территории.

Почвы изученных территорий характеризуются достаточной экологической устойчивостью в силу относительно высокого содержания гумуса, обменных катионов, остаточной карбонатности, средне- и тяжелосуглинистого состава мелкозема. Следовательно, почвы обладают достаточным природным плодородием.

В целом, исследуемые почвы характеризуются средней устойчивостью к загрязнению и деградации. Наибольшей экологической устойчивостью характеризуются серые и серые метаморфические почвы, наименьшей – дерново-подзолистые.

В ряду увеличения устойчивости исследованные нами типы почв выстроились в следующий порядок: дерново-подзолистые (25-26 баллов) < буроземы (28 баллов) < темногумусово-глеевые (29 баллов) < серые метаморфические почвы (31 балл) < темно-серые почвы, черноземы.

По предложенным критериям балльной оценки исследуемые серые и серые метаморфические почвы относятся к почвам со средней и высокой устойчивостью благодаря местным особенностям почвообразования, буроземы и темно-гумусово-глеевые – к почвам со средней устойчивостью; дерново-подзолистые почвы попадают в категории средней и относительно слабой потенциальной устойчивости.

Таким образом, наибольшей буферностью и устойчивостью к внешним воздействиям, загрязнению и деградации обладают почвы нижних частей юго-западных склонов – серые и темно-серые и темно-серые метаморфические, а также – черноземы, черноземовидные и темно-гумусово-глеевые почвы речных долин.

Таблица 3

Относительные баллы экологической устойчивости почв г. Иркутска и его окрестностей

Тип почвы (индекс разреза)	Показатель	Характеристика	Балл
Серая метаморфическая почва (НИ-14/1)	Мощность гумусового гор-та, см	20	3
	Кислотность (рН _{H2O})	Близкая к нейтральной (5,9)	4
	Гранулометрический состав	Средний суглинок	4
	∑Са+Mg (мг-экв/100г)	42,3	5
	Водный режим	Промывной	5
	Положение в ландшафте	транзитно-элювиальный	5
	Крутизна склона	12°	5
	Сумма баллов	Высокая устойчивость	31
Серая остаточно-карбонатная почва на лессовидных суглинках (КР-09/15)	Мощность гумусового гор-та, см	22	3
	Кислотность (рН _{H2O})	Близкая к нейтральной (6,5)	5
	Гранулометрический состав	Тяжелый суглинок	4
	∑Са+Mg (мг-экв/100г)	46	5
	Водный режим	Промывной	5
	Положение в ландшафте	Транзитный	4
	Крутизна склона	12°	5
	Сумма баллов	Высокая устойчивость	31
Бурозем элювируемый (НИ-14/5)	Мощность гумусового гор-та, см	10	2
	Кислотность (рН _{H2O})	Близкая к нейтральной (5,9)	4
	Гранулометрический состав	Тяжелый суглинок	4
	∑Са+Mg (мг-экв/100г)	49	5
	Водный режим	Периодически промывной	4
	Положение в ландшафте	транзитный	4
	Крутизна склона	10°	5
	Сумма баллов	Средняя устойчивость	28
Темно-гумусо-глеевая глинисто-иллювируемая омергеленная почва (СНТ-Юб-1_15/3)	Мощность гумусового гор-та, см	25	3
	Кислотность (рН _{H2O})	Близкая к нейтральной (6,3)	5
	Гранулометрический состав	Средний-тяжелый суглинок	4
	∑Са+Mg (мг-экв/100г)	45	5
	Водный режим	Периодически промывной	4
	Положение в ландшафте	Аккумулятивный	3
	Крутизна склона	4-5°	4
	Сумма баллов	Средняя устойчивость	29
Дерново-подзолистая почва на делювиальных голоценовых глинах (каолинитовой коре выветривания), (Рад-17/2)	Мощность гумусового гор-та, см	16	3
	Кислотность (рН _{H2O})	Близкая к нейтральной (6,8)	5
	Гранулометрический состав	Средний суглинок	3
	∑Са+Mg (мг-экв/100г)	28,7	3
	Водный режим	Периодически промывной	4
	Положение в ландшафте	Транзитный	4
	Крутизна склона	6°	4
	Сумма баллов	Средняя устойчивость	26
Дерново-подзолистая ожелезненная уплотненная почва (НИ-15/1)	Мощность гумусового гор-та, см	10	2
	Кислотность (рН _{H2O})	Близкая к нейтральной (5,9)	4
	Гранулометрический состав	Средний суглинок	3
	∑Са+Mg (мг-экв/100г)	29,2	3
	Водный режим	Промывной	5
	Положение в ландшафте	Транзитный	4
	Крутизна склона	7-10°	4
	Сумма баллов	Относительно слабая устойчивость	25

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованные серые и серые метаморфические почвы, черноземы, черноземовидные и темно-гумусово-глеевые (луговые) почвы, обладая достаточно высоким естественным плодородием,

несомненно, способствуют сохранению биоразнообразия таких охраняемых природных объектов как Кайская роща, имеющая природоохранный статус, что создает устойчивую основу для сохранения естественных ландшафтов реликтовых парковых лесов города и формированию комфортной среды обитания (например – инновационного проекта по созданию в Иркутске публичного ботанического сада на Кайской горе). Кайская гора является уникальной природной лабораторией, отражающей историю формирования природной среды четвертичного и третичного времени.

Достаточный уровень плодородия почв исследуемой территории при невысоких углах наклона поверхности и сглаженных формах холмисто-увалистого рельефа окрестностей, наряду с остаточной карбонатностью лессовидных суглинков создает хорошую базу для устойчивого развития почвенного покрова и растительности. Можно охарактеризовать почвенный покров Кайской горы и других увалов окрестностей г. Иркутска как средне устойчивый и достаточный для реализации проектов «зеленого градостроительства», создания и развития «зеленых поясов-оазисов» вокруг и внутри урбанизированных территорий города на основе систематического почвенно-экологического мониторинга и корректировки антропогенной нагрузки на ландшафты.

Проведенное исследование посредством учета особенностей почвенного покрова, основных свойств почв города и их экологической устойчивости способствует созданию средозащитного каркаса города по сохранению существующих природных лесных массивов и расширению рекреационных лесо-парковых зон отдыха населения. Результаты исследования помогут оптимизировать экологическую среду города и его предместий; выявить взаимосвязи зеленых насаждений с почвенным покровом; определить наиболее эффективные древесные и кустарниковые породы, подходы и методы озеленения и формирования культурных и рекреационных ландшафтов, определить степень деградации и необходимость подсева травосмесей для нейтрализации антропогенной нагрузки; создать рациональные проекты современной «зеленой» (природно-устойчивой) архитектуры и архитектоники с имитацией естественных связей через создание непрерывной сети «зеленых коридоров» и экологических троп вдоль водотоков и рек, что поможет не только улучшить санитарно-гигиеническое состояние города, но и сохранить почвенный покров и реликтовые парковые леса региона. Сохранение почвенного покрова, являющегося невозможным природным ресурсом, является необходимым условием сохранения всего природно-ресурсного потенциала исследуемой территории и залогом ее эффективного и «устойчивого» развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артюхов В.В., Мартынов А.С. *Системная методология оценки устойчивости природно-антропогенных комплексов*. 2013. 142 с.
2. Воробьева И.Б., Коновалова Т.И. Наземные и дистанционные исследования загрязнения городов // *География и природные ресурсы*. 1998. №2. С. 11-16.
3. Глазовская М.А. Опыт классификации почв мира по устойчивости к техногенным кислотным воздействиям // *Почвоведение*. № 9. 1990. С. 82-96.
4. Гледко Ю. А. *Устойчивость геологической среды в условиях техногенного воздействия / Современные проблемы геохимии, геологии и поисков полезных ископаемых* // Материалы Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Константина Игнатьевича Лукашева (1907-1987). 14-16 марта 2007 г., Минск / Под редакцией О.В. Лукашева. Минск: Издательский центр БГУ, 2007. С. 1-9.
5. Гришина Л. А., Котчик Г.Н., Первова Н. Е. О подходах к изучению свойств почв лесных экосистем при проведении экологического мониторинга (на примере Звенигородской биостанции) // *Экология*. 1991. № 5. С. 14-20.
6. Исаченко А.Г. *Ландшафтоведение и физико-географическое районирование: Учеб. пособие*. М.: Высш. шк., 1991. 366 с.
7. Классификация и диагностика почв СССР / Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М.: Колос, 1977. 224 с.
8. Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
9. Кузеванов В.Я., Мартынова Н.А., Белоусов В.М. *Оптимизация урбанизированной среды г. Иркутска и ее сохранение через зеленое градостроительство* // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: Материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию образования ИрГСХА (27-29 мая 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2014. С. 86-94.
10. Куприянова Т.П. *Обзор представлений об устойчивости физико-географических систем* // Устойчивость геосистем. М.: Наука, 1983. С. 7-13.
11. Мартынова Н.А., Белоусов В.М., Кузеванов В.Я. *Почвенно-экологический потенциал естественных ценозов левобережных ландшафтных комплексов реки Ангары Иркутске как основа зеленого градостроительства* // *Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология*. 2015. Т.13. С. 60-74.

12. Мартынова Н.А. Барнаков М.М. *Почвенный покров зоны влияния Иркутской ТЭЦ, его свойства и экологическая устойчивость* // Почва как связующее звено функционирования природных и антропогенно-преобразованных экосистем. Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов ИГУ и Дню Байкала / Под ред. Н. И. Граниной. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2016. С. 431-436.
13. *Мартынова Н.А. Кузеванов В.Я. Зеленое градостроительство и сохранение почвенного покрова как компоненты экокультуры и экообразования // Современные проблемы науки и образования. 2015. №4.*
14. *Мартынова Н.А. Почвы* // Атлас «Иркутск и Иркутская область». Учебно-справочное картографическое пособие, 2-ое издание, обновленное и дополненное. Иркутск: ФГУП «ВостСибАГП», 2010. С.27.
15. *Мартынова Н.А., Тропина М.Г., Хамаганова А. Почвы окрестностей пос. «Молодежный» Иркутской области, их особенности, экологическое состояние и влияние на состав грунтовых вод // Materiały XI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki - 2015» Volume 16. Nauk biologicznych. Rolnictwo. Poland, Przemysł: Nauka i studia P. 37-42.*
16. *Система оценки степени деградации почв* / Снакин В.В., Кречетов П.П., Кузовникова Т.А. и др. Пущино: Пущинский научный центр РАН, ВНИИ Природа, 1992. 20 с.
17. *Смагин А.В., Азовцева Н.А., Смагина М.В. и др. Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий // Почвоведение. 2006. № 5 С. 603-615.*
18. *Солнцева Н.А. Геохимическая устойчивость природных систем к техногенным нагрузкам (принципы и методы изучения, критерии прогноза) // Добыча минерального сырья и геохимия природных систем. М.: Наука, 1982. С.181-216.*
19. *Теория и практика химического анализа почв* / Под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
20. *Фокин А. Д. Устойчивость почв и наземных экосистем: подходы к систематизации понятий и оценке // Известия ТСХА. 1995. № 2. С. 71-85.*
21. *IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports. № 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.*

Поступила в редакцию 11.12.2018

Принята 28.03.2019

Опубликована 06.04.2019

Сведения об авторах:

Мартынова Наталья Александровна – старший преподаватель кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов биолого-почвенного факультета Иркутского государственного университета (Иркутск, Россия); natamart-irk@yandex.ru

Пушкарева Валерия Сергеевна – студентка 4 курса кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов биолого-почвенного факультета Иркутского государственного университета (Иркутск, Россия); pushkare-vavaleriya@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

SOIL RESOURCE AND ECOLOGICAL POTENTIAL OF FOREST LANDSCAPES OF IRKUTSK-CITY AND ITS SURROUNDINGS

© 2018 N.A. Martynova , V.S. Pushkareva

Address: Irkutsk State University, Irkutsk, Russia. E-mail: natamart-irk@yandex.ru

The forest soils (burozems, sod podzolic soils, gray and gray metamorphic soils) and plant communities, altogether performing important environmental protection functions, were investigated in the vicinity of Irkutsk city in Russia (N52°17'24.03", E 104°16'50.62"). The preservation of natural forest sites in the residential areas, as well as enhancing of the "green" infrastructure of the city by creating artificial forest stands with sustainable coenotic composition will significantly decrease contamination and pollution. The study assessed the potential of environmental susceptibility of soils in different districts of Irkutsk and its vicinity.

The natural soil sustainability potential of the region results from the diversity of parent bedrock material, relief of the terrain, loamy and clay granulometry, derived from the Pleistocene loess-like loams and the Miocene clays, relatively high humus content of predominantly humate-fulvate composition, dense vegetation cover of pronounced biodiversity of trees (pine, aspen and birch), etc. Gray and gray metamorphic soils can be characterized as being environmentally the most sustainable. Taiga biocenoses

were shown to contribute significantly to the improvement of the sanitary-hygienic and environmental status of the studied areas. The result underscores an urgent need to take into account soil and soil cover sustainability potential while creating a green environmental protection framework in the city and its vicinity. Sufficient fertility and environmental sustainability of soils in the studied area serve as a stable basis for the preservation of relic park forests and for the development of cultural and recreational landscapes in the region.

Key words: soil-environmental capacity; ecological sustainability; landscape conservation; green frame; conservation of soil

How to cite: Martynova N.A., Pushkareva V.S. Soil resource and ecological potential of forest landscapes of Irkutsk-city and its surroundings // *The Journal of Soils and Environment*. 2018. 2(1). e48. doi: 10.31251/pos.v2i1.48 (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Artjuhov V.V., Martynov A.S. *System methodology for assessing the sustainability of natural-anthropogenic complexes*. 2013 142 p. (in Russian)
2. Vorob'eva I.B., Konovalova T.I. Ground and remote sensing urban pollution studies // *Geography and natural resources*, 1998, No2, p.11-16. (in Russian)
3. Glazovskaya M.A. Principle of world soil grouping according to their susceptability to technogenic acidification // *Pochvovedenie*, No.9, 1990, p.82-96. (in Russian)
4. Gledko Ju. A. *Stability of the geological environment under technogenic influence / Modern problems of Geochemistry, Geology and mineral prospecting*. In book: Proc. of the In. Conf. devoted to the 100th anniversary of the birth of Academician K. I. Lukashev (1907-1987). March 14-16, 2007, Minsk. Ed. by O.V. Lukasheva. Minsk: BGU Center Publ., 2007. P. 1-9. (in Russian)
5. Grishina L.A., Kopicik G.N., Pervova N.E. Approaches to the study of soils properties of forest ecosystems under the environmental monitoring (on the example of Zvenigorod biostation) // *Russian Journal of Ecology*, 1991, No5, p.14-20. (in Russian).
6. Isachenko A. G. *Landscape science and physical-geographic zonation*. Moscow: «Higher School» Publ. 1991. 366 p. (in Russian)
7. *Classification and diagnostics of Soils of the USSR* / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Friev. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian)
8. *Soil classification and diagnostic of Russia* / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian)
9. Kuzevanov V.Ya., Martynova N.A., Belousov V.M. *Optimization of the urban environment of Irkutsk and its preservation through green urban planning*. In book: Climate, ecology, agriculture in Eurasia: Proc. of the III In. Sci.-Prac. Conf. devoted to the 80th anniversary of ISAA. Irkutsk: IrGSKhA Publ. 2014, p. 86-94. (in Russian)
10. Kuprijanova T.P. *Overview of ideas about the stability of physical and geographical systems*. In book: Stability of geosystems. Moscow: Nauka Publ., 1983, p. 7-13. (in Russian).
11. *Martynova N.A., Belousov V.M., Kuzevanov V.Ya. Pedoecological Potential of Natural Cenoses of Angara River Left-Bank Landscapes in Irkutsk* // *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2015, Vol.13, p. 60-74. (in Russian)
12. Martynova N.A. Barnakov M.M. *The soil cover of the Irkutsk Thermolectric Power Station influence area, it's properties and ecological sustainability*. In book: Soil as a connecting link of the functioning of natural and anthropogenically transformed ecosystems: Proc. of the IVth Sci.-Prac. Conf. devoted to 85th anniversary of the Department of Soil Science and land resources assessment of the ISU / Ed. I. Granina. Irkutsk: ISU Publ., 2016, p. 431-436. (in Russian)
13. *Martynova N.A. Kuzevanov V.Ya. Settlement gardening and soil cover conservation as eco-culture and eco-education components* // *Modern problems of science and education*, 2015, No4. (in Russian)
14. Martynova N.A. *Soils*. In book: Atlas "Irkutsk and Irkutsk region": Educational and reference cartographic manual, 2nd edition, updated and supplemented. Irkutsk: FSUE «VostSibAGP», Publ., 2010, 27 p. (in Russian)
15. *Martynova N, Tropina M.G., Khamaganova A. Soil of the environs of the village Youth in Irkutsk region, their characteristics, environmental condition and influence the composition of the groundwater*. In book: Materiały XI Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki - 2015» Volume 16. Nauk biologicznych. Rolnictwo.: Poland, Przemysł: Nauka i studia, p. 37-42. (in Russian)
16. Snakin V.V., Krechetov V.V. Kuzovnikova T.A. et al. *System of assessing of soil degradation degree*. Pushchino: Pushchino scientific center RAS, Institute of Nature, 1992, 20 p. (in Russian)
17. *Smagin A.V., Azovceva N.A., Smagina M.V. et al. Criteria and methods to assess the ecological status of soils in relation to the landscaping of urban territories* // *Eurasian Soil Science*, 2006, Vol. 39, No5, p.539-551.
18. Solnceva N.A. *Geochemical stability of natural systems to technogenic loads (principles and methods of study, forecast criteria)* In book: Extraction of mineral raw materials and Geochemistry of natural systems. Moscow: Nauka Publ., 1982, p.181-216. (in Russian)

19. *Theory and Practice of Soil Chemical Analysis* / Ed. by L.A. Vorobyova. Moscow: GEOS Publ., 2006, 400 p. (in Russian)
20. *Fokin A. D.* The resistance of soils and terrestrial ecosystems: approaches to the systematization of concepts and assessment // *Bulletin of Moscow Timiryazev Agricultural Academy*, 1995, Vol 2, p. 71-85. (in Russian).
21. *IUSS Working Group WRB*, World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports. № 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.

Received 11 December 2018

Accepted 28 April 2019

Published 06.04.2019

About the authors:

Martynova Natalia A. - Senior lecturer of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment of the Soil Biology Faculty of the Irkutsk State University (Irkutsk, Russia); natamart-irk@yandex.ru

Pushkareva Valeria S. – Student of the 4th year of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment of the Soil Biology Faculty of Irkutsk State University (Irkutsk, Russia); pushkarevavaleriya@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**РАСТИТЕЛЬНОСТЬ И РАСТИТЕЛЬНОЕ ВЕЩЕСТВО ПЛОСКОБУГРИСТЫХ
ТОРФЯНИКОВ**© 2019 Н.П. Косых¹, Н.П. Миронычева-Токарева², Е.В. Михайлова^{1,2},
Л.Г. Колесниченко³

Адрес: ¹ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: kosykh@issa-siberia.ru

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий, ул. Плеханова 10, г. Новосибирск, 630108, Россия. E-mail: milek123@mail.ru

³Томский государственный университет, Научно-исследовательский институт биологии и биофизики, ул. Ленина 25, г. Томск, 634050, Россия. E-mail: klg7777@mail.ru

Цель исследования. Выявить особенности распределения запасов растительного вещества и продукции в зависимости от состава растительного покрова, характеристики почвенного слоя и микрорельефа плоскобугристых болот северной тайги Западной Сибири.

Место и время проведения. Плоскобугристые мочажинно-озерковые комплексы на мерзлых торфяниках подзоны северной тайги Западной Сибири. Приведены результаты многолетних исследований с 2013 по 2017 гг.

Методология. Комплексные исследования почвенного и растительного покрова. Изучена структура растительного вещества с выделением живых и мертвых подземных органов и чистая первичная продукция болотных экосистем.

Основные результаты. Чистая первичная продукция экосистем плоскобугристого болота колебалась в пределах от 3,0 до 4,5 т/га в год в зависимости от видового состава растительного сообщества. В среднем составила около 4,0 т/га в год при запасе живой фитомассы – 14,8 т/га, в спущенных озерах – 8,5 т/га в год, при запасах фитомассы – 18,0 т/га. На плоских буграх отношение надземной продукции кустарничков к подземной 1:4, в мочажинах преобладали подземные органы осок и пушиц 1:6. Максимальный вклад подземной продукции наблюдался в мезотрофных мочажинах и составлял 70% от общей продукции и создавался, в основном, подземными органами крупных осок и пушиц. Общая первичная продукция на буграх составляла 4,1 т/га в год, в олиготрофных мочажинах – 3,0 т/га в год, в хасыреях достигала максимальной величины для этой подзоны – 8,5 т/га в год.

Заключение. Анализ полученного материала показал, что средние значения запасов растительного вещества как в надземной, так и в подземной сфере были в течении ряда лет на одном уровне и близки запасам полученным для болот Канады, Швеции и Финляндии. Распределение запасов фитомассы и годичной продукции в плоскобугристых болотах северной тайги зависели от условий минерального питания почвы и обводненности корнеобитаемого слоя. Доминирующая роль мхов в продукции экосистемы сохранялась только в олиготрофных мочажинах, на буграх преобладали лишайники, видовое разнообразие которых превосходит остальные группы растений. При равных условиях в мочажинах запасы фитомассы и годичная продукция растут с увеличением торфистости почвы, а в экосистемах бугров уменьшаются при наличии мерзлого слоя почвы. Анализ продуктивности на разных болотных почвах северной тайги позволяет сделать вывод, что почвенные условия оказывают существенное влияние на интенсивность продукционного процесса и обуславливают в целом невысокий уровень продуктивности. Запасы и продукция фитомассы на буграх лимитированы небольшой глубиной протаивания, в летний сезон сюда добавляется иссушение верхнего слоя, его прогревания, что при близком залегании мерзлоты создает неблагоприятные условия для жизни корневых систем.

Ключевые слова: торфяники; мерзлота; биологическая продуктивность; растительное вещество; запасы; фитомасса; мортмасса; чистая первичная продукция

Цитирование: Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Михайлова Е.В., Колесниченко Л.Г. Растительность и растительное вещество плоскобугристых торфяников // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 1. с.55. doi: 10.31251/pos.v2i1.55

ВВЕДЕНИЕ

С экологической точки зрения любое преобразование поверхности земли сопровождается трансформацией почвенно-растительного покрова с формированием новых экосистем, состояние которых определяется формой поверхности и составом ее почвенно-растительного комплекса.

Любая экосистема характеризуется структурой с набором компонентов со связями между ними и их количественными характеристиками на определенный момент времени или в среднем за период. Одной из особенностей болотных экосистем является их ранимость при антропогенных воздействиях, приводящих к их деградации (Тыртиков, 1972; Тишков, 1986; Москаленко, 1999). Чтобы предотвратить или уменьшить негативное влияние на компоненты экосистемы, необходимо при планировании работ по природопользованию рассматривать характеристики компонентов с точки зрения совокупности состава микрокомплексов в экосистеме, учитывая характер их взаимосвязи между собой и воздействие абиотических факторов среды для последующего прогнозирования процессов восстановления почвенного и растительного покрова. В настоящее время оценены запасы фитомассы и ее ежегодное воспроизводство в наземных природных экосистемах, слагающих растительный покров административных регионов Западной Сибири. Несмотря на то, что универсальность системы обменных процессов биологического круговорота, включающей в себя определенные запасы вещества и интенсивности процессов, связывающих компоненты круговорота, установлена, степень сходства будет различна в разных типах экосистем (Базилевич, Титлянова, 2008).

Болота криолитозоны Западной Сибири представлены комплексами плоских бугров с олиготрофными бедными мочажинами и заторфованными котловинами спущенных термокарстовых озер (хасыреев) с сочетанием травяно-сфагново-кустарничковых экосистем, мелких озерков и формирующихся бугров пучения (Брыксина, Полищук, 2015). Установлено, что на границе перехода от экосистем бугров к мочажинам и спущенным озерам (хасыреям) количественные характеристики запасов фракций фитомассы определяются типом почвы и видовым составом растительного сообщества, которые зависят от положения в мезо- и микрорельефе ландшафта. Для моделирования процессов функционирования заболоченных ландшафтов Западной Сибири при разных климатических сценариях в болотных экосистемах бугров, олиготрофных мочажин и евтрофных хасыреев во времени требуется продолжение работ по определению составляющих биотического круговорота. Цель данной работы состояла в выявлении особенностей распределения запасов растительного вещества и продукции в зависимости от состава растительного и почвенного покровов, а также микрорельефа плоскобугристых болот северной тайги Западной Сибири.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ключевой участок, репрезентативный для территории Сибирских Увалов, находится в подзоне северной тайги Западной Сибири и относится к Обско-Тазовскому региону мерзлых комплексных торфяных болот (Мельцер, 1985). Рельеф полого-гривисто-увалистый. Около 50% территории заболочено. Болотные массивы заняты полого-бугристыми мочажинно-озерковыми болотными комплексами на мерзлых торфяниках. Вдоль мелких болотных речек развиты крупнобугристые болота. Благодаря высокой заболоченности и небольшой локальной амплитуде высот рельефа, грунтовые воды держатся в пределах верхних 5-10 метров, а на периферии плоских повышений - около 2-3 метров. Удерживаемая торфяниками болот вода позволяет поддерживать уровень грунтовых вод на достаточно высоком уровне. Микрорельеф болот определен мерзлотными процессами. Бугры местами достигают 4-6 м, но в основном их высота не превышает 1-2 м. Гривы представляют собой плосковершинные холмы и гряды 1-2 м высотой. Они сложены суглинистыми грунтами озерного происхождения. Часть территории покрыта супесями и опесчаненными суглинками, часто имеющими примесь гальки. Микропонижения заболочены, и частично заняты озерами, соединенными мелкими протоками в цепочки и создающие системы плоскобугристых болот. Большое влияние на развитие мезо-, микро- и нанорельефа оказывает многолетняя мерзлота. С ней связаны криогенные процессы, создающие в зоне северной тайги своеобразные формы рельефа и обуславливающие сложные комплексы почвенного покрова (Смоленцев, 2002).

Климат территории резко континентальный, суровый. Средняя годовая температура воздуха -5°C . Годовое количество осадков составляет 580 мм, основная часть которых приходится на теплое время года (с апреля по октябрь). Зима холодная, температура воздуха в январе составляет -20° . Лето сравнительно теплое, однако средняя температура воздуха в июне может колебаться от 4 до 20°C . Первая половина лета сухая, вторая избыточно влажная. Осень холодная, в сентябре температура воздуха переменчива в течении суток (от -5 до 10°C). В октябре температура воздуха становится отрицательной (Павлов, 2008).

Определение запасов и структуры растительного вещества проводили на ключевом участке, расположенном на плоской междуречной равнине, занятой плоскобугристым мерзлым торфяником с комплексом хасыреев, мочажин и озерков. Длина склона изучаемого участка около 140 м, уклоны его не превышают 0,02.

На супесчаных отложениях, перекрытых торфяниками, формируются торфяные олиготрофные почвы. В настоящее время рост торфяных отложений осуществляется в соответствии с условиями микрорельефа, выраженность которого зависит как от исходного рельефа территории, так и развития термокарстовых процессов. В автоморфной позиции процесс торфонакопления лимитирован небольшой глубиной протаивания, в летний сезон сюда добавляется иссушение верхнего слоя, его прогревание, что при близком залегании мерзлоты создает неблагоприятные условия для жизни корневых систем. На мерзлых торфяниках формируются торфяные олиготрофные мерзлотные почвы.

Поверхность плоских бугров волнистая, с большим количеством микропонижений. Высота кочек от 10 до 15 см. Глубина талого слоя на буграх в летнее время залегают на глубине 50 см ниже поверхности лишайников (Рис 1). Растительность представлена на буграх кустарничково-лишайниковым сообществом, в мочажинах – кустарничково-осоково- и пушицево-сфагновыми сообществами (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика ключевого участка «Ханымей»

Экосистема	Растительное сообщество	Координаты	
Плоский бугор	Кустарничково-лишайниковое	N 63°47'29.052"	E 75°33'49.104"
Мочажина	Кустарничково-осоково-сфагновое, пушицево-сфагновое	N 63°47'29.826"	E 75°33'44.754"
Хасырей	Осоково-сфагновое	N 63°47'27.432"	E 75°33'48.774"



Рисунок 1. Растительный покров плоских бугров и мерзлотная торфяная почва на бугре

Кустарничковый ярус расположен на микроповышениях плоских бугров и редко поднимается выше 15 см от лишайникового покрова. Доминантом кустарничкового яруса является *Ledum decumbens* (Auton) Lodd. ex Steud (проективное покрытие около 40%); содоминанты – *Betula nana* L. и *Vaccinium vitis-idaea* L., *Vaccinium uliginosum* L., занимающие по 10% проективного покрытия. Общее проективное покрытие (ОПП) кустарничков составляет 60%. Так же единично встречаются *Andromeda polifolia* L. и *Empetrum nigrum* L. Травяной ярус образован *Rubus chamaemorus* L. (5% ОПП). В мохово-лишайниковом ярусе лишайники занимают господствующее положение и по видовому составу, на них приходится 95% проективного покрытия. Доминантами здесь являются *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar et Vězda и *C. stygia* (Fr.) Ruoss. Встречаются также виды *Cetraria nivalis* (L.) Ach., *C. cuculata* (Bellardi) Ach., *C. islandica* (L.) Ach., *Cladonia rangiferina* (L.) Web., *C. amaurocrea* (Flörke) Schaer., *Allectoria ohroleuca*

(Hoffm) Massal. На сфагновые мхи приходится только 5% ОПП; встречается *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr и *S. capillifolium* (Ehrh.) Hedw .

Почвенный разрез заложен на плоском бугре в кустарничково-лишайниковом растительном сообществе. Почва – *торфяная олиготрофная мерзлотная* (Glacic-Fibric Histosols (Dystric)) (Рис. 1)

Описание разреза:

Очес (0 – 7) Цвет зеленовато-светло-серый. Представляет собой отмершие части лишайников. Сухой. Рыхлый. С нижележащим горизонтом связан непрочно. Граница ровная. Переход ясный.

T1 (7 – 10) Мокрый рыжевато-охристый горизонт, сложенный мохово-кустарничковым торфом, со степенью разложения 50%. Густо пронизан корнями растительности и погребенными стволиками кустарничков, с поверхности отмечаются минеральные примеси. Рыхлый. Свежий. Переход в соседний горизонт резкий по окраске. Граница ровная.

T2 (10 – 25) Рыжевато-бурый торфяной горизонт. На глубине 12 – 20 см фрагментарные прослойки коричневатого бурого торфа. Минеральные примеси отсутствуют. Рыхлый. Свежий. Переход в соседний горизонт резкий по окраске. Граница ровная.

T3 (25 – 50) Коричнево-темно-бурый слоистый (буровато-красноватые тонкие прослойки). Имеется незначительная примесь минеральных частиц. Уплотнен. Свежий. Мерзлота с 50 см.

Растительные сообщества мочажин сменяют друг друга в зависимости от уровня обводненности (рис. 2). Пушицево-сфагновое сообщество занимает местообитания с наиболее низким уровнем болотных вод (около 15 см). Обычно такие сообщества окаймляют края больших мочажин или занимают микропонижения между буграми. Травяной ярус представлен в основном *Eriophorum russeolum* Fries с проективным покрытием до 10%, присутствует также *Carex rotundata* Wahlenb. Часто рядом с пушицей единично встречается *Andromeda polifolia*. В моховом покрове доминирует *Sphagnum balticum* (Russ) Russ.ex C.Jens. При продвижении в сторону центра округлой мочажины наблюдается повышение уровня болотных вод, что вызывает исчезновение кустарничков, повышение проективного покрытия *C. rotundata* в травяном ярусе, которая из субдоминантов переходит в доминанты (5-7% проективного покрытия). В моховом покрове также происходит смена доминантов – преобладающими видами становятся *Sphagnum lindbergii* Schimp. ex Lindb. и *Warnstorfia fluitans* (Hedw.) Loeske. Осоково-сфагновые сообщества могут полностью занимать центральные части мочажин или же только окаймлять полосой открытую водную поверхность, находящуюся в самом центре мочажины (Косых и др., 2010).



Рисунок 2. Осоково-сфагновая мочажина

Почвенный разрез заложен в осоково-сфагновой олиготрофной мочажине (Таблица 1).

Почва – *торфяная олиготрофная* (Fibric Histosols (Dystric)) (Рис. 2).

Описание разреза:

Очес (0 – 20) Остатки кустарничков, осок, пушиц и сфагновых мхов.

T1 (20 – 35) Мокрый коричнево-бурый горизонт низкой степени разложенности (5-10 %), с включением полуразложившихся кустарничков и пушиц, отмечаются минеральные примеси. Переход постепенный по окраске.

T2 (35 – 40) Мокрый, бурый, торфяной слой низкой степени разложения (5-10 %), количество минеральной примеси по сравнению с предыдущим горизонтом заметно уменьшилось.

T3 (40-50) Темно-бурый низкой степени разложения (5-10 %), слегка мажется, отмечается значительное количество минеральных примесей.

Растительный покров хасыреев представлен пушицево-осоково-сфагновыми, разнотравно-осоково-сфагновыми сообществами. Доминируют в сообществе растения травяного яруса *Carex rostrata* Stokes (10%), *C. lasiocarpa* Ehrh., *Eriophorum polystachion* L. (5%), *E. vaginatum* (5%), *E. russeolum* Fries (5%), единично встречаются *Comarum palustre* L. и *Menyanthes trifoliata* L., доля их в проективном покрытии не превышает 3%. Кустарничковый ярус представлен андромедой *Andromeda polifolia* (10%) и березкой *Betnula nana* L. В моховом ярусе доминируют с проективным покрытием по 40% *Sphagnum lindbergii* S. *balticum*, единично встречаются *S. compactum* DC. in Lam. et DC. и *S. squarrosum* Crome.

Почвенный разрез заложен в осоково-сфагновом растительном сообществе хасырея. (Табл.1). Почва – торфяная евтрофная мерзлотная (Hemic Histosols) (Рис.3).

Описание разреза:

T1 (0–20) Влажный. Серовато-темно-бурый торфяной горизонт высокой степени разложения (70-80%). Переплетен корнями осок и пушиц. Уплотнен. Граница неясно выраженная, переход постепенный по окраске.

T2 (20–55) Сырой. Темно-бурый торфяной горизонт высокой степени разложения (70-80%). Очень плотный, сильно мажется.



Рисунок 3. Торфяная евтрофная мерзлотная почва

Определение запасов фракций растительного вещества в экосистемах проводили стандартными методами с небольшими модификациями.

Во всех экосистемах была изучена структура растительного вещества с выделением живых и мертвых подземных органов. Для этого закладывали десять квадратов (50x50 см) случайным образом. На всех десяти квадратах надземную фитомассу срезали на уровне поверхности лишайников или головок мха и с этих же площадок собирали отмершие листья трав и кустарничков. Ветошь отделяли от зеленой фитомассы, которую разбирали по видам и по фракциям приростов текущего и прошлого годов, а так же на многолетние побеги. Всю надземную и подземную фитомассу высушивали при температуре 60°C и взвешивали. Для определения запасов мохово-лишайникового яруса, общей подземной растительной массы и подземной массы отдельных видов растений на этих же участках отбирали монолиты 10x10x10 см до глубины 30 см в восьмикратной повторности.

Чистая первичная продукция (NPP) складывалась из надземной продукции трав, кустарничков и мхов (ANP) и продукции подземных органов (BNP). Надземная продукция трав соответствует фракции фотосинтезирующей фитомассы. Надземная продукция кустарничков состоит из фитомассы прироста побегов текущего года с растущими на них листьями (Андреяшкина и др., 1981). Продукцию сфагновых мхов определяли по методике «индивидуальных меток» (Косых и др., 2017), а продукцию

лишайников – по изменению морфологических признаков стеблей и веточек (Андреев, 1954). Подземную продукцию трав и кустарничков определяли по приросту корней, корневищ и узлов кущения текущего года (Kosykh et al., 2008).

Степень разложения торфяных слоев определялась микроскопическим методом (ГОСТ 10650-2013). Названия почв приведены в соответствии с классификацией почв России (Классификация ..., 2004) и Всемирной базой почвенных ресурсов (IUSS Working Group WRB, 2006).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показывает морфологическое описание почвенных разрезов, профиль состоит из слоев торфа с различной степенью разложения. Средняя степень разложения торфяных слоев отмечена для почв плоских бугров. Наиболее высокой степенью разложения характеризуются почвенные горизонты евтрофной почвы хасырея – до 80%. В олиготрофных мочажинах степень разложения колеблется в пределах 5-10%. Мерзлотный горизонт находится на глубине 50 см. Мерзлота льдистая, надмерзлотная часть очень влажная. Следы морозной деформации отсутствуют. Реакция среды в органогенной толще меняется постепенно – от слабокислой к сильнокислой ($pH_{\text{водн.}}$ 3,4-4,4). Зольность торфа низкая в слоях T1-T3 мерзлотной почвы плоского бугра (разрез1), торфяные прослойки, состоят из остатков сфагновых мхов. У почв олиготрофных мочажин показатели зольности высоки (28,7-81,6%) за счет большого количества минеральных примесей. Зольность почв хасырея выше, чем почв плоского бугра и значительно колеблется в пределах от 7,8% до 24,4 %. Торф беден подвижными окислами зольных элементов. Содержание обменных катионов Ca^{2+} и Mn^{2+} распределено по профилю всех изучаемых почв неравномерно. Наибольшее количество катионов Ca^{2+} и Mn^{2+} отмечается в горизонте T1 (плоский бугор - 13,3; мочажина - 14,3; хасырей - 20,8). Средние величины содержания катионов в нижележащих слоях изменяются в пределах 7,3-9,0. Характер их распределения говорит об их нисходящем перемещении в периодически замерзающем и оттаивающем профиле почвы (Таблица 2). Анализ морфологических особенностей изучаемых почв показывает, что профили практически идентичны, а основное различие заключается в большей или меньшей степени разложения торфяных горизонтов. По мере увеличения степени разложения торфа снижается величина кислотности и возрастает степень насыщенности основаниями (Васильевская и др., 1986).

В торфяной почве бугров на глубине до 6 см запасы корней кустарничков сформировали около половины всех запасов растительного вещества 46% (7 т/га). С глубиной запасы корней снизились до 27% и составили 4,0 т/га. В верхнем слое почвы олиготрофной мочажины (сфагновый очес) подземные органы осок и пушиц составили 2,7 т/га или 34%, на глубине 10-20 (T1) отмечалось наибольшее количество корней и корневищ: они составили 3,6 т/га, ниже, т.е. в слое T2, фитомасса корней уменьшилась и составила около 1,7 т/га. В евтрофной торфяной почве хасыреев подземные органы осок и пушиц достигали наибольших величин в слое T1 на глубине 10-20 см - 10 т/га (70% от всех запасов подземных органов), ниже на глубине 20-30 в слое T2 запасы снижались (Рис. 4).

Таблица 2

Свойства почв ключевого участка

Горизонт	Глубина, см	pH водный	Зольность, %	Ca^{2+} водн.	Mg^{2+} водн.	Ca^{2+} обмен.	Mg^{2+} обмен.
				мг-экв на 100 г почвы			
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Торфяная олиготрофная мерзлотная. Разрез 1</i>							
Очес	0 – 6	4,4	–	6,7	2,4	4,7	2,1
At	6 – 10	3,7	19,1	6,6	3,8	7,8	5,2
T1	10 – 20	3,4	0,6	4,1	3,1	13,3	5,8
T2	20 – 30	3,5	0,6	6,6	3,1	9,0	2,2
T3	40 – 50	3,4	1,7	7,5	3,2	11,4	4,2
<i>Торфяная олиготрофная. Разрез 2</i>							
Очес	0 – 10	4,7	28,7	10,7	3,6	7,3	4,9
T1	10 – 20	4,1	43,5	8,0	4,0	14,3	7,7
T2	20 – 30	4,6	81,6	5,2	2,9	4,5	0,8

1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Торфяная евтрофная мерзлотная. Разрез 3</i>							
Очес	0 – 10	4,2	9,7	10,1	5,0	13,9	6,1
T1	10 – 20	4,3	24,4	2,9	1,0	20,8	1,6
T2	20 – 30	4,5	11,3	3,1	1,0	9,7	–
T2	30 – 40	4,6	7,8	4,1	1,0	9,0	2,4
T3	40–50	4,7	–	5,5	1,8	11,4	1,0

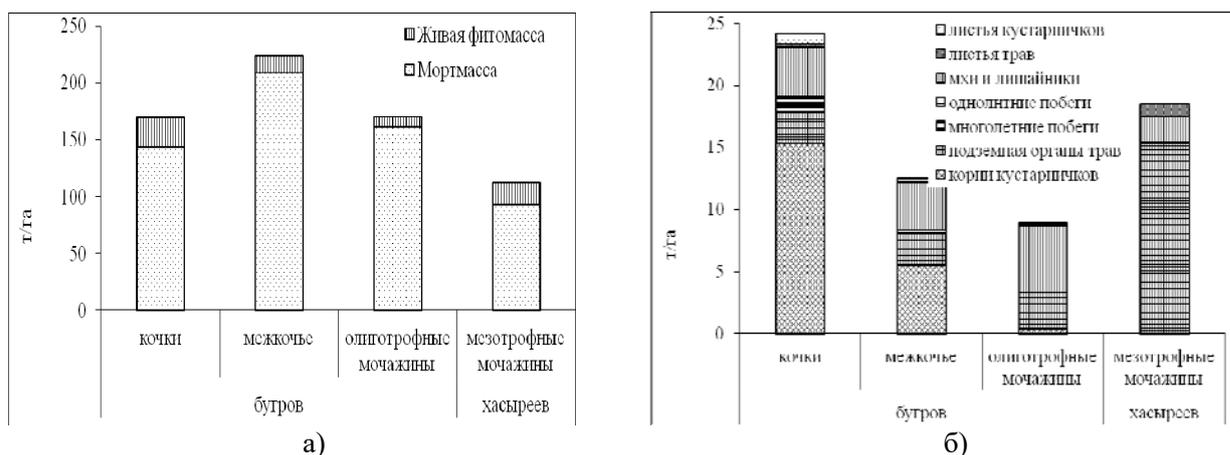


Рисунок 4. Запасы фитомассы и мортмассы (а), структура запасов фитомассы (б) на разных элементах рельефа плоскобугристого болота

Количество мертвого растительного вещества (мортмассы) в среднем составило 180 т/га, накапливаясь в межкочечных пространствах плоскобугристого болота до 210 т/га и уменьшаясь на кочках бугров до 140 т/га. В мочажинах его количество колебалось в пределах от 90 до 160 т/га (рис. 4а). В контрастных, но стабильных системах – кочках бугров и олиготрофных мочажинах - наблюдались меньшие колебания в запасах, чем в межкочьях. Вероятно, это связано с тем, что туда не проникает холодный ветер, что способствует образованию микроклиматических оазисов, вызывающих протаивание мерзлоты на большую глубину, нежели на буграх.

Живое растительное вещество (фитомасса) исследуемых экосистем - это наиболее лабильная фракция, так как зависит от погодных условий текущего года. Минимальные запасы живой фитомассы были в экосистемах олиготрофных осоково-сфагновых мочажин и составили 8 т/га. На мерзлых буграх запасы фитомассы достигли максимальной величины, на кочках - 24 т/га за счет вклада лишайников, запасы которых в два раза больше, чем в межкочьях. Вечнозеленые вересковые кустарнички, занимающие верхние части кочек, создают внутри куста ветровую тень, которая благоприятствует росту лишайников. Большая часть подземной живой массы (60-80%) на повышенных элементах рельефа была сформирована крупными и мелкими корнями кустарничков и их погребенными стволиками.

Запасы фотосинтезирующих частей мхов и лишайников достигли значительной величины и колебались в пределах от 3,8 до 4,0 т/га, что составило около 25% от общих запасов фитомассы (Рис. 4б). Запас подземных органов трав и кустарничков составил 60–70% от общего запаса растительного вещества. В мочажинах структура фитомассы изменилась. Лидирующие позиции перешли к сфагновым мхам и подземными органами трав, их количество в среднем составило около 6 т/га (Titlyanova et al., 1999).

Во всех исследованных экосистемах наибольшие запасы надземной фитомассы, не менее половины, приходились на мхи и лишайники. Наибольшими запасами фитомассы мхов отличались мочажины, а кочки бугров – наибольшими запасами фитомассы лишайников. С повышением трофности в мезотрофных мочажинах хасыреев запасы фитомассы мхов возросли до 2,1 т/га. На буграх приземный ярус сложен лишайниками, запасы фотосинтезирующей фитомассы которых составляли 4.0 т/га. В целом наибольшие запасы фитомассы оказались в экосистемах с

относительно высокой трофностью – в мезотрофных хасырях (18,5 т/га); в олиготрофной мочажине запасы снизились до 8,0 т/га.

Чистая первичная продукция экосистем плоскобугристого болота колебалась в пределах от 3,0 до 4,5 т/га в год в зависимости от видового состава растительного сообщества и топографии. В среднем она составила около 4,0 т/га в год при запасе фитомассы – 14,8 т/га, в хасырях продукция достигла максимальной величины – 8,5 т/га в год, при запасах фитомассы – 18,0 т/га. На плоских буграх отношение надземной продукции к подземной, где доминировали корни кустарничков, получилось 1:4; в мочажинах, где преобладали подземные органы осок и пушиц, отношение увеличилось и составило 1:6. Наибольший вклад в продукцию внесли подземные органы во всех исследуемых экосистемах (рис. 5).

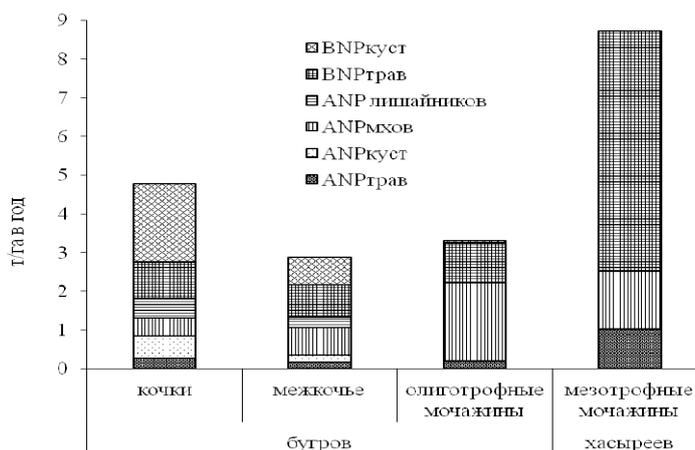


Рисунок 5. Чистая первичная продукция различных фракций растительного вещества на разных элементах рельефа плоскобугристого болота.

Вклад корней трав составил в олиготрофных мочажинах 1,0 т/га в год, в хасырях он возрос до 6,2 т/га в год, на буграх - 0,8-0,9 т/га в год. Вклад корней кустарничков на буграх варьировал от 0,7 до 2,0 т/га в год, в олиготрофных мочажинах составил 0,06 т/га в год. Вклад мхов и лишайников в продукцию экосистем менялся в пределах 1,0 - 2,0 т/га в год. Минимальный вклад в общую продукцию на повышенных и пониженных элементах рельефа внесли фотосинтезирующие части трав и кустарничков - 0,2 – 1,0 т/га в год (Косых, 2005).

Доля годичной продукции от общих запасов фитомассы во всех сообществах колебалась в пределах от 20 до 47%, и в целом подчинялась той же закономерности, что и распределение запасов фитомассы. Структура годичной продукции в изученных сообществах имела существенные различия, связанные с жизненной формой растений. Продукция трав и мхов во всех исследованных экосистемах составила меньше половины от общих запасов их живой фитомассы. Продукция кустарничков значительно меньше своих запасов из-за большого вклада многолетних побегов. Во всех сообществах продукция подземных органов растений оказалась выше продукции надземных.

ОБСУЖДЕНИЕ

Продукционный процесс значительно полнее изучен нами в болотах средней и южной тайги (Косых и др., 2010; Kosykh et al., 2008). Наиболее продуктивными в средней тайге являлись мезотрофные болота (8,90 т/га в год). В этих экосистемах в формирование общей продукции равную долю (40%) внесли подземные органы трав и мхи. Надземная продукция трав и кустарничков не превышала 20%. В экосистемах рямов и олиготрофных мочажин доминантами продукционного процесса выступали сфагновые мхи. Их прирост преобладал в общей продукции экосистем. Самая низкая продукция фитомассы наблюдалась в олиготрофных мочажинах. В экосистемах гряд на верховом болоте в результате выноса питательных веществ поверхностным стоком сформировались бедные экосистемы, продукция которых не превышает 5,60 т/га в год.

Продукционный процесс на болотах Канады изучали Ридер, Стюарт (Reader, Stewart, 1972) и Мор (Moore et al., 2002), на болотах Швеции - Валлен (Wallen, 1992) и на болотах Финляндии Меррей (Murray et al., 1993). По данным этих авторов чистая первичная продукция на изучаемых

ими болотах варьировала в пределах от 3,5 до 19,4 т/га в год и имела тенденцию к повышению с севера на юг. В Финляндии Джелмер (Nijp et al., 2014) определил запасы фитомассы на болотах Скандии, ее величина колебалась от 1,50 до 3,4 т/га. Сааринен (Saarinen, 1996) показал, что продукция корней *Carex* в травяных болотах составила 8,70 т/га в год, из которых на надземную продукцию приходилось 25% и на подземную – 75%. В болотах Южной Швеции продукция составляла 8,00 т/га в год, где на долю корней приходилось более 70 % (Wallen, 1992). Для болот северной тайги Западной Сибири доля подземных органов в продукции составляла в среднем 60% от общей продукции. Для Канады (Veilman et al., 2001) приводились данные общей продукции для северных болот: от 3,70 (плоскобугристые болота) до 4,50 т/га в год (олиготрофные болота). Полученные нами данные продукции для плоскобугристых болот северной тайги Западной Сибири не противоречат количественным характеристикам первичной продукции, полученным для тех же болот Канады, Швеции и Финляндии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях современной нагрузки на переувлажненные ландшафты северных территорий возникают негативные последствия, вызывающие деградацию мерзлоты и связанные с ней процессы смены функционирования болотных комплексов.

При проведении работ по определению запасов и продукции надземного и подземного растительного вещества болотных экосистем рассматривали распределение его в активном слое почвы (ежегодно оттаиваемый почвенный слой).

Исследования растительности и растительного вещества плоскобугристых болот показали, что средние значения запасов растительного вещества как в надземной, так и в подземной сфере сохранялись в течении ряда лет на одном уровне и соответствуют средним значениям продукции, полученным для болот Канады, Швеции и Финляндии.

Распределение запасов фитомассы и годичной продукции в изучаемых болотных экосистемах северной тайги зависило от условий минерального питания почвы и обводненности корнеобитаемого слоя. Доминирующая роль мхов в продукции экосистемы сохранялась только в олиготрофных мочажинах, на буграх преобладали лишайники, видовое разнообразие которых превосходило остальные группы растений. Максимальный вклад подземной продукции наблюдался в мезотрофных мочажинах и составлял 70 % от общей продукции; этот вклад определяли, в основном, подземные органы крупных осок и пушиц. Общая первичная продукция на буграх составляла 4,1 т/га в год, что в два раза ниже, чем на грядах болотных комплексов средней тайги.

При равных условиях в мочажинах и хасыреях запасы фитомассы и годичная продукция растут с увеличением трофности почвы, а в экосистемах бугров уменьшаются при наличии мерзлого слоя почвы. Анализ продуктивности на разных болотных почвах северной тайги позволил сделать вывод, что почвенные условия оказывают существенное влияние на интенсивность продукционного процесса, обуславливая в целом ее невысокий уровень. При среднем общем запасе биомассы, которая составляла 170-220 т/га, годичный прирост в надземной сфере изменялся в пределах 1,3–2,5 т/га в год, а в подземной 1-6 т/га в год.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ 18-44-700005 (работы по отбору проб и на экспериментальных площадках болотных комплексов для определению запасов и продукции растительного вещества); междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН №45 (выбор экспериментальных площадок в экотонах лес-болото, отбор проб почв и растительного вещества для аналитических работ), а также проекта РФФИ 18-05-60264 Арктика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.Н. Прирост кормовых лишайников и приемы его регулирования // *Труды Бот. ин-та АН СССР. Сер. 3. Геоботаника. Вып. IX. 1954. С. 11-74.*
2. Андреевская Н.И., Андреевская Ю.Г. Разногодичная изменчивость продукции надземной биомассы тундровых сообществ Зауралья // *Структура и функционирование биогеоценозов Приобского Севера. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1981. С.12-19.*
3. Базилевич Н.И., Титлянова А.А. *Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах.* Новосибирск: Из-во СО РАН, 2008. 376 с.

4. Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // *Криосфера Земли*. 2015. Т. 19. № 2. С. 114–120.
5. Василевская В.Д., Иванов В.В., Богатырев Л.Г. *Почвы Севера Западной Сибири*. М. Изд-во МГУ, 1986. 226 с.
6. *ГОСТ 10650-2013. Торф. Методы определения степени разложения*. М.: Издательство Стандартиформ, 2014. 13 с.
7. *Классификация и диагностика почв России* / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
8. Косых Н.П. Чистая первичная продукция болот Севера Западной Сибири // *Биология и биосфера: Сборник материалов Четвертой Научной Школы (12-15 сентября 2005 г.)* / Инишева Л.И. (отв. ред.). Томск: Изд-во ЦНТИ, 2005. С. 228-231.
9. Косых Н.П., Вишнякова Е.К., Коронатова Н.Г. и др. *Продукционно-деструкционные процессы в олиготрофных мочажинах средней тайги в ОТС-эксперименте* // Углеродный баланс болот Западной Сибири в контексте изменения климата: Материалы Международной конференции (Ханты-Мансийск, 19-29 июня 2017). Томск: Изд-во ТГУ, 2017. С.77-79.
10. Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Вишнякова Е.К. *Продукционно-деструкционные процессы в болотных почвах* // Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове: Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием. (Томск, 1-5 сент. 2010 г.). Т. II: Томск: Изд-вл ТГУ, 2010. С.105-108.
11. Мельцер Л.И. *Тундровая растительность* // Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. С. 41-54.
12. Москаленко Н.Г. *Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России*. Новосибирск: Наука, 1999. 280 с.
13. Павлов А. В. *Мониторинг криолитозоны*. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. 299 с.
14. Смоленцев Б.А. *Структура почвенного покрова Сибирских увалов*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 118с.
15. Тишков А.А. *Географические особенности первичных и вторичных сукцессий* // Общие проблемы биогеоценологии: Тезисы II Всесоюзного совещания (Москва, 11-13 ноября 1986 г.). М.: НЦБИ АН СССР в Пущине, 1986. С.61-63.
16. Тыртиков А.П. *Динамика растительного покрова северной тайги Западной Сибири и вечная мерзлота* // Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во МГУ, 1972. Вып.2. С. 100-114.
17. Beilman D.W., Yu Z., Vitt D.H. *Vodelling regional variability in peat accumulation response to climate in continental Western Canada* // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Тезисы Международного Симпозиума (Ноябрьск, 18-22 августа 2011). Васильев В.С., Титлянова А.А., Величко А.А. (отв.ред.). Томск: Изд-во науч.-технич. литературы, 2001. С.15-18.
18. Kosykh N.P., Koronatova N.G., Naumova N.B., Titlyanova A.A. *Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems* // *Wetlands ecology and management*. 2008. Vol.16. №2. P. 139-153. doi: [10.1007/s11273-007-9061-7](https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7)
19. Moore T.R. Bubier J.L., Froking S.E. et al. *Plant biomass, production, CO₂ exchange in an ombrotrophic bog* // *J.Ecol.* 2002. V. 90. P.25
20. Murray K.J., Tenhunen J.D., Nowak R.S. *Photoinhibition as a control on photosynthesis and production of Sphagnum mosses* // *Oecologia*. 1993. Vol. 96. №2. P. 200-207. doi: [10.1007/BF00317733](https://doi.org/10.1007/BF00317733)
21. Nijp J.J., Limpens J., Metselaar K. et al. *Can frequent precipitation moderate the impact of drought on peatmos uptake in northern peatlands?* // *New Phytol.* 2014. Vol. 203. №1. P. 70-80. doi: [10.1111/nph.12792](https://doi.org/10.1111/nph.12792)
22. Reader R.J., Stewart J.M. *The relationship between net primary production and accumulation for a peatland in Southeastern Manitoba* // *Ecology*. 1972. Vol.53. №6. P.1024-1037. doi: [10.2307/1935415](https://doi.org/10.2307/1935415)
23. Saarinen T. *Vascular plants as input of carbon in boreal sedge fens: control of production and partitioning of biomass*. Helsinki, 1999. 66 p.
24. Titlyanova A.A., Romanova I.P., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. *Pattern and process in above-ground and below-ground components of grassland ecosystems* // *Journal of vegetation Science*. 1999. Vol.10. Issue 3. P.307-320. doi: [10.2307/3237060](https://doi.org/10.2307/3237060)
25. Wallen B. *Methods for studying below-ground production in mire ecosystems* // *Suo*. 1992. Vol. 43. №4-5. P. 155-162.
26. *IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources 2006. A framework for international classification*. № 103. FAO, Rome, 2006. 144 p.

Поступила в редакцию 10.12.2018

Принята 26.04.2019

Опубликована 27.04.2019

Сведения об авторах:

Косых Наталья Павловна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); kosykh@issa-siberia.ru

Мироснычева-Токарева Нина Петровна – кандидат биологических наук, доцент, заведующая лабораторией биогеоценологии ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН, (г. Новосибирск, Россия); mirtok@issa-siberia.ru

Михайлова Елена Владимировна – кандидат географических наук, старший преподаватель кафедры экологии и природопользования Сибирского государственного университета геосистем и технологий; научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН, (г. Новосибирск, Россия); milek123@mail.ru

Колесниченко Лариса Геннадьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биоразнообразия и экологии Научно-исследовательского института биологии и биофизики Томского государственного университета (г. Томск, Россия); klg77777@mail.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

VEGETATION AND PLANT MATERIAL OF THE FLAT PALSA PEATLANDS

© 2019 N.P. Kosykh ¹, N.P. Mironycheva-Tokareva ¹, E.V. Mikhailova ²,
L.G. Kolesnichenko ³

Address: ¹Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: kosykh@issa-siberia.ru

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia. E-mail: milek123@mail.ru

³Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: klg77777@mail.ru

The aim of the study was to reveal peculiarities and regularities in plant material stock and production as dependent on the plant cover composition, soil characteristics and microrelief of the flat palsa mires in the northern taiga zone in West Siberia. The hollow-lake complexes on permafrost peatlands were chosen as the study sites. The work was carried out in 2013–2017. Plant material structure with differentiation between living and dead belowground organs was investigated and net primary production evaluated. Net primary production was found to range 3.0–4.5 t/ha per year depending on plant species composition of the phytocenosis studied. The production averaged 4.0 t/ha per year with phytomass stock averaging 14.8 t/ha, whereas in dried lake sites the net primary production reached 8.5 t/ha per year with phytomass stock estimated as 18.0 t/ha. On flat palsa sites the ratio of the aboveground shrub production to their belowground production was 1:4, while in hollow sites the belowground organs of sedges and cotton grasses accounted for most of the production, with the ratio of the above- to the belowground production estimated as 1:6. Belowground production share in the total production was found to be maximal (70%) in mesotrophic hollows mainly due to the major sedges and cotton grasses. The total primary production was estimated as 4.1 t/ha per year on flat palsa sites, 3.0 t/ha per year in oligotrophic hollows and reached a maximum of 8.5 t/ha per year in dried lake sites. Thus the average plant material stocks, both above- and belowground, seemed to be rather constant from year to year, and their estimates agreed well with those reported for mires in Canada, Sweden and Finland. Phytomass stocks and production in flat palsa mires in the northern taiga of the West Siberia were shown to depend on soil mineral nutrition and water availability in the root-inhabited layer. Only in oligotrophic hollows mosses were found to dominate in production, while the latter on the palsa sites was dominated by lichens, displaying great species diversity, significantly exceeding that of other plants. The other factors being equal, in hollow sites phytomass stocks and yearly production increased with increased nutrient availability, being decreased on palsa sites due to the permafrost layer. Analysis of phytomass production in northern taiga mires allows concluding that soil characteristics play important role in phytomass production, which was found to be rather low overall. Phytomass stock and production on palsa sites are limited by shallow thawing depths, which effect is exacerbated by drying and warming of the upper soil layer in summer, altogether resulting in unfavourable environment for root growth and development.

Key words: peatlands; permafrost; biological production; plant material; phytomass stock; mortmass stock; net primary production

How to cite: Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Mikhailova E.V., Kolesnichenko L.G. *Vegetation and plant material of the flat palsa peatlands // The Journal of Soils and Environment. 2019. 2(1). e55. doi: 10.31251/pos.v2i1.55 (in Russian with English abstract).*

REFERENCE

1. Andreev V.N. *Growth of forage lichens and methods of its regulation* In book: Proc. of Botanic Institute of the USSR AS. Ser. 3 Geobotany. Issue IX, 1954, p.11-74. (in Russian)
2. Andreiashkina N.I., Andreiashkina Yu.G. *Multi-year variability of above-ground biomass production in tundra communities of Trans-Urals* In book: Structure and functioning of biogeocenoses of the Priobsky North. Sverdlovsk: Publ. House of the UNC of the USSR AS, 1981, p.12-19. (in Russia)
3. Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. *Biotic turnover on five continents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems*. Novosibirsk, Publ. SB RAS, 2008, 376 p. (in Russian)
4. [Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Analysis of the change in the number of thermokarst lakes in the permafrost zone of Western Siberia based on satellite images, *Earth's Cryosphere, 2015, Vol. 19, No 2, p. 114–120.* \(in Russian\)](#)
5. Vasilevskaya V.D., Ivanov V.V., Bogatyrev L.G. *Soils of the North of Western Siberia*. Moscow, Publ. House of MSU, 1986, 226 c. (in Russian)
6. [GOST 10650-2013. Peat Methods for determining the degree of decomposition. Moscow: Standard Publishing House, 13 p. \(in Russian\)](#)
7. *Soil classification and diagnostic of Russia / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian)*
8. Kosykh N.P. *Net Primary Production marshes of the North of Western Siberia* In book: Biology and the Biosphere: Proc. of the 4th Sci. School (Tomsk, 12-15 September 2005). Inisheva L.I. (Ed.). Tomsk: Publishing House of CSTI, 2005, p. 228-231. (in Russian)
9. Kosykh N.P., Vishnyakova E.K., Koronatova N.G. et al. *Production-destruction processes in oligotrophic hollows in the middle taiga in the OTS experiment* In book: Carbon Balance of Marshes in Western Siberia in the Context of Climate Change: Proc. of the Inter. Conf. (Khanty-Mansiysk, June 19-29, 2017). Tomsk: Publ. House of TSU, 2017, p.77-79. (in Russia)
10. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Vishnyakova E.K. *Production and destruction processes in bog soils* In book: Reflection of Bio-, Geo-, Anthropospheric interactions in soils and soil cover: Proc. of the IV Rus. Sci. Conf. with Inter. participation. (Tomsk, September 1-5, 2010). Vol. II, Tomsk, 2010. p. 105-108. (in Russian)
11. Melzer L.I. *Tundra vegetation* In book: Vegetation cover of the West Siberian Plain, Novosibirsk: Nauka Publ., 1985, p. 41-54. (in Russian)
12. Moskalenko N.G. *Anthropogenic dynamics of vegetation of plains in russian cryolithozone*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1999, 280 p. (in Russian)
13. Pavlov A.V. *Monitoring of the cryolithozone*. Novosibirsk: Academic Publ. House "Geo", 2008, 299 p. (in Russian)
14. Smolentsev B.A. *The structure of the soil cover of the Siberian ridges*. Novosibirsk: Publ. House of the SB RAS, 2002, 118 p. (in Russian)
15. Tishkov A.A. *Geographical features of primary and secondary successions* In book: General problems of biogeocenology: Book abstracts of the II Soviet Union Conf. (Moscow, 11-13 November 1986). Moscow.: NCBI AS of the USSR in Pushchin, 1986, p. 61-63. (in Russian)
16. Tyrtikov A.P. *Dynamics of the vegetation cover of the northern taiga of Western Siberia and the permafrost* in book: Natural conditions of Western Siberia. Moscow.: Publ. House of MSU, 1972, Issue 2, p. 100-114. (In Russian)
17. Beilman D.W., Yu Z., Vitt D.H. *Vodelling regional variability in peat accumulation response to climate in continental Western Canada* In book: West Siberian peatlands and Carbon cycle: past and present: Book abstracts of the International Field Symposium (Noyabrsk, 18-20 August, 2001). Vasiliev V.S., Titlyanova A.A., Velichko A.A. (Eds.). Tomsk: Publ. House of Sci. and Tech. Literature, 2001, p.15-18.
18. [Kosykh N.P., Koronatova N.G., Naumova N.B., Titlyanova A.A. Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems, *Wetlands ecology and management, 2008, Vol.16, No2, p. 139-153.* doi: 10.1007/s11273-007-9061-7](#)
19. [Moore T.R. Bubier J.L., Froliking S.E. et al. Plant biomass, production, CO₂ exchange in an ombrotrophic bog// *J.Ecol. 2002. V. 90. P.25*](#)
20. [Murray K.J., Tenhunen J.D., Nowak R.S. Photoinhibition as a control on photosynthesis and production of Sphagnum mosses, *Oecologia, 1993, Vol. 96, No2, p. 200-207.* doi: 10.1007/BF00317733](#)
21. [Nijp J.J., Limpens J., Metselaar K. et al. Can frequent precipitation moderate the impact of drought on peatmos uptake in northern peatlands?, *New Phytol, 2014, Vol. 203, №1, p. 70-80.* doi: 10.1111/nph.12792](#)
22. [Reader R.J., Stewart J.M. The relationship between net primary production and accumulation for a peatland in Southeastern Manitoba, *Ecology, 1972, Vol.53, No6, p.1024-1037.* doi: 10.2307/1935415](#)

23. Saarinen T. *Vascular plants as input of carbon in boreal sedge fens: control of production and partitioning of biomass*. Helsinki, 1999. 66 p.
24. Titlyanova A.A., Romanova I.P., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. Pattern and process in above-ground and below-ground components of grassland ecosystems, *Journal of vegetation Science*, 1999, Vol.10, Issue 3, p.307-320. doi: [10.2307/3237060](https://doi.org/10.2307/3237060)
25. Wallen B. Methods for studying below-ground production in mire ecosystems, *Suo*, 1992, Vol. 43. Issue 4-5, p. 155-162.
26. *IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources 2006. A framework for international classification*. № 103. FAO, Rome, 2006. 144 p.

Received 10 December 2018

Accepted 26 April 2019

Published 27 April 2019

About the authors

Kosykh Natalia P. - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Biogeocenology Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); kosykh@issa-siberia.ru

Mironycheva-Tokareva Nina P. - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Biogeocenology, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); mirtok@issa-siberia.ru

Mikhailova Elena V. - Ph.D. (Geography), Senior Lecturer, Department of Ecology and Environmental Management, Siberian State University of Geosystems and Technologies; Research Associate in the Laboratory of Biogeocenology, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (Novosibirsk, Russia); milek123@mail.ru

Kolesnichenko Larisa G. - Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Biodiversity and Ecology of the Research Institute of Biology and Biophysics of Tomsk State University (Tomsk, Russia); klg77777@mail.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article are available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ
ПОЧВ ЧЕРНОЗЕМНОГО РЯДА**

© 2019 Оленченко В.В. ^{1,2}, Смоленцева Е.Н. ³, Заплавнова А.А.²,
Русалимова О.А. ³, Барсуков П.А. ³

Адрес: ¹ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, проспект Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: olenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова, 2, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: barsukov@issa-siberia.ru

Цель исследования: Оценка возможности применения геофизических методов при исследовании строения и свойств почв черноземного ряда.

Место и время проведения. Полевые исследования выполнены в период июнь – октябрь 2018 г. на пахотных почвах (агрочернозем и агростратозем) Буготакского мелкосопочника, который является частью Предсалаирской денудационно-аккумулятивной равнины, расположенной в юго-восточной части Западной Сибири в правобережной части бассейна реки Оби.

Методология. Изучение почв проводили общепринятыми в почвенно-агрохимических исследованиях методами, а также геофизическими методами, включающими магнитометрию, электротомографию и георадиолокацию. Почвенные исследования включали морфологическое описание строения почв, отбор образцов по генетическим горизонтам, анализ физических, физико-химических и химических свойств почв (до 28 показателей), характеризующих потенциальное и эффективное плодородие. Поиск зависимостей между почвенными параметрами и результатами геофизических исследований, а также между отдельными свойствами почв выполняли с помощью стандартных методов математической статистики (корреляционный и регрессионный анализ).

Основные результаты. В условиях близко залегающих коренных пород применение магниторазведки для решения актуальных для почвоведения задач не представляется возможным. При высоких значениях содержания общего углерода в гумусово-аккумулятивных горизонтах изученных почв закономерность снижения удельного электрического сопротивления (УЭС) с увеличением содержания почвенного органического вещества перестает работать. Было установлено, что УЭС зависит от текстуры почвы. Получена закономерность: утяжеление гранулометрического состава вызывает снижение УЭС. Это позволяет обнаружить глубину залегания иллювиальных горизонтов в аккумулятивно-гумусовых и, тем более, в текстурно-дифференцированных почвах. УЭС гумусово-аккумулятивного слоя (ниже 10 см) агрочернозема составляет около 70 Ом·м, а приповерхностный слой почвы 0-10 см (подвергнутый плоскорезной обработке на эту глубину) диагностируется пониженным до 40-45 Ом·м УЭС. Наиболее перспективным является комплексное применение электротомографии и георадиолокации, которое позволяет оценить мощность и нижнюю границу гумусово-аккумулятивного слоя, включая его разделение на агротемногумусовый (пахотный) и темногумусовый горизонты, а также определить глубину залегания иллювиального горизонта и верхнюю границу аккумулятивно-карбонатного горизонта.

Заключение. Полагаем, что геофизические методы будут полезны в почвенно-генетических исследованиях и крупномасштабном почвенном картировании за счет более корректного учета естественной неоднородности распределения в пространстве свойств почв, характеризующих ее потенциальное плодородие. Крупномасштабные почвенные карты являются необходимой основой для решения многих практических задач: мониторинга изменения свойств почв при их деградации в результате эрозии, оценки загрязнения почв поллютантами, проведения почвенной диагностики для определения запаса питательных элементов в почвах и расчета доз удобрений. Поиск эмпирических взаимосвязей между геофизическими параметрами и урожайностью культур в настоящее время представляется довольно амбициозной задачей, поскольку урожайность в большей степени зависит не от «базовых» свойств почв (с которыми геофизические параметры могут коррелировать), а от содержания в почве доступных растениям пулов элементов минерального питания и внешних (не связанных с почвой) факторов: влаго- и теплообеспеченности вегетационного сезона, внесения удобрений и пестицидов.

Ключевые слова: электротомография; георадиолокация; магнитометрия; свойства почв; плодородие; черноземные почвы; Буготокский мелкосопочник, Западная Сибирь

Цитирование: Оленченко В.В., Смоленцева Е.Н., Заплавнова А.А., Русалимова О.А., Барсуков П.А. Применение геофизических методов для оценки строения и свойств почв черноземного ряда // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 1. е57. doi: [10.31251/pos.v2i1.57](https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.57)

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных причин низкой урожайности является истощение естественного плодородия почв в результате их длительного сельскохозяйственного использования при недостаточном уровне применения удобрений. Расчет оптимальных доз удобрений основан на фактическом содержании элементов питания в почве, которое зависит от естественной гетерогенности почвенного покрова и часто проявляется в значительной степени даже в пределах одного поля. Для учета неоднородности почвенного покрова проводят крупномасштабное почвенное картографирование, а уже на его основе выполняют детальное агрохимическое обследование почв, включающее определение запасов питательных элементов. Мировой опыт последних десятилетий показывает эффективность применения геофизических методов оценки поверхностного слоя почв для решения задач почвенного картографирования (Mathe, Leveque, 2003; Shi, Ciorra, 2006; Handbook ..., 2008; Пягай и др., 2009; Rogers et al., 2009; Воронин, 2015; Algeo et al., 2016). Важно отметить, что геофизические методы, по сравнению с традиционным обследованием почв, являются гораздо менее время- и трудозатратными.

Почвенный покров Западной Сибири в силу специфики почвообразующих пород и биоклиматических условий, контролирующих процессы почвообразования, имеет свои особенности, которые следует учитывать при оценке свойств почв с помощью геофизических методов. Работы, посвященные этой тематике, практически отсутствуют в нашем регионе, за исключением нашей недавней публикации (Заплавнова и др., 2018). Из других работ, связанных с применением геофизических методов в Сибири, но лишь косвенно относящихся к теме оценки строения и свойств почв, можно отметить лишь работы по использованию метода малоглубинного индукционного частотного зондирования при изучении подповерхностных неоднородностей в Западной Сибири (Манштейн, 2010) и использование электрофизических методов при изучении электрических свойств черноземных почв в Восточной Сибири (Башкуев, 2014).

Основная цель наших исследований состояла в поиске связи между морфологическими характеристиками почв и их свойствами, характеризующими потенциальное и эффективное плодородие, определяемыми общепринятыми в почвоведении методами, и результатами обследования поверхностного слоя почв геофизическими методами с помощью площадной магнитной съемки, электротомографии и георадиолокации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнены на территории Буготакского мелкосопочника, который является частью Предсалаирской денудационно-аккумулятивной равнины, расположенной на юге Западной Сибири в правобережной части бассейна Оби. Буготакский мелкосопочник представляет собой возвышенную холмистую равнину с абсолютными отметками высот 200-350 м. Основными элементами рельефа являются склоны, преимущественно выпуклой формы (Шапорина и др., 2016). Коренные породы сложены среднедевонской буготакской толщей (D2bg), представленной осадочно-вулканогенным комплексом. В составе этой толщи преобладают миндалекаменные диабазовые и полевошпатовые порфириды, спилиты, их туфы и туфобрекчии. Породы чрезвычайно неравномерно динамометаморфизованы, расланцованы до альбито-хлоритотремолитовых метаморфических сланцев. Осадочные породы состоят из туфопесчаников и туфоалевролитов с прослоями известняков, часто метаморфизованными до мрамора (Геологическая ..., 1963).

Почвообразующими породами преимущественно являются четвертичные лессовидные карбонатные суглинки мощностью до 10-15 м (Танасиенко, 2004). Эти породы характеризуются высокой пористостью и хорошо выраженной вертикальной столбчатостью. Их особенностью также является высокое содержание фракции крупной пыли (40-50%), почти полное отсутствие крупнопесчаной фракции, высокое содержание карбонатов (до 10% CaCO_3) и отсутствие засоления. По гранулометрическому составу эти породы весьма однородны и относятся к иловато-

крупнопылеватым средним и тяжелым карбонатным суглинкам (Смоленцева и др., 2018). Еще одна особенность данного типа суглинков заключается в их характерном микроморфологическом строении, а именно конгломеративно-ячеистой структуре, когда крупные пылеватые и даже песчаные частицы составляют ядро микроагрегата, вокруг которого глинистые частицы связывают пылеватые, образуя конкреции с губчатой поверхностью (Никитенко, 1963). Дальнейшая цементация происходит под действием минеральных растворов, перемещающихся в виде пленочной влаги или коллоидов. Такие структурные связи между частицами в лессовидном суглинке часто очень слабы и при достаточно длительном воздействии воды, вследствие выщелачивания карбонатного или размягчения глинисто-коллоидального цемента, начинают ослабевать и утрачиваться, что создает условия для легкой размываемости этого материала в поверхностных слоях почвы (Шапорина и др., 2016).

По биоклиматическому районированию исследуемая территория относится к лесостепной зоне. Климат – резко континентальный, характеризуется холодной и продолжительной зимой, довольно жарким и коротким летом и короткой, порой с бурным снеготаянием, весной. Сумма осадков в среднем 400 мм с максимумами до 550 мм, из них доля осадков зимнего периода составляет до 40% (Шапорина и др., 2016).

Наши исследования выполнены на двух ключевых площадках в пределах одного поля (пашня), различающихся залеганием по элементам рельефа (позиции катены):

ЕL – элювиальная позиция катены, расположенная в верхней части склона, т.е. на участке, слабо подверженном водной эрозии,

АК – аккумулятивная позиция катены, расположенная в самой нижней части склона, куда переносится значительное количество смываемых частиц поверхностных горизонтов почв, залегающих выше по склону в результате водной эрозии (особенно после весеннего снеготаяния). Обследование поверхности почвы геофизическими методами ключевой площадки АК включало также расположенный рядом целинный участок с естественной луговой растительностью.

Учитывая, что геофизические методы исследований знакомы не для всех представителей широкой аудитории почвоведов, остановимся на описании этих методов более подробно.

Электротомография относится к электроразведочным методам геофизики и основана на различии почв, горных пород и руд по удельному электрическому сопротивлению (УЭС). С помощью заземленных питающих электродов через исследуемый объект пропускается электрический ток, а с помощью приемных электродов измеряется разность электрических потенциалов и рассчитывается определенный параметр – т.н. кажущееся удельное электрическое сопротивление. Глубина проникновения тока в почву возрастает при увеличении расстояния между питающими электродами («разноса»). Поэтому для получения эффекта зондирования необходимо измерить УЭС при разных «разносах». В технологии электротомографии измерение УЭС выполняется с помощью многоэлектродного кабеля, подключённого к 48 электродам. Специальный электроразведочный прибор коммутирует различные комбинации электродов, изменяя расстояние между ними, при этом варьируется глубинность зондирования и расположение точки (к которой относят значение измерений) вдоль профиля. Измеренные данные обрабатываются в программе автоматической двумерной инверсии, которая подбирает геоэлектрическую модель разреза, с наименьшей ошибкой приближенную к зарегистрированному электрическому полю (Бобачев, Горбунов, 2005; Балков и др., 2012). По распределению УЭС пород в разрезе делают выводы об их влажности, литологическом составе, засоленности. Для почв, подверженных сезонной мерзлоте или многолетнемерзлых почв электротомография позволяет дать грубую оценку уровня льдистости пород, минерального состава, получить представление о зонах деградации многолетнемерзлых пород.

На выбранных нами ключевых площадках зондирование методом электротомографии было выполнено с помощью аппаратуры «Скала-48». Расстояние между электродами составляло 0.2 м, при этом длина одного профиля была равна 9.4 м. Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже, а максимальная глубинность исследования в центральной части профиля составила 2.0 м. При площадных исследованиях на площадках EL и АК расстояние между профилями составляло 2.0 м. Обработка данных электротомографии проводилась с помощью программ Res2Dinv и Res3Dinv. При инверсии использовали робастный способ с ограничением гладкости. В результате были построены геоэлектрические разрезы по каждому из профилей и объёмные геоэлектрические модели исследуемых площадок.

Метод **георадиолокации** основан на отражении электромагнитных волн от границ неоднородностей в изучаемой среде, на которых скачкообразно изменяются электропроводность и диэлектрическая проницаемость. Основными величинами, измеряемыми при георадиолокации, являются время пробега электромагнитной волны от источника до отражающей границы и обратно до приемника, а также амплитуды этих отражений. Передающая антенна георадара излучает короткие (единицы и доли наносекунды) электромагнитные импульсы, обеспечивающие высокую разрешающую способность и широкий спектр радиолокационных сигналов. Генерируемый электромагнитный импульс отражается от границ находящихся в среде предметов с контрастными электрическими свойствами (как металлических, так и неметаллических), или иных неоднородностей, отличающихся от вмещающей среды по диэлектрической проницаемости или электропроводности. Такими неоднородностями могут быть пустоты, границы слоев различных пород, области с различной влажностью и т.д. Отраженный сигнал принимается приемной антенной, преобразуется в цифровой вид и записывается для дальнейшей обработки. При перемещении георадара по поверхности исследуемой среды на экран монитора выводится совокупность сигналов (радарограмма или профиль), по которому определяют местонахождение, глубину залегания и протяженность объектов. Глубинность и разрешающая способность георадиолокации зависят от центральной частоты спектра зондирующего импульса и достигает максимального значения (~20 м) при измерениях на сравнительно низких частотах (50-90 МГц) в средах высокого удельного электрического сопротивления, характеризующихся малым затуханием волн (Владов и др., 1997; Владов, Старовойтов, 2004). Результатом георадиолокационного зондирования является георадиолокационный профиль или радарограмма – массив амплитуд отражённых и дифрагированных волн с дополнительной информацией по каждому пикету зондирования, записанный в цифровом виде и визуализируемый в виде временного или вертикального разрезов исследуемой среды. Георадиолокация позволяет определить границы слоев / горизонтов почвы, различающихся по содержанию органического вещества, и их мощность. Для почв, подверженных сезонной мерзлоте или многолетнемерзлых почв с помощью георадиолокации возможно провести картографирование мощности деятельного (активного) слоя, определить верхнюю часть мерзлого слоя почвы / грунта, распределение жильных льдов и таликовых зон.

На ключевых площадках ЕЛ и АК георадиолокацию (ГРЛ) разрезов проводили с помощью георадара ОКО-2 с антенной центральной частоты 700 МГц. На обеих площадках расстояние между профилями ГРЛ составляло 0.5 м; длина профилей – 9.4 м. Обработку данных выполняли с помощью программы Geoscan32. В результате строили радарограммы по профилям и трёхмерную визуализацию георадарного сигнала в виде куба данных.

Магнитометрия (магниторазведка). Метод основан на различии горных пород и почв по магнитным свойствам (остаточной намагниченности, магнитной восприимчивости). Магнитные свойства пород напрямую зависят от содержания минералов железа (в основном магнетита). В окислительной обстановке, где железо переходит в трёхвалентную форму, магнитные свойства понижаются. Магнитное поле измеряется с помощью специальных приборов – магнитометров. В данной работе применяли протонные магнитометры, чувствительным элементом которых является жидкость, богатая протонами (вода, спирт).

Обычно при измерениях используют два магнитометра — пешеходный (который перемещают по участку исследований для измерения поля) и магнитовариационную станцию (неподвижный, расположенный вблизи участка). После измерений производят учёт вариаций — вычитают значения, полученные на магнитовариационной станции из измеренных на участке. Это позволяет устранить изменения поля в процессе измерений (вариации), вызванные внешними источниками, связанными с солнечной активностью. Глубинность исследования методом магнитометрии зависит от размера исследуемого участка, детальности съёмочной сети и точности измерений. По результатам съёмки строят карту магнитных аномалий и численными методами определяют источники этих аномалий, после чего выполняют интерпретацию данных – устанавливается связь между источниками аномалий и геологическими объектами на основании представлений о магнитных свойствах и строении исследуемой среды (Инструкция по магниторазведке..., 1981). Магнитометрия позволяет выявить особенности строения четвертичной толщи. Для почв, подверженных сезонной мерзлоте или многолетнемерзлых почв с помощью магнитометрии возможно выполнить картирование скрытых полигонально-жильных льдов, сделать анализ магнитной восприимчивости образцов и оценить содержание льда и органического вещества в верхней части почвы / грунта (при наличии прецизионной магнитной съёмки).

В пределах исследуемого нами участка магнитометрия выполнена с помощью оверхаузеровского магнитометра GEM-19. Измерения выполнены по профилям, расстояние между которыми составляло около 10 м. Привязку профилей на местности осуществляли с помощью GPS. Частота измерений по профилю составляла 1 измерение в 3 секунды. Для учета суточных вариаций геомагнитного поля использовали данные магнитной обсерватории г. Новосибирск. Построение карты аномального магнитного поля выполнено с помощью программы Surfer.

Почвенные образцы были проанализированы общепринятыми в почвенно-агрохимических исследованиях методами. Гранулометрический состав определяли по Качинскому (Шейн, Гончаров, 2006) с пересчетом полученных этим методом результатов на фракции почвенных частиц в соответствии с международной классификацией текстуры почвы (Шейн, 2009). Общие углерод и азот определяли на элементном анализаторе PerkinElmer 2400 Series II (PerkinElmer, США). Анализ карбонатов проводили гравиметрическим способом (Теория ..., 2006), pH водной суспензии – потенциометрическим способом (Теория ..., 2006), удельную электропроводность почвенной суспензии – потенциометрическим способом (Пансю, Готеру, 2014). Обменные катионы (калий, кальций и магний) анализировали по Шолленбергеру, используя ацетатно-аммонийный буфер с pH 7.0 в качестве экстрагента (Теория ..., 2006). Нитратный азот определяли потенциометрическим способом с использованием ионоселективного электрода в экстрагенте 0.015M K₂SO₄ (Гинзбург, 1975; Гамзиков, 2013); легкоподвижный фосфор – в экстрагенте 0.015M K₂SO₄ по Карпинскому-Замятиной (Гинзбург, 1975); подвижный фосфор – в экстрагенте 0.2 н раствора аммония яблочнокислого по Николову (Берхин и др., 1989) обменный калий – в экстрагенте 1M CH₃COONH₄ по Масловой (Теория ..., 2006). Потери при прокаливании (ППП) анализировали при сжигания навески почвы при температуре 550°C (Dean, 1974). В дополнении к этому мы определяли потери массы при температурах 105°C, 130°C и 900°C. Таким образом, нашу модификацию метода определения ППП можно рассматривать как «сокращенную» модификацию термогравиметрического анализа ПОВ (Siewert, 2004).

Статистическая обработка данных выполнена в пакете программ прикладной статистики SNEDECOR V5.80 (Сорокин, 2012).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морфологическое строение профиля почв

На ключевых площадках были заложены почвенные разрезы, проведено детальное описание морфологического строения профилей почв, отобраны почвенные образцы по генетическим горизонтам.

Морфологическое описание почвы площадки EL (элювиальная позиция катены).

Координаты: 55°03'40" с.ш. 83°51'56" в.д. Рельеф: Присалаирская аккумулятивно-денудационная равнина, Буготакский мелкосопочник. Холмисто-увалистый рельеф, верхняя часть межсопочной седловины. Ровный водораздельный участок. Высота над уровнем моря 305 м. Тип использования: пашня, посев яровой пшеницы. Весной 2018 г. проведена плоскорезная обработка на глубину 10 см. Вскипание от 10%-ной HCl – бурное, с глубины 87-88 см, наличие карбонатов по порам в виде псевдомицелия и редкие сегрегационные формы (белоглазка) в карбонатно-аккумулятивном горизонте.

Название почвы по классификации 1977 г.: Чернозем оподзоленный обычный среднемощный среднегумусный тяжелосуглинистый (Классификация ..., 1977).

Название почвы по классификации 2004 г.: Агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный маломощный мелкопахотный сильно выщелоченный тяжелосуглинистый. Ствол: Постлитогенные почвы; отдел: Аккумулятивно-гумусовые (Полевой ..., 2008).

Фото профиля почвы	Индексы горизонта, мощность, см	Описание горизонта
	PU' 0-10	Влажный, тёмно-серый (10YR 3/1; very dark gray), порошисто-комковатый, плотноват, тяжелосуглинистый, корни растений, прошлогодние пожнивные остатки. Переход ясный по цвету и плотности, граница ровная.
	PU'' 10-20	Влажный, тёмно-серый (10YR 3/1; very dark gray), окраска однородная, тяжелосуглинистый, крупнокомковатый, плотноват, но плотнее предыдущего, много корней. Переход заметный по структуре и плотности, граница ровная.
	AU 20-38	Влажный, тёмно-серый (10YR 3/1; very dark gray), почти чёрный, окраска однородная, тяжелосуглинистый, зернистокомковатый, есть копролиты, уплотнён, мелкопористый, много корней, ходы червей. Переход заметный по цвету, граница слабоволнистая.
	AUBIel 38-46	Влажноват, пятнистый, на серовато-тёмно-буром фоне (10YR 4/2; dark grayish brown), бурые пятна и вертикальные полосы, тяжелосуглинистый, комковато-мелко-ореховатый, структура однопорядковая, скелетаны на поверхности агрегатов, мелко трещиноват, плотноват, корни растений, ходы червей. Переход ясный по цвету и структуре, граница мелко языковатая.
	BIel 46-60	Влажноват, пятнистый, на тёмно-коричневом (10YR 4/3; dark brown) фоне тёмно-бурые и тёмно-серые вертикальные полосы и пятна, тяжелосуглинистый, комковато-мелкопризматический, структура однодвухпорядковая, трещиноват. Коричневые глинистые тонкие (до 1 мм) кутаны по поверхности агрегатов и по вертикальным стенкам трещин. Поверх кутан лежат пылеватые скелетаны (кремнезёмистая присыпка) заметные при высыхании. Плотный, слабо пористый, единичные корни растений. Ходы корней и червороины с копролитами из материала тёмногумусового горизонта. Переход заметный по структуре и окраске, граница волнистая.
	BI 60-87	Влажноват, фон желтовато-коричневый (10YR 5/3; brown), редкие вертикальные тёмно-серые полосы, легкоглинистый, мелко призматический. Слабые тёмно-коричневые глинистые кутаны по граням агрегатов, но меньше в BIel. Скелетаны отсутствуют. Плотный, единичные корни растений. Переход резкий по вскипанию, граница волнистая.
	BCAnc 87-110	Влажноват, однородно окрашен, палево-светло-коричневый (10YR 6/3; pale brown), легкоглинистый, мелко глыбистый, плотноват, крупно пористый, бурно вскипает от HCl, наличие карбонатов в виде псевдомицелия по порам, а также общая пропитка, единичные корни. Переход резкий по вскипанию, граница волнистая.
BCAnc 110-140	Влажноват, однородно окрашен, желтовато-светлокоричневый (10YR 6/4; light yellowish brown), легкоглинистый, мелко глыбистый, плотноват, крупно пористый, бурно вскипает от HCl, наличие карбонатов в виде псевдомицелия и белоглазки (сегрегационные формы), единичные корни. Переход постепенный, граница слабо волнистая.	

	Сса 140-200	Влажноват, палево-светло-коричневый (10YR/7/3; very pale brown), легкоглинистый, мелко-глыбистый, плотноват, крупнопористый, бурно вскипает от HCl, карбонаты диффузно-рассеянные (пропитка). Лессовидный карбонатный суглинок.
--	----------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Типодиагностическими горизонтами агрочернозема глинисто-иллювиального являются поверхностный агротемногумусовый, расположенный под ним темногумусовый и срединный глинисто-иллювиальный. Переходный горизонт AUBIel и верхняя часть срединного горизонта этого профиля имеют пылеватые скелетаны на поверхности структурных агрегатов, которые диагностируют элювиированный подтип. Карбонаты расположены на глубине 87 см, что соответствует видовому признаку сильно выщелоченный (Смоленцева и др., 2018).

Морфологическое описание почвы площадки АК (аккумулятивная позиция катены).

Координаты: 55°03'37" с.ш. 83°52'06" в.д. Рельеф: Присалаирская аккумулятивно-денудационная равнина, Буготакский мелкосопочник. Холмисто-увалистый рельеф, верхняя часть ложбины стока на склоне южной экспозиции. Высота над уровнем моря 295 м. Тип использования: Пашня, посев пшеницы. Карбонаты в профиле отсутствуют до глубины 300 см.

Название почвы по классификации 1977 г.: Луговато-черноземная оподзоленная мощная малогумусная тяжелосуглинистая намытая (Классификация ..., 1977).

Название почвы по классификации 2004 г.: Агростратозем темногумусовый на агрочерноземе глинисто-иллювиальном мощном мелкопахотном тяжелосуглинистом. Ствол: Синлитогенные почвы; отдел: Стратоземы (Полевой ..., 2008).

Фото профиля почвы	Индексы горизонта, мощность, см	Описание горизонта
	PU [*] 0-10	Влажноват, тёмно-серый (10YR 4/1; dark gray), мелкие светло-бурые пятна, комковато-глыбистый, плотноват, тяжелосуглинистый, корни растений, прошлогодние пожнивные остатки. Переход ясный по плотности, граница ровная.
	RU 22-70	Влажный, с глубиной становится сырым, местами сочится вода, окраска неоднородная, на буровато-тёмносером фоне (10YR 4/2; dark grayish brown) мелкие светло-бурые пятна, глыбистый, плотный, тяжелосуглинистый, корни растений. Переход заметный по цвету и плотности, граница волнистая.
	[AU] 70-90	Влажный, тёмно-серый (10YR 3/1; very dark gray), окраска однородная, крупно комковатый, плотноват, тяжелосуглинистый, редкие корни растений. Переход заметный по окраске, граница волнистая.
	[AUBI] 90-130	Влажноват, неоднородно окрашен, на буром фоне тёмно-серые полосы и пятна, мелко призмочный, по вертикальным поверхностям агрегатов – слабые тёмнокоричневые глинистые кутаны, тяжелосуглинистый, плотноват, мелко трещиноват, мелко пористый, единичные корни растений, крупная кротовина заполнена материалом из нижележащего горизонта. Переход заметный по цвету, граница волнистая.
	[BI] 130-200	Влажноват, желтовато-коричневый (10YR 5/4), редкие вертикальные тёмно-серые полосы, тяжелосуглинистый. Мелко-ореховато-призматический, структура двухпорядковая: призмы распадаются на ореховатые отдельности. Слабые тёмно-коричневые глинистые кутаны по граням агрегатов. Плотный, единичные корни растений.

Типодиагностическими горизонтами агростратозема темногумусового являются поверхностный агротемногумусовый горизонт и расположенный под ним стратифицированный темногумусовый. Для типовой диагностики также было принято во внимание наличие погребенной почвы на глубине 70 см (Смоленцева и др., 2018).

Физические и химические свойства почв

Гранулометрический состав почв определен в соответствии с двумя классификациями элементарных почвенных частиц: по Н.А. Качинскому (принятой в России) (Шеин, Гончаров, 2006) и международной (IUSS Working Group WRB, 2014). В пахотном слое (агротемногумусовый горизонт, PU) обеих почв преобладают фракции крупной пыли (41-45%) и ила (20-25%) (табл. 1). По содержанию мелкой пыли горизонты PU почв отличаются ее содержанием, составляя 19-20% в агрочерноземе и 13-14% в агростратоземе. В агрочерноземе от нижней части темногумусового горизонта (AU) к верхней части иллювиального горизонта (BIel) происходит снижение содержания крупнопылевой фракции на 6% и на 5% – мелкопылевой, а содержание илистой фракции значительно (на 13%) увеличивается. Это свидетельствует о естественных процессах миграции тонкодисперсных частиц в иллювиальный горизонт, что является характерным признаком почвообразования этих почв.

Таблица 1

Гранулометрический состав изученных черноземных почв в соответствии с российской классификацией элементарных почвенных частиц по Н.А. Качинскому

Горизонт почвы	Глубина ^{&} , см	Содержание фракций*, %; размеры частиц, мм							
		1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	<0.001	Σ >0.01	Σ <0.01
Агрочернозем									
PU'	0-10	0.07	5.57	42.04	10.64	20.24	21.44	47.7	52.3
PU''	10-20	0.09	3.79	41.48	14.84	19.36	20.44	45.4	54.6
AU	20-30	0.05	1.11	49.84	11.48	18.84	18.68	51.0	49.0
AU	30-38	0.04	3.52	43.12	11.96	16.28	25.08	46.7	53.3
AUBIel	38-46	0.03	4.22	37.40	10.63	14.52	33.20	41.7	58.4
BIel	48-58	0.02	2.98	37.32	9.76	11.44	38.48	40.3	59.7
BI	70-80	0.00	2.16	37.20	10.44	11.56	38.64	39.4	60.6
BCAmc	95-105	0.00	1.70	37.50	11.00	11.40	38.40	39.2	60.8
BCAnc	120-130	0.07	0.53	37.72	11.32	14.88	35.48	38.3	61.7
BCAnc	130-140	0.05	0.35	35.52	12.12	14.40	37.56	35.9	64.1
Cca	150-160	0.08	0.08	33.72	11.76	15.20	39.16	33.9	66.1
Cca	190-200	0.53	0.11	37.80	11.28	14.44	35.84	38.4	61.6
Агростратозем									
PU	0-22	0.09	6.59	44.96	10.00	13.80	24.56	51.6	48.4
RU	30-40	0.09	5.95	43.08	10.96	13.60	26.32	49.1	50.9
RU	40-50	0.17	5.43	44.72	10.60	14.56	24.52	50.3	49.7
RU	50-60	0.06	4.74	45.56	9.24	15.68	24.72	50.4	49.6
RU	60-70	0.14	8.22	43.52	10.44	17.40	20.28	51.9	48.1
[AU]	75-85	0.14	6.98	53.16	9.92	17.96	11.84	60.3	39.7
[AUBI]	100-110	0.02	4.42	47.12	12.00	15.12	21.32	51.6	48.4
[BI]	130-140	0.01	6.75	42.72	9.00	12.64	28.88	49.5	50.5

Примечание.

& – глубина взятия образца; * – % от сухой почвы (высушенной при 105°C); название фракций: 1-0.25 мм – крупный и средний песок, 0.25-0.05 мм – мелкий песок, 0.05-0.01 мм – крупная пыль, 0.01-0.005 мм – средняя пыль, 0.005-0.001 мм – мелкая пыль, <0.001 – ил.

Агростратозем характеризуется значительной мощностью слоя (75 см) с заметной аккумуляцией обогащенного почвенным органическим веществом (ПОВ) материала, который образовался в процессе длительной седиментации твердого стока с расположенных выше по склону почв. Этот слой состоит из агротемногумусового и залегающего под ним стратифицированного темногумусового горизонта. Гранулометрический состав темногумусового горизонта практически не изменяется с глубиной. Являясь намытым, этот горизонт (RU) расположен на погребенном темногумусовом

горизонте [AU]. Последний отличается от вышележащего RU повышенным на 10% содержанием фракции крупной пыли и сниженным на соответствующую величину количеством илистой фракции. В иллювиальном горизонте агростратозема [BI], по сравнению с погребенным темногомусовым горизонтом [AU], происходит снижение на 10% фракции крупной пыли и на 5% – мелкой пыли, а содержание илистой фракции увеличивается на 17%. Это указывает на аналогичный процесс текстурной дифференциации погребенных горизонтов [AU] и [BI] агростратозема, как и в современных горизонтах AU и BI агрочернозема.

При анализе гранулометрического состава почв по международной классификации элементарных почвенных частиц (табл. 2) получены в целом те же закономерности: в агрочерноземе содержание наиболее тонкодисперсной глинистой фракции увеличивается от горизонтов AU к BI на 11%, а в погребенных горизонтах [AU] к [BI] агростратозема – на 20%. Отметим также, что почва агростратозема (по всему профилю) значительно более обогащена фракцией песка, по сравнению с агрочерноземом, где высокое содержание песчаной фракции наблюдается лишь в самой верхней части агротемногомусового горизонта. Наибольший вклад (более 90%) в эту фракцию имеет мелкий песок (табл. 1).

Таблица 2

Гранулометрический состав изученных черноземных почв в соответствии с международной классификацией элементарных почвенных частиц и сравнение названий гранулометрического состава почв по международной классификации (Шейн, 2009) и по Н.А. Качинскому

Горизонт почвы	Глубина [§] , см	Содержание фракций*, %; размеры частиц, мм			Наименование почв по гранулометрическому составу	
		>0.05	0.002-0.05	<0.002	по международной классификации	по Н.А. Качинскому
Агрочернозем						
PU'	0-10	5.64	64.07	30.29	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
PU''	10-20	3.88	67.19	28.93	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
AU	20-30	1.16	71.86	26.98	тяжелый суглинок (пылеватый)	суглинок тяжелый
AU	30-38	3.56	64.29	32.15	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
AUBIel	38-46	4.25	56.40	39.35	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
BIel	48-58	3.00	53.80	43.20	легкая глина (иловато-пылеватая)	суглинок тяжелый
BI	70-80	2.16	54.43	43.41	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
BCA _{mc}	95-105	1.70	55.19	43.11	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
BCA _{nc}	120-130	0.60	57.66	41.74	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
BCA _{nc}	130-140	0.40	56.03	43.57	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
C _{ca}	150-160	0.16	54.35	45.49	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
C _{ca}	190-200	0.64	57.45	41.91	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
Агростратозем						
PU	0-22	6.68	62.74	30.58	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
RU	30-40	6.04	61.74	32.22	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
RU	40-50	5.60	63.54	30.86	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
RU	50-60	4.80	63.66	31.54	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
RU	60-70	8.36	63.71	27.93	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
[AU]	75-85	7.12	72.98	19.90	тяжелый суглинок (пылеватый)	суглинок средний
[AUBI]	100-110	4.44	67.59	27.97	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
[BI]	130-140	6.76	58.93	34.31	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый

Примечание. [§] – глубина взятия образца; * – % от сухой почвы (высушенной при 105°C); название фракций: >0.05 мм – песок, 0.002-0.05 мм – ил, <0.002 мм – глина.

Почвенное органическое вещество (ПОВ) является ключевым параметром, определяющим экологические функции почв, их плодородие, и косвенно – продуктивность агроэкосистем. Количество и характер распределения ПОВ и отдельных его компонентов в пределах почвенной толщи служит важной генетической характеристикой почв (Смоленцева и др., 2018). В нашей работе ПОВ оценивали с помощью ряда показателей – общее содержание углерода и азота, соотношение C/N, потери веса при прокаливании почвы при различных диапазонах температур. Отметим, что органический углерод (или гумус), определяемый по методу Тюрина, следует отличать от общего углерода, определяемого на элементном анализаторе (Наумова, 2018). Приводимые в таблице 3 значения «гумуса» рассчитывали из

общего углерода (умножением на коэффициент 1.724) и поэтому этот показатель является несколько условным – завышенным (по сравнению с гумусом, рассчитываемым через органический углерод), особенно для горизонтов с заметным содержанием карбонатов.

Применение термогравиметрического анализа ПОВ позволило установить, что потери массы при прокаливании в различном диапазоне температур хорошо коррелируют с компонентами ПОВ, отличающимися по устойчивости к микробному разложению, содержанию органического углерода и азота, содержанию глины, карбонатов (Siewert, 2004; Kucerik et al., 2016, 2018). Поскольку у нас отсутствуют инструментальная возможность полноценного применения термогравиметрического метода анализа ПОВ, мы использовали «расширенный» метод анализа потерь при прокаливании, последовательно определяя потери массы при температурах 105°C, 130°C, 550°C и 900°C. Исходя из результатов определения качества ПОВ с помощью термогравиметрического метода (Dean, 1974; Siewert, 2004; Siewert et al., 2012; Kucerik et al., 2016, 2018), можно утверждать, что потери массы в диапазоне температур от 105 до 550°C достаточно хорошо соответствуют содержанию органических углерода и азота, в диапазоне от 550 до 900°C – содержанию карбонатов; в диапазоне от 130 до 550°C характеризуют лабильное и стабилизированное специфическое ПОВ (близкое к понятию гумуса, но не эквивалентное по его абсолютной величине); потери массы при высушивании почвы от воздушно-сухого состояния до 105°C менее строго коррелируют с биологической активностью почвы (определяемой через эмиссию CO₂ при аэробной инкубации), а до 130°C – с количеством физически и химически связанной воды органических веществ, адсорбированных на поверхности частиц глинистых минералов.

В темногомусовом горизонте агрочернозема содержание общего углерода постепенно снижается с глубиной с 5.3% до 3.1%, а фракция {Т130-550°C} – с 12% до 8% (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика почвенного органического вещества изученных черноземных почв

Горизонт почвы	Потери от прокаливания [#] в диапазоне температур, %						Элементный анализ [#] , %			
	Т 105°C	Т 105-130°C	Т 130-550°C	Т 550-900°C	Т 105-900°C	Т 900°C	C _{общ}	гумус	N _{общ}	C/N [@]
Агрочернозем										
PU'	3.48	0.63	11.85	0.68	13.15	16.63	5.25	9.05	0.413	14.8
PU''	3.62	0.60	11.01	1.00	12.61	16.23	4.99	8.61	0.381	15.3
AU	4.09	0.66	10.94	0.69	12.29	16.38	4.90	8.44	0.373	15.3
AU	3.56	0.63	8.25	0.67	9.56	13.12	3.12	5.37	0.244	14.9
AUBIel	3.14	0.49	4.91	0.70	6.10	9.24	1.30	2.23	0.125	12.1
BIel	3.21	0.43	4.29	0.65	5.37	8.58	0.75 ^ε	1.29	0.079*	11.0 [§]
BI	3.22	0.48	3.80	0.69	4.97	8.20	0.47 ^ε	0.81	0.057*	9.7 [§]
BCAnc	2.57	0.40	4.03	5.43	9.86	12.43	0.31 ^ε	0.53	0.038*	9.4 ^{&}
BCAnc	2.83	0.43	4.17	3.98	8.58	11.41	0.34 ^ε	0.59	0.043*	9.4 ^{&}
BCAnc	2.74	0.41	4.10	3.99	8.50	11.24	0.35 ^ε	0.61	0.044*	9.4 ^{&}
Cca	1.94	0.42	5.03	4.49	9.94	11.87	0.47 ^ε	0.81	0.058*	9.4 ^{&}
Cca	2.36	0.48	4.23	1.97	6.68	9.04	0.45 ^ε	0.77	0.056*	9.4 ^{&}
Агростратозем										
PU	2.90	0.44	7.61	0.54	8.59	11.49	3.05	5.26	0.258	13.8
RU	3.36	0.47	6.75	0.52	7.74	11.10	2.57	4.43	0.216	13.9
RU	3.21	0.46	6.48	0.54	7.48	10.69	2.52	4.35	0.213	13.8
RU	3.11	0.44	6.67	0.56	7.66	10.77	2.53	4.37	0.211	14.0
RU	3.20	0.42	7.61	0.51	8.53	11.73	2.95	5.08	0.243	14.1
[AU]	3.17	0.48	9.42	0.55	10.44	13.61	4.61 ^ε	7.95	0.420 [¥]	12.8
[AUBI]	2.18	0.31	4.39	0.53	5.24	7.41	1.34 ^ε	2.32	0.165 [¥]	9.5
[BI]	2.81	0.29	3.44	0.57	4.30	7.11	0.49 ^ε	0.85	0.110 [¥]	5.2

Примечание.

[#] – % от воздушно-сухой почвы; [@] – молярное соотношение элементов; ^ε – пересчитано с C_{орг} (определено по методу Тюрина) на C_{общ}, умножив C_{орг} на коэффициент 1.067 (полученный как средний при анализе соотношения C_{орг} и C_{общ} в почвенных разрезах, расположенных между двумя изученными почвами); * – рассчитано исходя из соотношения C/N; [§] – среднее из 4 значений C/N для таких же горизонтов рядом расположенных почвенных разрезов; [&] – содержание C/N в среднем для черноземов выщелоченных и оподзоленных в слоях ниже 50 см (Гамзиков, 2013); [¥] – определено по методу Кьельдаля.

Обогащение ПОВ азотом остается одинаковым по всему горизонту: C/N равен 15. В иллювиальном горизонте происходит резкое снижение содержания общего азота до 0.75% и далее по профилю почвы в нижней части этого горизонта оно падает еще в 2 раза до 0.35%.

Среднее содержание общего углерода в темнугумусовом горизонте агростратозема почти в 1.7 раза ниже, чем в агрочерноземе: 2.7% vs 4.6%. В отличие от агрочернозема, в агростратоземе содержание как общего углерода так и фракции {T130-550°C} в пределах всего темнугумусового горизонта изменяется в меньшей степени. Также слабо изменяется и соотношение C/N равное 14. В погребенном горизонте [AU] содержание общего углерода совпадает со средним содержанием этого элемента в AU горизонте агрочернозема, а фракция {T130-550°C} несколько ниже: 9.4% vs 10.5%.

Содержание общего углерода (включающего углерод карбонатов) в почвообразующей породе – субэральных лессовидных карбонатных суглинках, составило 0.4-0.5%, из которых содержание органического углерода обычно варьирует в пределах 0.1-0.2% (Смоленцева и др., 2018). В резко убывающем по профилю распределении органического вещества почв Буготакского мелкосопочника просматривается специфика фациального «сибирского» признака – общая небольшая мощность гумусового горизонта, но высокое содержание гумуса в верхней части профиля. Такое отличие обусловлено региональной спецификой гидротермического режима черноземной области Западной Сибири, которое отражается, прежде всего, на количественных параметрах гумусово-аккумулятивного процесса и ведет к специфике профильного распределения гумуса и его запасов (Кленов, 1981; Хмелев, 1989).

Глубина залегания карбонатов существенно различалась в профиле изученных почв: в агрочерноземе карбонаты находятся начиная с глубины 87 см, а в агростратоземе карбонаты не были обнаружены в почвенной толще до 300 см. Для карбонатного профиля агрочернозема характерна растянутая миграционная зона с четко выраженной зоной аккумуляции, совпадающей или почти совпадающей с линией вскипания (Смоленцева и др., 2018). В этой почве было обнаружено бимодальное профильное распределение карбонатов, первый максимум которого (11.2% CaCO₃) приурочен к аккумулятивно-карбонатному горизонту ВСА_{тс} на глубине около 95 см, а второй максимум (12.5% CaCO₃) – к почвообразующей породе на глубине около 150 см (табл. 4). На эти же пики точно указывает и фракция ППП {T550-900°C}, характеризующая содержание карбонатов (табл. 3).

Содержание карбонатов существенно влияло на кислотно-щелочные свойства почвенных горизонтов. Если в верхней части профиля агрочернозема реакция среды близка к нейтральной (6.2-6.6 ед. рН), то в нижней части, начиная с горизонта ВСА_{тс}, она резко переходит в щелочную (8.3-8.5 ед. рН). Агростратозем, ввиду отсутствия карбонатов или их крайне низкого содержания, характеризуется реакцией среды близкой к нейтральной во всех горизонтах почвы: рН варьировало в узких пределах от 6.2 до 6.5 (табл. 4).

Обогащенность почвообразующих пород карбонатами не только является причиной щелочной реакции среды в нижних горизонтах почв, но и способствует тому, что в составе почвенного поглощающего комплекса автоморфных почв Предалтайской лесостепной почвенной провинции преобладают кальций и магний (Смоленцева и др., 2018). Это хорошо иллюстрируют полученные нами данные (табл. 5). Рассматривая содержание обменных катионов, выраженное в мг-экв/100 г, было получено, что во всех горизонтах обеих почв преобладает обменный кальций, вклад которого в сумму трех обменных катионов составил 87% для агрочернозема и 81% для агростратозема. Вклад магния был существенно меньше и равен 10% и 15%, соответственно. Вклад калия в сумму обменных катионов был в 3-4 раза меньше, чем магния.

Рассматривая кальций и магний как элементы минерального питания растений, следует отметить, что содержание обоих элементов (в мг/кг) в слое почвы 0-20 см (диагностируемый слой почвы) соответствует градации «очень высокое» в агрочерноземе и «высокое» – в агростратоземе.

Содержание обменных катионов обычно связано с электропроводностью почвы (почвенных суспензий). Через электропроводность рассчитывается общее содержание растворенных веществ. Тенденция изменения двух последних показателей с глубиной в обеих почвах была следующей: постепенное снижение их величин вниз по профилю, включая иллювиальный горизонт VI (табл. 4). В агрочерноземе, отличающимся высоким содержанием карбонатов в нижней части почвенного профиля, величины электропроводности резко увеличиваются, начиная с горизонта ВСА_{тс}: с 94 до 215 $\mu\text{S}/\text{см}$. Далее вниз по профилю можно отметить тенденцию постепенного повышения величины электропроводности до 260 $\mu\text{S}/\text{см}$ в почвообразующей породе на глубине 200 см.

Таблица 4

Физико-химические и химические свойства изученных черноземных почв

Горизонт почвы	pH водный	Электропроводность, $\mu\text{S}/\text{cm}$	Общее содержание раств. солей*, мг/кг	Карбонаты (CaCO_3), %	Нитраты, мг N/кг	Фосфор легкоподвижный, мг $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg}$	Фосфор подвижный, мг $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg}$	Калий обменный, мг $\text{K}_2\text{O}/\text{kg}$
Агрочернозем								
PU'	6.49	175	112	0.00	8.32	0.44	32.7	490
PU''	6.49	146	93	1.25	4.77	0.18	13.6	296
AU	6.59	126	81	1.25	2.54	0.11	9.3	227
AU	6.51	99	63	1.66	1.10	0.17	8.5	231
AUBIel	6.45	75	48	0.84	0.50	0.22	6.2	392
BIel	6.24	105	67	0.41	0.62	0.10	5.9	429
BI	6.51	94	60	0.41	0.37	0.06	4.8	296
BCAmc	8.32	215	137	11.21	0.46	0.15	6.3	374
BCAnc	8.31	246	157	9.55	0.65	0.13	4.7	251
BCAnc	8.49	231	148	9.14	0.35	0.06	3.8	318
Cca	8.40	243	156	12.46	0.65	0.08	3.9	301
Cca	8.34	260	166	4.98	0.51	0.09	8.1	318
Агростратозем								
PU	6.28	168	108	0.00	12.47	1.12	92.5	651
RU	6.27	122	78	0.00	3.18	0.23	30.3	464
RU	6.24	123	78	0.00	3.78	0.28	29.3	445
RU	6.30	121	78	0.00	3.02	0.36	35.4	468
RU	6.39	107	69	0.43	3.36	0.22	35.5	330
[AU]	6.50	100	64	0.43	3.58	0.59	44.2	255
[AUBI]	6.43	77	49	0.43	1.28	0.47	58.1	371
[BI]	6.48	58	37	0.43	0.62	0.28	48.5	484

Примечание.

* – в пересчете на NaCl; расчеты на воздушно-сухую почву

Содержание подвижных (доступных растениям) форм всех трех основных элементов минерального питания было максимальным в самой верхней части агрономогумусового горизонта обеих почв (табл. 4). Содержание нитратного азота в слое 0-20 см агрочернозема соответствовало градации «очень низкое», а агростратозема – «низкое» (Гамзиков, 2013). Ниже 20 см количество нитратного азота варьировало в незначительных пределах от 0.1 до 0.4 мг N/кг.

Содержание легкоподвижного фосфора в слое 0-20 см агрочернозема соответствовало градации «низкое», а агростратозема – «среднее» (Берхин и др., 1989). Вниз по профилю почвы содержание этого пула питательного элемента снижается. Можно отметить несколько большую величину легкоподвижного фосфора (0.6 мг $\text{P}_2\text{O}_5/\text{kg}$) в погребенном горизонте [AU]. В среднем по всем горизонтам, содержание легкоподвижного фосфора в агростратоземе было в 3 раза выше, чем в агрочерноземе.

Содержание подвижного фосфора в слое 0-20 см агрочернозема соответствовало градации «среднее», а агростратозема – «высокое» (Берхин и др., 1989). В целом, тенденции изменения этого пула элемента питания по профилю почв соответствовали таковой для легкоподвижного фосфора. Однако разница в содержании подвижного фосфора в двух исследуемых почвах была более контрастной: содержание фосфора в среднем по всем горизонтам агростратозема было в 5.2 раза выше, чем в агрочерноземе.

Содержание обменного калия в слое 0-20 см обеих почв характеризуется как «высокое» (Якименко, 2003). Этот пул распределен более равномерно по профилям почв. Небольшое повышение его содержания наблюдалось в верхней части иллювиального горизонта BIel (до 429 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{kg}$) агрочернозема и верхней части погребенного иллювиального горизонта [BI] (до 484 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{kg}$) агростратозема.

Обменные катионы изученных черноземных почв

Горизонт почвы	мг-экв/100 г				мг/кг			
	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	сумма	K	Mg	Ca	сумма
Агрочернозем								
PU'	1.04	4.17	22.4	27.6	407	507	4489	5402
PU''	0.63	4.16	22.4	27.2	246	506	4489	5241
AU	0.48	3.62	22.4	26.5	189	440	4486	5114
AU	0.49	3.25	20.9	24.6	192	395	4182	4768
AUBIel	0.83	2.72	17.9	21.5	325	331	3587	4243
BIel	0.91	2.71	18.5	22.1	356	330	3698	4384
BI	0.63	2.72	18.9	22.2	246	331	3787	4363
BCAnc	0.79	1.81	25.4	28.0	310	220	5083	5613
BCAnc	0.53	1.82	25.8	28.2	208	221	5171	5600
BCAnc	0.68	1.81	24.9	27.4	264	221	4997	5482
Cca	0.64	1.81	26.3	28.8	250	220	5280	5750
Cca	0.68	1.80	25.4	27.8	264	219	5082	5565
Агростратозем								
PU	1.38	3.62	17.5	22.5	541	441	3497	4478
RU	0.98	3.25	16.9	21.1	385	396	3385	4166
RU	0.94	3.26	17.4	21.6	369	396	3496	4261
RU	0.99	3.26	17.5	21.7	388	396	3499	4283
RU	0.70	3.26	17.9	21.9	274	397	3585	4256
[AU]	0.54	2.27	18.9	21.7	212	276	3784	4271
[AUBI]	0.79	2.26	13.0	16.0	308	275	2598	3180
[BI]	1.03	3.25	13.0	17.2	402	396	2598	3395

Примечание.

Расчеты приведены на воздушно-сухую почву.

Результаты обследования поверхностного слоя почвы геофизическими методами

В результате проведения магниторазведки обследуемого участка, включающего ключевые площадки EL и АК, были получены план изолиний и график аномального магнитного поля (рис.1). Амплитуда изменения аномального магнитного поля T_a в пределах площадки составляла около 250 нТл. Такой высокий уровень аномального поля связан с особенностями геологического строения территории. В северо-западной части площадки, где девонские слабомагнитные породы подходят близко к поверхности, поле имеет минимальные значения. Коренные породы погружаются на юго-восток, при этом возрастает мощность высокомагнитных покровных суглинков. Это выражается в увеличении амплитуды магнитного поля. На фоне сильных изменений T_a , связанных с геологическими особенностями, было невозможным отследить слабые аномалии магнитного поля, вызванные неоднородностью состава почвы. Как показали наши исследования в левобережной части Новосибирской области, где глубина залегания палеозойского основания достигает сотни метров, амплитуда таких аномалий составляет ± 5 нТл (Заплавнова и др., 2018). Таким образом, применение магниторазведки для решения почвенно-генетических и почвенно-агрохимических задач в условиях близкого к поверхности (в пределах первого десятка метров) залегания коренных пород и их неоднородного геологического строения не представляется возможным.

Ключевая площадка EL (элювиальная позиция катены)

На рисунке 2 приведён фрагмент геоэлектрического разреза ключевой площадки EL по результатам 2-D инверсии. Профиль пересекает место раскопа почвенного разреза, фото которого приведено рядом с разрезом УЭС. Гумусово-аккумулятивный слой почвы, визуально выделяемый на фото почвенного разреза (рис. 2, а) до глубины 40 см, отличается повышенными значениями УЭС (60-70 Ом·м). Ниже залегают светло-коричневые породы, обедненные ПОВ, с УЭС 25-30 Ом·м. По гранулометрическому составу (табл. 2), верхняя часть слоя почв до глубины около 50 см сложена тяжёлым суглинком, а подстилающей породой является глина лёгкая. То есть УЭС разреза определяется гранулометрическим / литологическим составом. Гумусово-аккумулятивный

слой почвы выделяется по содержанию общего углерода $C_{\text{общ}}$, которое достигает 5%. В подстилающих материнских породах содержание общего углерода снижается до 0.3-0.5 %. Изменение УЭС разреза с глубиной коррелирует с содержанием общего углерода (рис. 3, в) с коэффициентом корреляции равным 0.97 (табл. 6). Однако эта корреляция является опосредованной через гранулометрический / литологический состав почв.

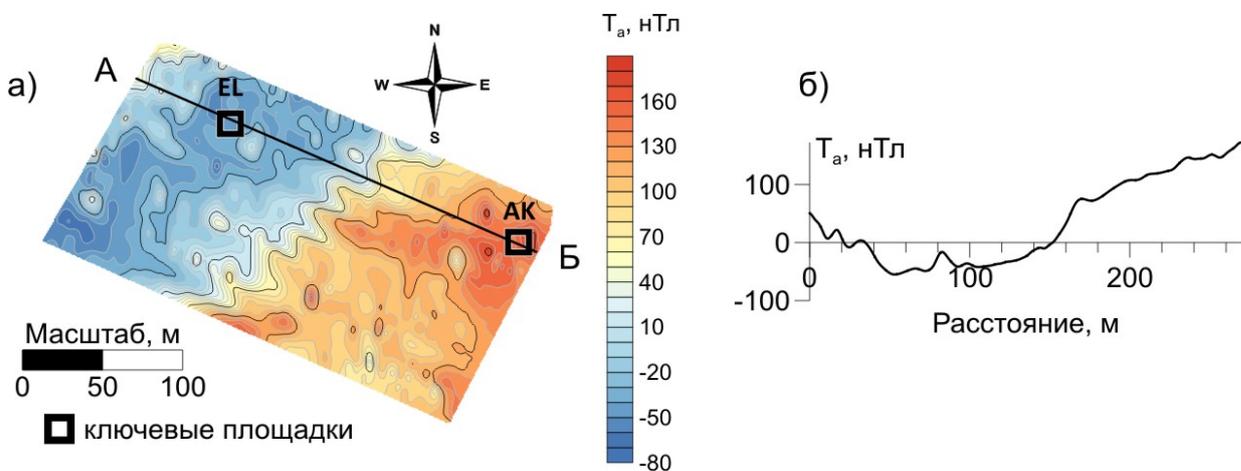


Рисунок 1. План изолиний (а) и график аномального магнитного поля по линии А-Б (б) обследуемого участка с ключевыми площадками EL (элювиальная позиция катены) и АК (аккумулятивная позиция катены).

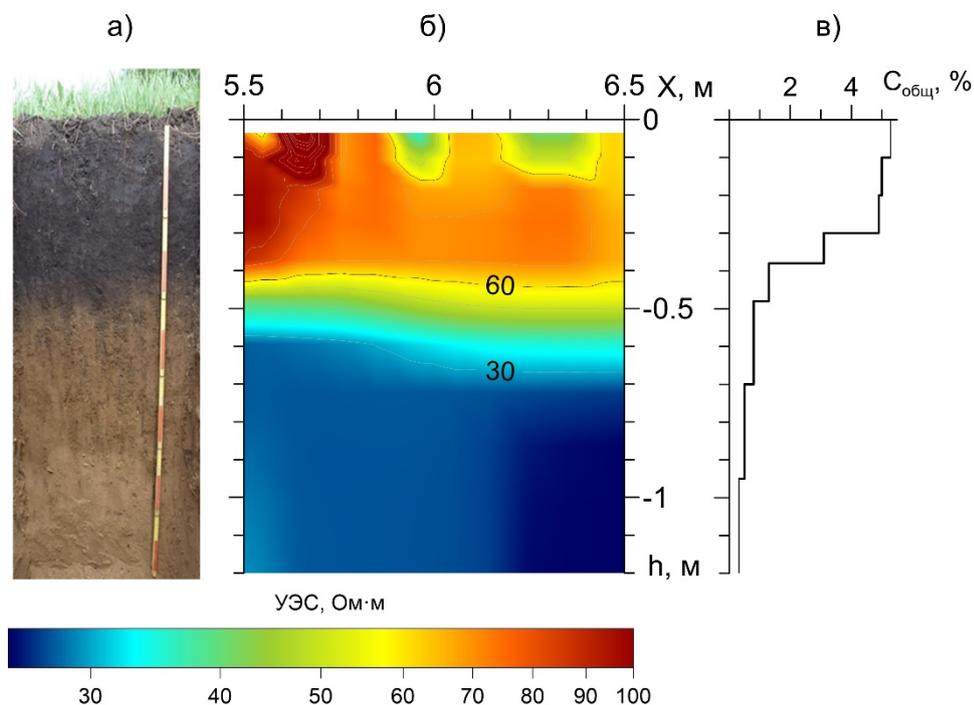


Рисунок 2. Фотография почвенного профиля (а), геоэлектрический разрез (б) и содержание общего углерода в почве (в) на ключевой площадке EL (элювиальная позиция катены).

Корреляция УЭС и общим углеродом почвенного органического вещества и глубиной ($n = 10$)

	Глубина	УЭС
УЭС	-0.90	
$C_{\text{общ}}$	-0.89	0.97

На рисунке 3 приведена радарограмма по профилю, пересекающему место почвенного разреза на ключевой площадке EL. Глубина радарограммы рассчитана для средней диэлектрической проницаемости пород разреза равной 19.3, которая была определена по гиперболе дифракции от локального объекта (Владов, Старовойтов, 2004). Обработка радарограммы включала применение режекторного фильтра для верхней части разреза, который подавил проявление зондирующего импульса. На глубине 10 и 20 см проявлялись отражающие границы в почвенном толще. Эти рефлекторы соответствовали границам горизонтов PU', PU'' и AU. Из характеристики горизонтов (гранулометрический состав (табл. 1 и 2) и объемная массы почвы) следует, что слои PU' и PU'' различаются по плотности сложения, что вероятно является причиной различия в значениях их диэлектрической проницаемости (ϵ).

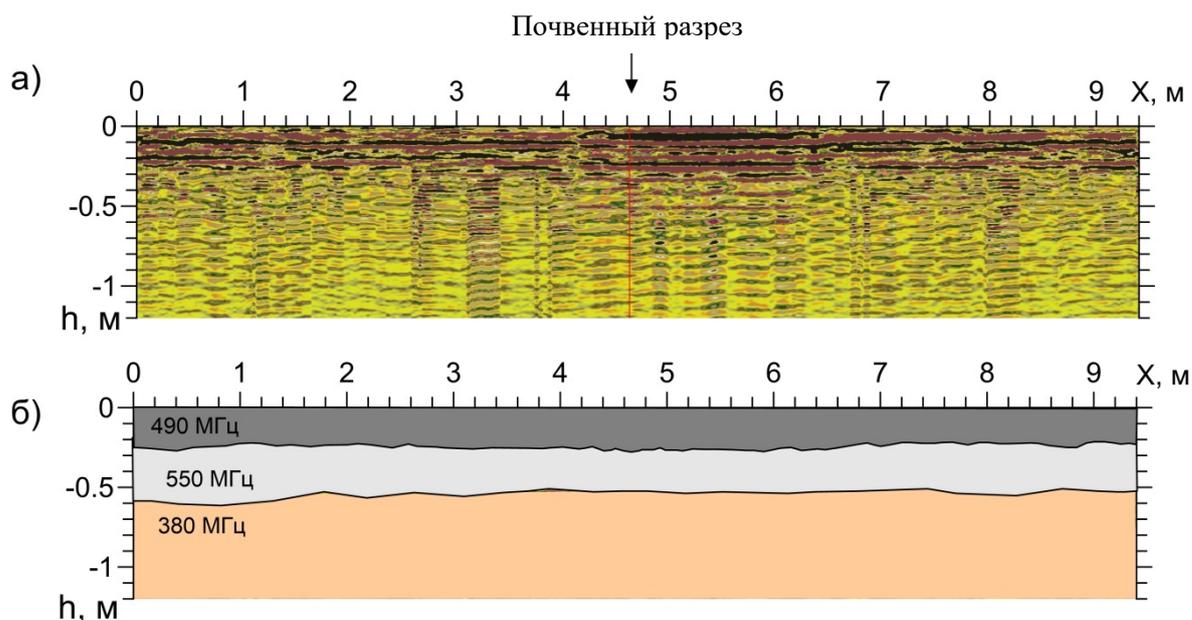


Рисунок 3. Радарограмма (а) через почвенный разрез на ключевой площадке EL (элювиальная позиция катены) и её послойная интерпретация (б).

Верхняя часть радарограммы до глубины 20-25 см имеет высокоамплитудные отражения, характеризующие гумусово-аккумулятивный пахотный слой. Максимум спектра частот в этом слое приходится на 490 МГц. В интервале глубин 20-60 см выделяется слой, отличающийся по амплитудо-частотным характеристикам. Спектр частот отражённого сигнала в этом слое смещается к частоте 550 МГц. В основании разреза центральная частота отражённого георадарного сигнала смещается в область низких частот до 380 МГц.

Сопоставление георадиолокационного и почвенного разрезов представлено на рисунке 4. Хорошо заметно, что гумусово-аккумулятивный горизонт, прослеживаемый до глубины 35-40 см, отчётливо выделяется на радарограмме.

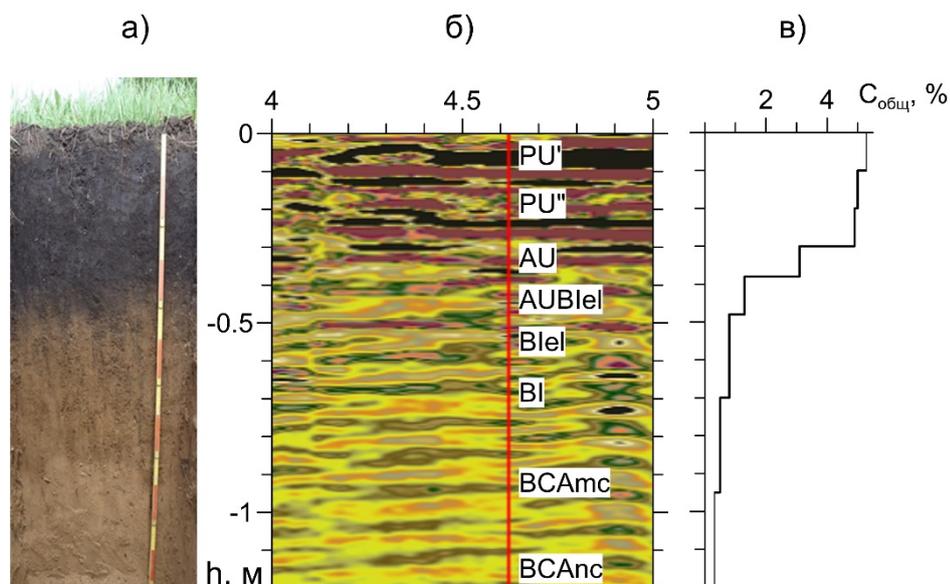


Рисунок 4. Сопоставление строения почвенного профиля (а), георадиолокационного разреза (б) и распределения общего углерода по глубине (в) на ключевой площадке EL (элювиальная позиция катены).

Трёхмерная визуализация данных георадиолокации представлена на рисунке 5. Темногумусовые горизонты PU' и PU'' выделяются максимальной амплитудой отраженного сигнала. Таким образом, метод георадиолокации позволяет решать задачу определения мощности плодородного (гумусово-аккумулятивного) слоя в пахотных агроэкосистемах.

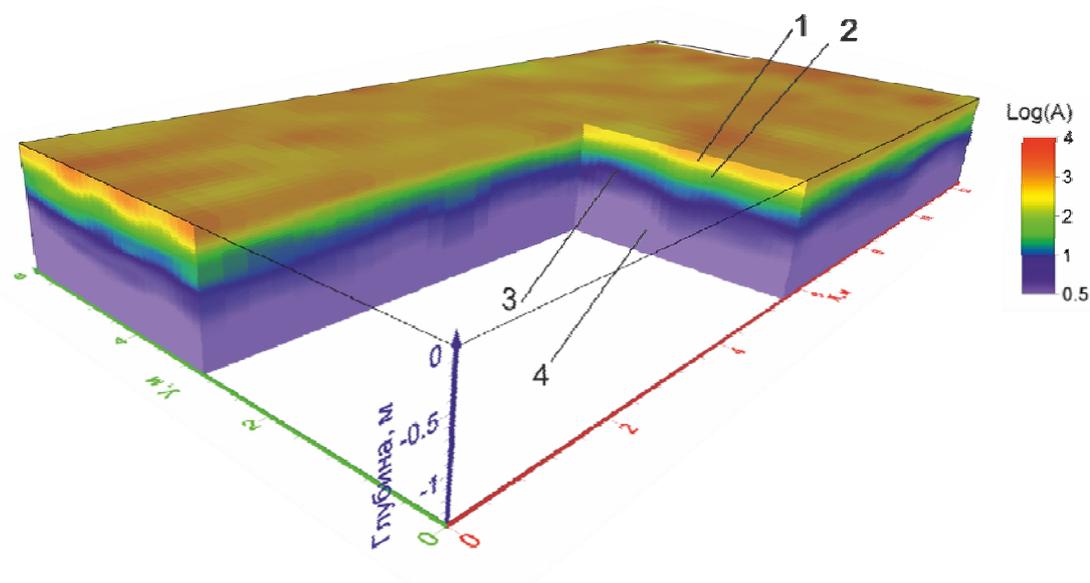


Рисунок 5. Трёхмерная визуализация данных георадиолокации на ключевой площадке EL (элювиальная позиция катены): 1 – горизонт PU', 2 – горизонт PU'', 3 – горизонты AU+AUBlel+Bl, 4 - горизонт BCAmc.

Результаты площадных исследований методом электротомографии приведены в виде трёхмерной геоэлектрической модели обследованного участка (рис. 6). Гумусово-аккумулятивный слой выделяется повышенным УЭС на фоне иллювиального и переходного к материнской породе горизонтов.

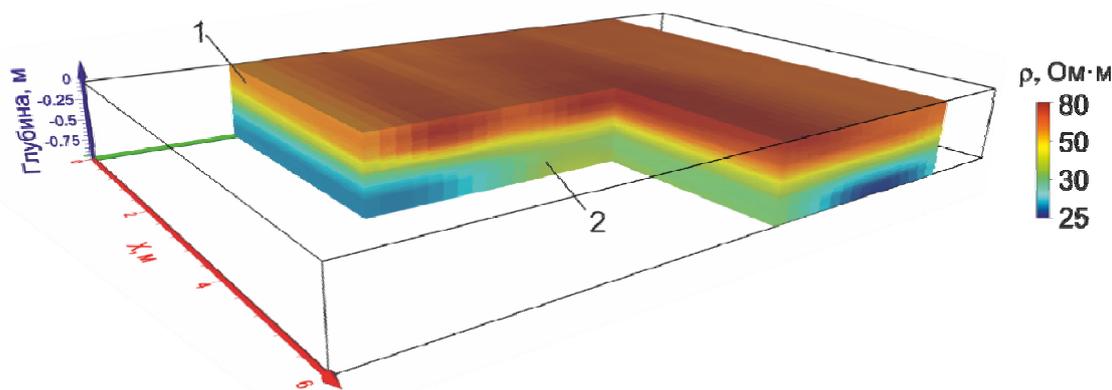


Рисунок 6. Объёмная геоэлектрическая модель ключевой площадки EL (элювиальная позиция катены) по данным электротомографии: 1 - гумусово-аккумулятивный слой; 2 – иллювиальные и переходные к почвообразующим горизонты с низким содержанием ПОВ.

Таким образом, основными закономерностями проявления строения и состава почвенного профиля в геофизических полях на ключевой площадке EL являются повышенные значения УЭС (60-70 Ом·м) в гумусово-аккумулятивном слое по отношению к подстилающим породам, высокая амплитуда георадарного сигнала и наличие отражающих границ георадарного сигнала на границах горизонтов PU', PU'' и AU. Повышенное УЭС гумусово-аккумулятивный слоя связано с его суглинистым литологическим составом. Залегающая ниже легкая глина имеет более низкие значения УЭС по сравнению с гумусово-аккумулятивным слоем УЭС.

Ключевая площадка АК (аккумулятивная позиция катены)

Почвенный разрез ключевой площадки АК отличается мощным (до 90 см) гумусово-аккумулятивным слоем (состоящим из нескольких темногумусовых горизонтов) и наличием погребенной почвы на глубине 70 см. На рисунке 7 представлены фрагмент геоэлектрического разреза по данным электротомографии (б) и распределение содержания общего углерода (в) в почве ключевой площадки АК. На разрезе УЭС до глубины 40 см контрастно выделяется слой пониженного (30-50 Ом·м) электросопротивления. Возможно, пониженное УЭС почвы до глубины 40 см связано с её высокой влажностью. Ниже по профилю до глубины 1.0-1.2 м слой почвы имеют относительно высокое УЭС, равное 60-70 Ом·м. Порядок значений УЭС погребённого темногумусового горизонта такой же, как и в гумусово-аккумулятивном слое почвы на ключевой площадке EL. Хорошо заметно соответствие области повышенных значений УЭС глубине залегания погребенного темногумусового горизонта [AU], который характеризуется высоким содержанием общего углерода (рис. 7 б, в). С глубины 0.9-1.2 м УЭС понижается до 50 Ом·м, что связано с тяжелосуглинистым составом горизонта VI. С этой же глубины отмечается и значительное снижение $C_{общ}$ (рис. 7 в).

На рисунке 8 показан геоэлектрический разрез ключевой площадке АК через место раскопа почвенного разреза, которое выделяется аномалией пониженного УЭС в приповерхностной части разреза в интервале профиля 4.6-4.5 м. Хорошо заметно существенное различие значений УЭС (ρ) пахотных и целинных почв. В области пашни ρ изменяется в пределах 40-70 Ом·м, на целине – в диапазоне 100-200 Ом·м. Целинные почвы, хотя и содержат больше ПОВ, но гранулометрический состав их темногумусового горизонта в значительной мере облегчен по сравнению с рядом расположенной пахотной почвой и отличается повышенным в 2 раза содержанием фракции мелкого песка, повышенной долей крупной пыли и пониженным в 2 раза содержанием илистой фракции (Смоленцева и др., 2018).

Дополнительными факторами, вызывающим такое значительное отличие электрофизических свойств целинного участка и пашни, хорошо заметное на объемной геоэлектрической модели ключевой площадке АК (рис. 9), могут быть изменение литологического состава почвы (что естественно предположить, учитывая изменение гранулометрического состава), а также структуры и микроагрегатного состава почвы, плотность сложения, возможно качества ПОВ.

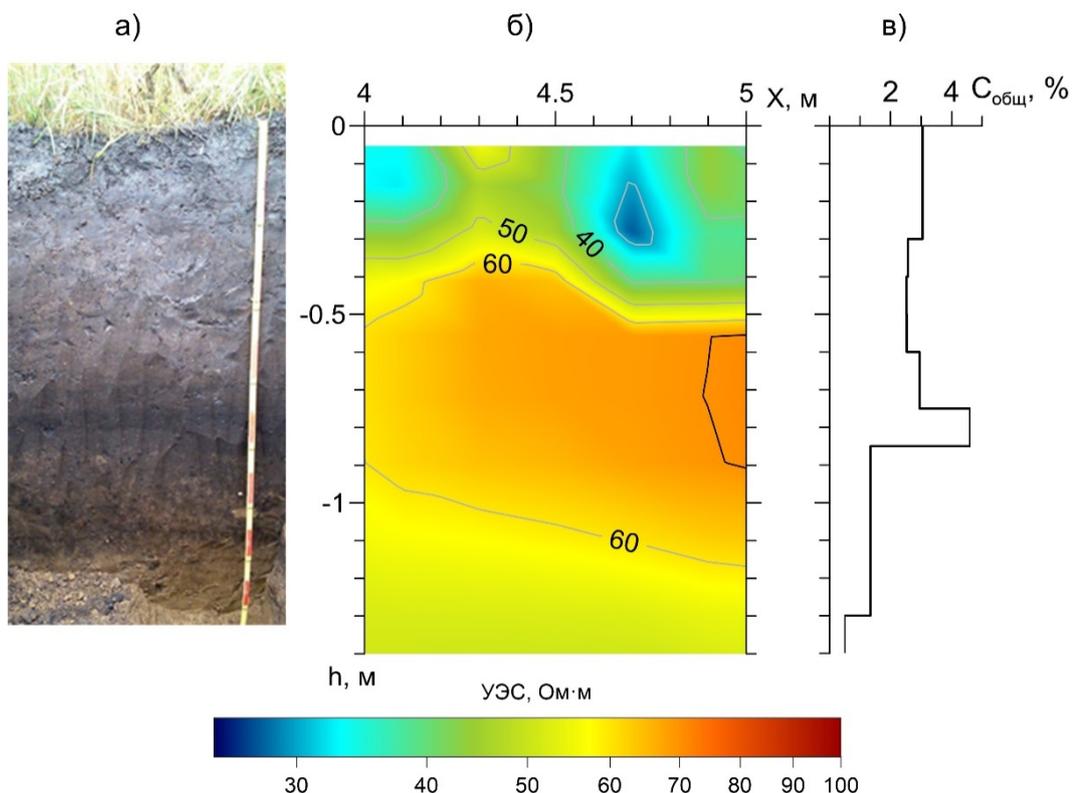


Рисунок 7. Фотография почвенного профиля (а), геоэлектрический разрез (б) и содержание органического углерода по глубине (в) на ключевой площадке АК (аккумулятивная позиция катены).

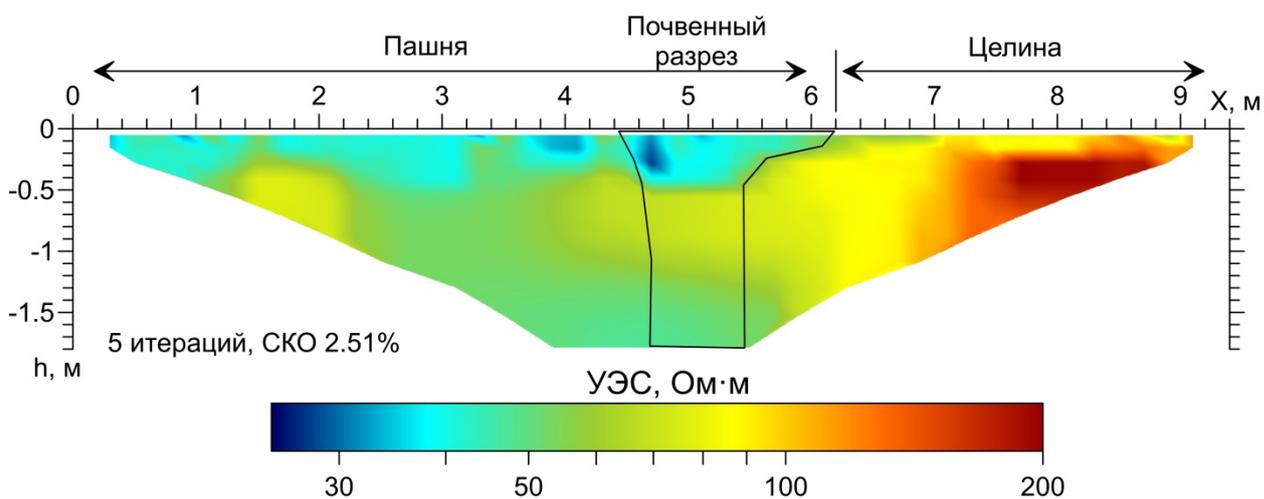


Рисунок 8. Геоэлектрический разрез на ключевой площадке АК (аккумулятивная позиция катены) по данным электротомографии.

В свою очередь, на пашне верхняя часть почвенной толщи до глубины 30 см имеет более низкие значения УЭС – около 30 Ом·м, что наиболее вероятно обусловлено большей влажностью этого слоя, а нижняя часть темногумусового горизонта выделяется слегка повышенным электросопротивлением – 50-70 Ом·м.

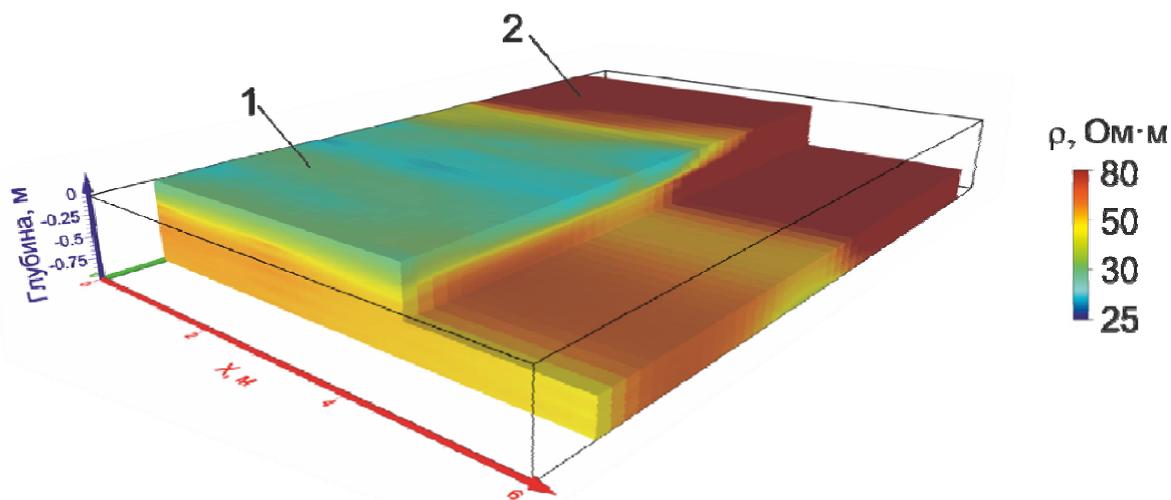


Рисунок 9. Объёмная геоэлектрическая модель ключевой площадки АК (аккумулятивная позиция катены) по данным электротомографии: 1 - пашня; 2 – целинный участок.

По данным георадиолокации на ключевой площадке АК (рис. 10) отчетливо выделяется темногумусовый горизонт PU+RU (рис. 10, {1}), а также фрагментарная граница погребенного агротемногумусового горизонта [AU] (рис. 9, {2}). Место раскопа почвенного разреза также отмечается высокоамплитудной аномалией отраженного сигнала в верхней части разреза.

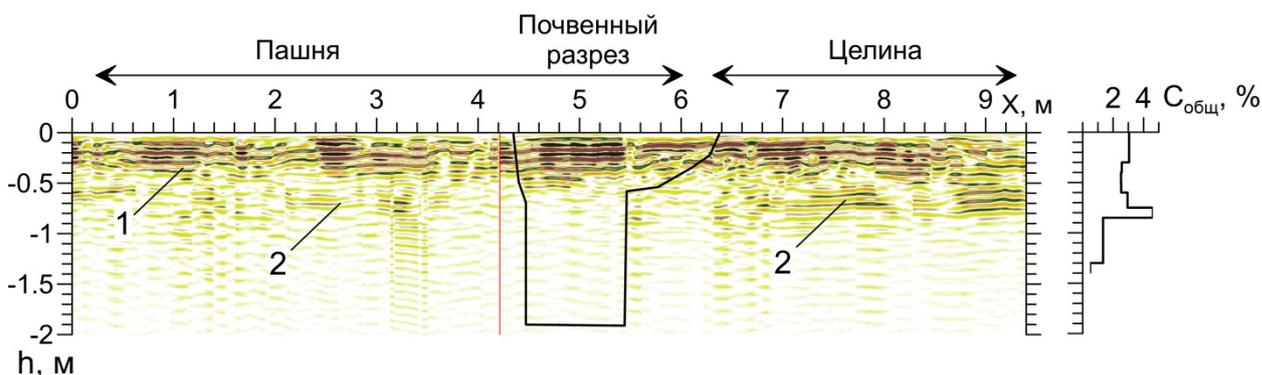


Рисунок 10. Георадиолокационный разрез ключевой площадки АК (аккумулятивная позиция катены): {1} – темногумусовые горизонты PU+RU; {2} – отражающая граница от погребенного темногумусового горизонта [AU].

На рисунке 11 показана визуализация данных георадиолокации ключевой площадки АК. В объемной модели высокоамплитудным сигналом в части разреза, расположенного на пашне, выделяется агротемногумусовый PU и темногумусовый стратифицированный RU горизонты, которые переходят в темногумусовый горизонт AU на целинном участке. Различие в составе целинных и пахотных почв не выражается в амплитудных характеристиках георадарного сигнала. Однако, можно отметить заметное снижение мощности гумусово-аккумулятивного слоя на целинном участке. На глубине 1-2 м в глинисто-иллювиальном горизонте амплитуда георадарного сигнала сильно затухает.

Таким образом, в результате геофизических исследований на ключевой площадке АК (аккумулятивная позиция катены) установлено следующее. По данным электротомографии почвы пашни отличаются пониженным УЭС от целинных почв. Наиболее вероятно это объясняется различиями в гранулометрическом составе почв. Уровень УЭС пахотных почв составляет 60-70 Ом·м, но в агротемногумусовом горизонте (до глубины 30 см) понижается до 30 Ом·м. На георадарных данных хорошо прослеживаются границы темногумусового горизонта, глинисто-иллювиального горизонта и переходного горизонта между ними, а также погребенного

темногумусового горизонта. Этот метод не позволяет выявить существенные различия в содержании гумуса в агротемногумусовом горизонте и погребенном горизонте пахотной почвы и темногумусовом горизонте целины. Однако метод георадиолокации дает возможность установить различия в мощности гумусово-аккумулятивного слоя.

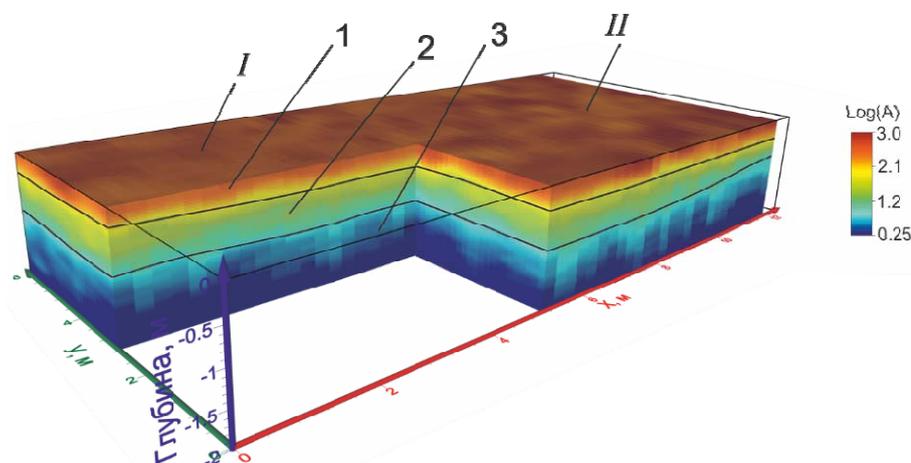


Рисунок 11. Трёхмерная визуализация данных георадиолокации на ключевой площадке АК (аккумулятивная позиция катены): I – пашня; II – целина; {1} – агротемногумусовый горизонт PU; {2} – темногумусовый стратифицированный горизонт RU; {3} – погребенные темногумусовый и глинисто-иллювиальный горизонты [AU] + [AUBI], переходящие ниже в почвообразующую породу.

ОБСУЖДЕНИЕ

Корреляционно-регрессионный анализ свойств почв

Корреляционный анализ свойств изученных почв показал, что многие из них тесно связаны между собой (табл. 7). Это касается ряда предсказуемых положительных или отрицательных корреляционных связей и между различными фракциями элементарных почвенных частиц, между свойствами, характеризующими ПОВ, между легкоподвижной и подвижной формами фосфора и другими. Отметим, что при расчете корреляций из массива данных исключены свойства почв, полученные простым пересчетом из других показателей: «гумус» vs $C_{\text{общ}}$; общее содержание растворимых солей vs электропроводность; обменные катионы, выраженные в мг/кг vs обменных катионов, выраженных в мг-экв/100 г, калий обменных катионов vs обменный калий по методу Масловой.

Однако ряд установленных взаимосвязей или же их отсутствие между свойствами почв является труднообъяснимыми. В качестве таких зависимостей необходимо отметить отрицательную корреляционную связь между количеством наиболее тонкодисперсных частиц <0.001 мм и <0.002 мм, с одной стороны, и содержанием общего углерода и фракцией ППП {T130-550°C}, с другой стороны. Представляются труднообъяснимыми положительные связи между общим углеродом и обменным магнием, между подвижными пулами азота, фосфора и калия с мелким песком и, напротив, отрицательные связи с илистой фракцией. Видимо здесь ведущими выступают иные факторы, оставшиеся за рамками проведенного исследования.

Электропроводность почвенной суспензии отрицательно коррелировала с мелким песком и крупной пылью, и положительно – с глиной, реакцией среды, содержанием карбонатов и обменного кальция. Множественный линейный регрессионный анализ с пошаговым включением значимых и исключением незначимых переменных (вышеперечисленных свойств почвы) позволил свести зависимость электропроводности только к двум свойствам почвы: водный pH и обменный кальций. Было получено уравнение линейной регрессии:

$$\{\text{Электропроводность}\} = a + b * \{\text{pH}_{\text{водный}}\} + c * \{\text{Ca}_{\text{обменный}}\}$$

Коэффициенты множественной корреляции и детерминации этой зависимости составили 0.91 и 0.83, соответственно. Все три коэффициента уравнения регрессии были достоверны и равны следующим величинам: $a = -245.37$, $b = 35.25$ и $c = 7.28$.

Таблица 7

Матрица парных корреляций свойств почв по Пирсону ($n = 20$)

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	0.60													
4	....	....										
5	....	0.49	....										
6	-0.67	-0.92	....	-0.73										
7	0.81	0.96	....	....	-0.92									
8	-0.81	-0.96	....	....	0.92	-1								
9	1	0.61	....	....	-0.68	0.81	-0.81							
10	0.46	0.93	....	0.74	-0.96	0.85	-0.85	0.47						
11	-0.71	-0.94	....	-0.66	0.99	-0.95	0.95	-0.72	-0.95					
12	....	....	....	0.45	-0.5	....	....	....	0.48	-0.48				
13	....	....	....	0.64	....	....	....	....	....	....	0.75			
14	....	0.58	....	0.87	-0.78	0.56	-0.56	....	0.77	-0.73	0.69	0.78		
15	-0.69	-0.62	....	....	0.63	-0.71	0.71	-0.69	-0.53	0.66	-0.56	....	....
16	....	....	0.47	0.77	....	....	....	....	0.49	....	....	0.70	0.82	....
17	....	....	....	0.78	-0.48	....	....	....	0.53	....	0.55	0.77	0.87	....
18	0.47	0.70	....	0.84	-0.86	0.69	-0.69	0.48	0.84	-0.83	0.71	0.71	0.98	-0.53
19	0.55	0.77	....	0.82	-0.91	0.76	-0.76	0.55	0.88	-0.88	0.66	0.62	0.95	-0.58
20	....	0.48	....	0.65	-0.63	0.48	-0.48	....	0.61	-0.6	0.72	0.75	0.84	-0.47
21	-0.73	-0.62	....	....	0.63	-0.73	0.73	-0.73	-0.52	0.66	-0.59	....	....	0.98
22	-0.77	-0.61	....	....	0.62	-0.73	0.73	-0.76	-0.5	0.66	-0.60	....	....	0.93
23	-0.66	-0.52	....	....	0.47	-0.62	0.62	-0.64	....	0.51	....	....	....	0.79
24	0.58	....	....	0.49	-0.6	0.54	-0.54	0.58	0.50	-0.59	0.74	0.53	0.73	-0.70
25	-0.76	-0.51	0.46	....	....	-0.65	0.65	-0.75	....	0.49	....	....	....	0.76
26	-0.67	-0.46	0.47	....	....	-0.58	0.58	-0.66	....	....	....	0.48	....	0.67
27	0.53	....	....	....	-0.53	0.5	-0.5	0.54	....	-0.53	....	....	0.62	....
28	0.61	0.54	....	....	-0.52	0.63	-0.63	0.61	....	-0.55	....	....	....	....
29	0.73	0.60	....	....	-0.56	0.71	-0.71	0.73	0.45	-0.61	....	....	....	-0.48
30	0.52	....	-0.49	....	....	....	....	0.52	....	....	....	....	....	....

Парная зависимость между электропроводностью и обменным кальцием хорошо описывается уравнением с коэффициентом детерминации 0.92:

$$\{\text{Электропроводность}\} = a / (b + \{\text{Ca}_{\text{обменный}}\}),$$

где $a = -1368.8$, $b = 31.4$.

Для парной зависимости между электропроводностью и водным рН можно использовать такую же форму регрессионного уравнения:

$$\{\text{Электропроводность}\} = a / (b + \{\text{pH}_{\text{водный}}\}),$$

где $a = -379.8$, $b = -10.0$. Для этого уравнения также получен высокий коэффициент детерминации, равный 0.79.

Нелинейный регрессионный анализ данных содержания карбонатов и фракции потерь при прокаливании от 550°C до 900°C позволил установить высокую достоверную зависимость этих

показателей, что полностью совпадает с выводом, полученным при анализе этой зависимости для широкого ряда почв (Siewert, 2004; Siewert et al., 2012; Kucerik et al., 2016). В нашем случае следующее уравнение регрессии хорошо описывает эту зависимость с коэффициентом детерминации, близком к идеальному (0.96):

$$\{CaCO_3\} = a + b * Ln(\{T550-900^\circ C\}),$$

где a = 2.91, b = 4.92.

Продолжение таблицы 7

	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
17	0.99													
18	0.72	0.79												
19	0.66	0.72	0.99											
20	0.62	0.69	0.84	0.78										
21	....	....	-0.54	-0.58	-0.48									
22	....	....	-0.56	-0.59	-0.52	0.95								
23	....	....	....	....	....	0.80	0.87							
24	....	0.45	0.76	0.73	0.68	-0.73	-0.77	-0.48						
25	0.55	0.48	....	....	....	0.78	0.81	0.87	....				
26	0.66	0.60	....	....	....	0.68	0.69	0.83	....	0.98				
27	....	....	0.64	0.64	0.57	....	....	....	0.64	....	....	
28	....	....	....	0.45	....	....	....	....	....	....	....	0.83		
29	....	....	....	....	....	-0.50	-0.50	....	....	-0.65	-0.59	0.71	0.91	
30	....	....	....	....	....	....	....	....	....	-0.49	....	0.62	0.64	0.68

Примечание.

Пороги достоверности коэффициентов корреляции при уровне значимости 0.05 и 0.01 равны: 0.444 и 0.561, соответственно. В таблице указаны только достоверные (p < 0.05) коэффициенты корреляции. Между свойством {1} и всеми другими свойствами почв достоверных коэффициентов корреляции не получено. Обозначение свойств почв, перечисленных в таблице:

	Гранулометрический состав, % фракций с размерами частиц, мм:	Потери при прокаливании (%) при температуре:		21	Карбонаты, CaCO ₃ , %	
		12	до 105°C	22		pH водный
1	1-0.25 мм	13	105-130°C	23	Электропроводность, μS/cm	
2	0.25-0.05 мм	14	130-550°C	Обменные катионы (мг-экв/100 г):		
3	0.05-0.01 мм	15	550-900°C	24	Mg ²⁺	
4	0.01-0.005 мм	16	105-900°C	25	Ca ²⁺	
5	0.005-0.001 мм	17	до 900°C	26	сумма	
6	<0.001 мм	Элементный состав:		Подвижные (доступные растениям) элементы минерального питания:		
7	>0.01 мм – физ. песок			27	Нитраты, мг N/kg	
8	<0.01 мм – физ. глина			18	C _{общ.} , %	
9	>0.05 мм	19	N _{общ.} , %		28	P легкоподвижный, мг P ₂ O ₅ /кг
10	0.002-0.05 мм	20	C / N		29	P подвижный, мг P ₂ O ₅ /кг
11	<0.002 мм			30	K обменный, мг K ₂ O/kg	

Содержание общего углерода, которое включает преимущественно органический углерод (особенно в гумусово-аккумулятивных горизонтах), и в значительно меньшей степени углерод карбонатов, коррелировало отрицательно или положительно с большим рядом почвенных характеристик (табл. б). К ним относятся три наиболее тонкодисперсные фракции элементарных

почвенных частиц, потери при прокаливании при всех диапазонах температур, карбонаты, водный рН, обменный магний и нитраты. При выполнении множественного линейного регрессионного анализа (с различными алгоритмами расчета) были получены достоверные коэффициенты уравнения регрессии только для шести показателей свойств почв. Последующий множественный линейный регрессионный анализ с пошаговым включением значимых и исключением незначимых переменных для массива данных этих шести показателей позволил получить следующее уравнение регрессии с достоверными коэффициентами регрессии только для четырех почвенных характеристик:

$$\{C_{\text{общ}}\} = a + b * \{F<0.001\text{мм}\} + c * \{T130-550^{\circ}\text{C}\} + d * \{\text{CaCO}_3\} + e * \{T105-900^{\circ}\text{C}\}$$

Коэффициент детерминации этого уравнения равен 0.997. Поскольку фракция $\{T105-900^{\circ}\text{C}\}$ тесно связана с $\{T130-550^{\circ}\text{C}\}$ и $\{\text{CaCO}_3\}$, то мы исключили $\{T105-900^{\circ}\text{C}\}$ из массива данных и получили более простое уравнение регрессии практически без снижения величины коэффициента детерминации ($R^2 = 0.996$):

$$\{C_{\text{общ}}\} = a + b * \{T130-550^{\circ}\text{C}\} + c * \{F<0.001\text{мм}\} + d * \{\text{CaCO}_3\},$$

где $a = -0.073$, $b = 0.528$, $c = -0.38$ и $d = -0.040$.

Что касается свойств почвы, оказывающих прямое действие на рост и развитие растений, а также ряд сопряженных с ними показателей (гранулометрический состав и ПОВ), то проведенный корреляционный анализ позволил установить следующие зависимости:

для нитратного азота положительные связи – с $\{F0.25-0.05\text{мм}\}$, $\{T130-550^{\circ}\text{C}\}$, $\{C_{\text{общ}}\}$, $\{N_{\text{общ}}\}$, $\{C/N\}$, $\{Mg_{\text{обменный}}\}$, $\{P_{\text{легкоподвижный}}\}$, $\{P_{\text{подвижный}}\}$ и $\{K_{\text{обменный}}\}$, и отрицательные – с $\{F<0.001\text{мм}\}$;

для легкоподвижного фосфора положительные связи – с $\{F0.25-0.05\text{мм}\}$, $\{F0.05-0.01\text{мм}\}$, $\{N_{\text{общ}}\}$, $\{N-NO_3\}$, $\{P_{\text{подвижный}}\}$ и $\{K_{\text{обменный}}\}$, и отрицательные – с $\{F<0.001\text{мм}\}$;

для подвижного фосфора положительные связи – с $\{F0.25-0.05\text{мм}\}$, $\{F0.05-0.01\text{мм}\}$, $\{N-NO_3\}$, $\{P_{\text{легкоподвижный}}\}$ и $\{K_{\text{обменный}}\}$, и отрицательные – с $\{F<0.001\text{мм}\}$; $\{\text{CaCO}_3\}$, $\{pH\}$ и $\{Ca_{\text{обменный}}\}$;

для обменного калия положительные связи – с $\{F0.25-0.05\text{мм}\}$, $\{N-NO_3\}$, $\{P_{\text{легкоподвижный}}\}$, $\{P_{\text{подвижный}}\}$ и $\{K_{\text{обменный}}\}$, и отрицательные – с $\{F0.01-0.005\text{мм}\}$ и $\{Ca_{\text{обменный}}\}$.

Зависимость содержания легкоподвижного фосфора от подвижного хорошо описывается уравнением квадратичной параболы с коэффициентом детерминации 0.87:

$$\{P_{\text{легкоподвижный}}\} = a + b * \{P_{\text{подвижный}}\}^2,$$

где $a = 0.137$, $b = 0.000117$.

Таким образом, сравнительно небольшой массив данных позволил выявить положительные или отрицательные корреляционные связи между почвенными характеристиками, а для ряда свойств почв – установить форму этих зависимостей с помощью регрессионного анализа.

Сравнение результатов изучения строения и свойств почв геофизическими и традиционными методами

Ключевые площадки ЕЛ и АК отличаются по урожайности. На площадке ЕЛ урожайность зерна составила 24.2 ц/га, а на площадке АК была значительно выше – 37.0 ц/га. Урожайность, особенно при отсутствии применения средних и высоких доз удобрений, зависит от естественного плодородия почв. Одним из его показателей, хотя и действующих опосредованно на продуктивность растений, является мощность гумусово-аккумулятивного (наиболее плодородного) слоя почвы и содержание в нем ПОВ. Этот слой существенно отличался в двух изученных почвах: гумусово-аккумулятивный слой агростратозема (площадка АК) был в 2 раза больше, чем в агрочерноземе (площадка ЕЛ). Это различие хорошо фиксируется также и на разрезах электротомографии. Горизонты аккумуляции ПОВ, в целом отличались повышенными значениями УЭС по отношению к расположенным ниже иллювиальным и переходным к материнской породе горизонтам. Однако на площадке АК в приповерхностной части разреза агростратозема выделяется слой пониженного до 30 Ом·м электросопротивления в верхнем слое почвы 0-30 см. Природа пониженного УЭС этого слоя, вероятно, связана с особенностями его формирования. Он состоит из материала, привнесенного с поверхностных слоев почв,

расположенных выше по склону. В процессе переноса твердого стока вниз по склону, различные фракции почвенных частиц очевидно седиментируются дифференцированно по разным позициям катены. Вследствие этого, гранулометрический состав агростратозема, расположенного в аккумулятивной позиции, отличается от такового поверхностных слоев агрогумусового горизонта агрочернозема. Наиболее заметные отличия проявляются в пониженном содержании мелкой пыли и повышенном – илистых частиц в агростратоземе (табл. 1). Причем доля ила (самой тонкодисперсной фракции) возрастает с глубиной в этой почве до погребенного темногумусового горизонта [AU]. Интересно отметить, что в пахотном горизонте PU (0-22 см) агростратозема отмечается аномально высокое содержание подвижного фосфора и обменного калия (рис. 12 и табл. 4). Наиболее вероятно это связано с отличающимся минералогическим составом этих почв, обогащенных фосфором и калием, на что косвенно указывает повышенное содержание илистой фракции в гумусово-аккумулятивном слое этой почвы.

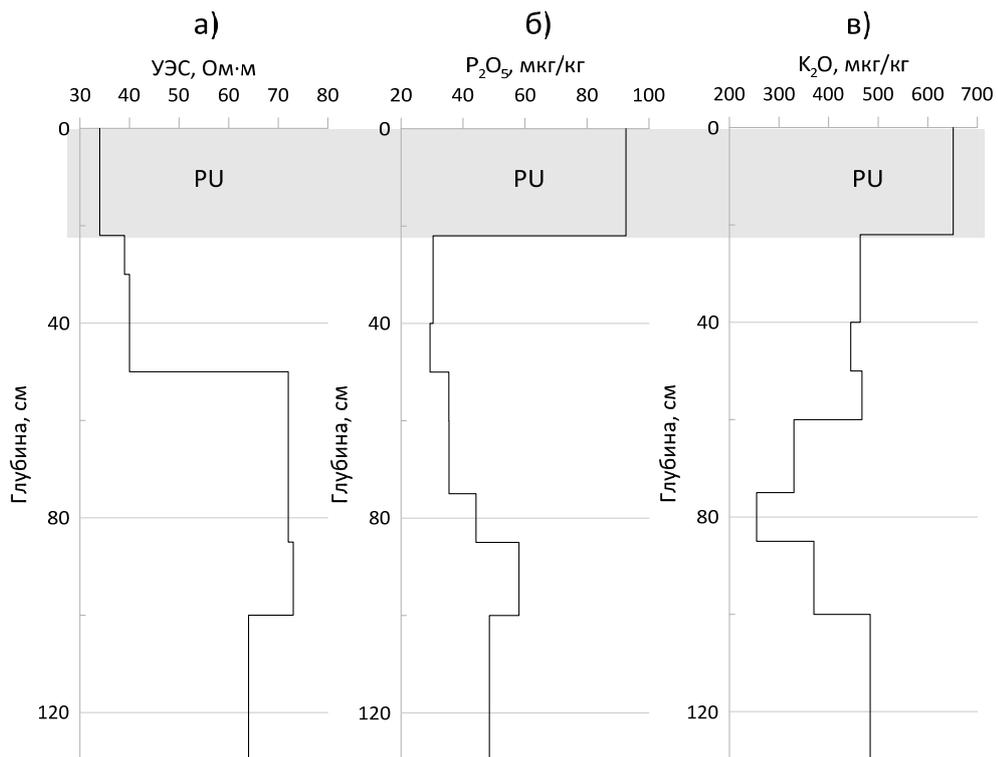


Рисунок 12. Распределение УЭС по данным электротомографии (а), содержание пула подвижного фосфора (б) содержание пула обменного калия (в) в агростратоземе на ключевой площадке АК (аккумулятивная позиция катены).

Таким образом, высокая урожайность яровой пшеницы, произрастающей на агростратоземе (в отличие от агрочернозема) может быть, в частности, объяснена увеличенным содержанием подвижного фосфора и обменного калия в горизонте PU, который характеризуется пониженным до 34 Ом·м электросопротивлением. Дополнительным фактором, повышающим урожайность культур, может быть более высокая влагообеспеченность почвы, находящейся в аккумулятивной позиции катены, особенно в весенний и раннелетний период в результате перераспределения по склону влаги после снеготаяния.

Сравнение гумусово-аккумулятивных горизонтов изученных почв по содержанию общего углерода показало, что в почве аккумулятивной позиции (потенциально более плодородной) этот показатель несколько ниже (2.5-3.0%), чем в почве элювиальной позиции (3.1-5.3%). Отсутствие достоверной корреляции $S_{\text{общ}}$ с урожайностью не является неожиданным, поскольку эти два показателя находятся не в прямой, а косвенной зависимости. Урожайность в значительно большей степени зависит от содержания влаги и доступных растениям форм элементов минерального питания.

Мы ожидали, что разное содержание общего углерода на ключевых площадках будет влиять и на УЭС почв, поскольку ранее установлена зависимость снижения УЭС при повышении содержания ПОВ (Коснырева, 2007; Handbook ..., 2008). Однако в ряде более поздних работ

(Поздняков А.И., Елисеев П., 2012; Поздняков и др., 2015) было показано, что зависимость УЭС от содержания общего углерода носит экспоненциальный характер, и наибольшее изменение ρ происходит в диапазоне от 0 до 2 % общего углерода, а при более высоких величинах $C_{\text{общ}}$ общего углерода УЭС изменяется. В верхних горизонтах наших почв электросопротивление меняется слабо. Вероятно, поэтому варьирование содержания углерода на площадках EL и АК не влияет на их УЭС и изменение его величины зависит от других факторов.

На площадке EL УЭС гумусово-аккумулятивного слоя (ниже 10 см) агрочернозема составил около 70 Ом·м, но в приповерхностной части почвенного профиля до глубины 10 см фрагментарно выделяется тонкий слой пониженного до 40-45 Ом·м электросопротивления (рис. 13). Этот слой представляет собой агротемногумусовый горизонт PU', который был подвергнут плоскорезной обработке как раз на глубину 10 см (см. выше «Морфологическое описание почвы ключевой площадки EL»).

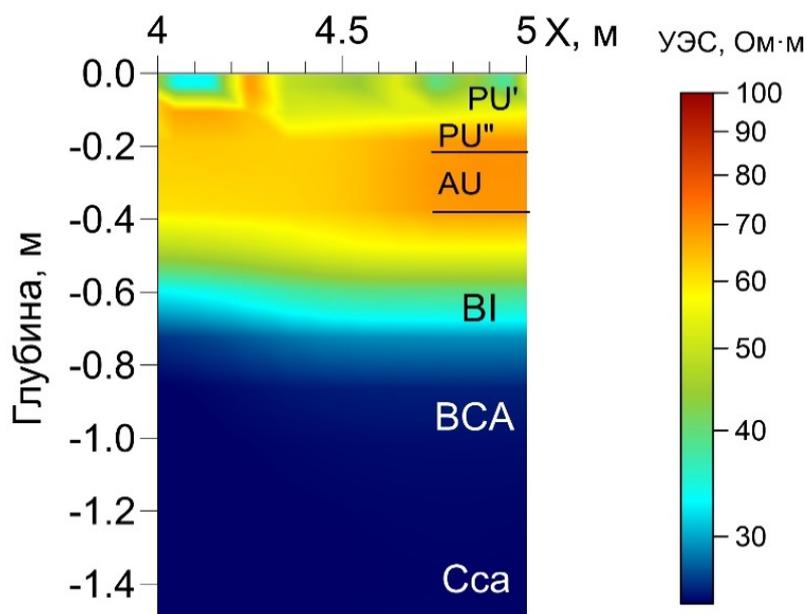


Рисунок 13. Фрагмент геоэлектрического разреза ключевой площадки EL (элювиальная позиция катены).

В этом же горизонте PU' отмечается максимальное содержание обменного калия до 490 мкг/кг, сопоставимое с содержанием этого пула в горизонтах PU и RU агрочернозема (330-650 мкг/кг). То есть высокое содержание подвижного фосфора и обменного калия в пахотном слое сопровождается пониженными значениями УЭС.

Корреляционный анализ связей УЭС гумусово-аккумулятивных горизонтов (PU, RU, AU) и некоторых показателей физических и химических характеристик почв показал отсутствие достоверной связи между УЭС и гранулометрическим составом почв, а также содержанием общего углерода, обменных кальция и магния (рис. 14). Слабая обратная связь установлена между УЭС и содержанием подвижного фосфора и обменного калия. Известно (Поздняков, Елисеев, 2012; Поздняков и др., 2015), что УЭС почв связано экспоненциальной зависимостью с емкостью катионного обмена (ЕКО), которая в свою очередь тесно связана с содержанием обменных катионов (прежде всего с Ca и Mg). Обе изученные почвы характеризуются высоким содержанием суммы катионов (Ca, Mg, K) по всем горизонтам и соответственно следует ожидать высокое значение ЕКО в этих почвах. В соответствии с экспоненциальным законом, УЭС слабо меняется при высоких значениях ЕКО. Вероятно, этим и объясняется отсутствие связи УЭС и содержания обменных Ca и Mg при высоких концентрациях последних в изученных почвах (рис. 14).

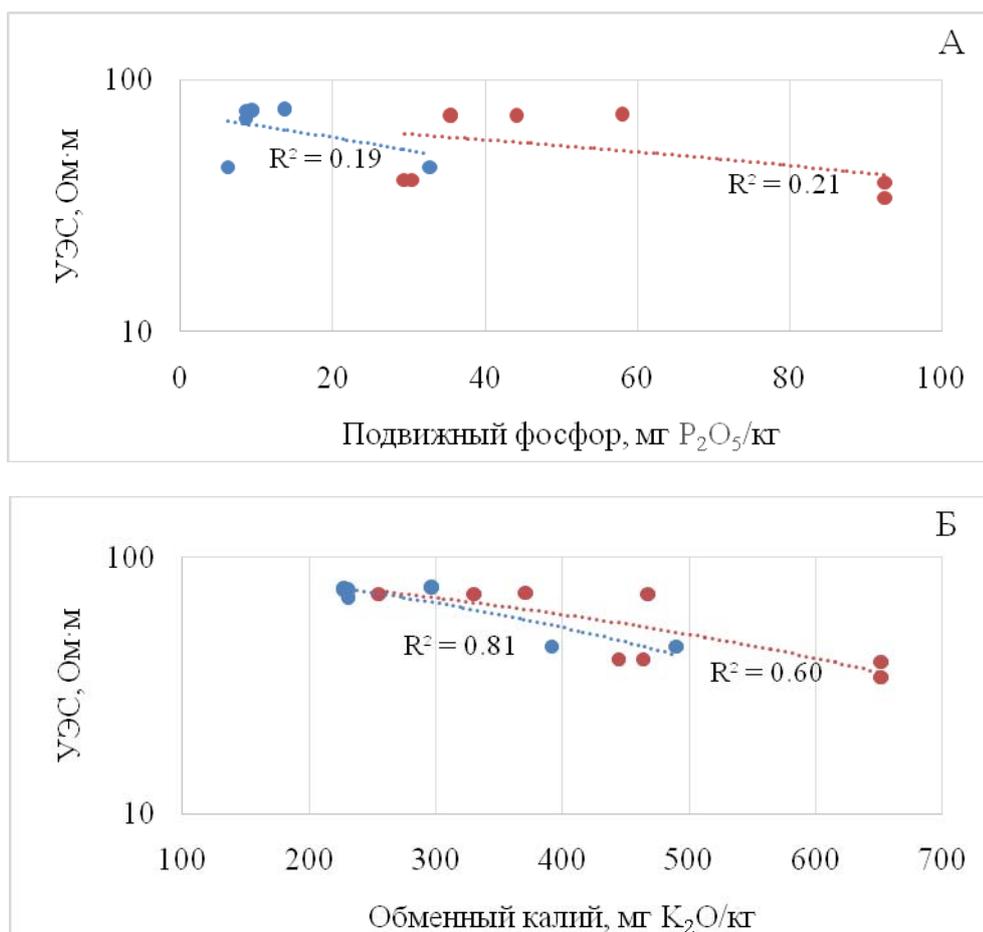


Рисунок 14. Зависимости величины УЭС от содержания подвижного фосфора (А) и обменного калия (Б) в различных почвенных горизонтах агрочернозема (синие линии и точки) и агростратозема (красные линии и точки).

ВЫВОДЫ

В результате геофизических исследований почв черноземного ряда Буготакского мелкосопочника установлено следующее.

Применение магниторазведки для решения почвенно-генетических и почвенно-агрохимических задач в условиях близко залегающих коренных пород (в пределах первого десятка метров) не представляется возможным, так как аномалии магнитного поля, обусловленные неоднородным геологическим строением, существенно выше по амплитуде, чем вариации магнитного поля, связанные с вещественным составом почв.

Метод георадиолокации позволяет оценить мощность и глубину залегания гумусово-аккумулятивного слоя почв в целом и, в том числе, выделить агротемногумусовый (пахотный) горизонт, погребенный темногумусовый горизонт, а также выявить границы залегания глинисто-иллювиального горизонта и переходного горизонта АВ.

Сравнение почв, расположенных на пашне и целинном участке показало, что по данным электротомографии гумусово-аккумулятивные горизонты пахотных и целинных почв существенно отличаются по величине удельного электрического сопротивления (более высокие значения получены в целинных почвах), но различие в вещественном составе целинных и пахотных почв в амплитудных характеристиках георадарного сигнала не выражено. Однако георадиолокационный метод позволяет установить изменение мощности гумусово-аккумулятивного слоя в пространстве на целинном участке.

При высоких значениях содержания общего углерода в гумусово-аккумулятивном слое (что наблюдалось в обеих изученных почвах) закономерность снижения УЭС с увеличением содержания ПОВ перестает работать. В этом случае ведущую роль в изменении УЭС очевидно приобретают такие факторы как гранулометрический и литологический состав почвы, а также определенный вклад, вероятно, вносят структура и микроагрегатный состав почв, плотность их

сложения, и качество ПОВ. При анализе обеих почв (выявлении различий между гумусово-аккумулятивным слоем и иллювиальным горизонтом, между стратифицированным темногумусовым горизонтом и погребенным горизонтом, между гумусово-аккумулятивными горизонтами пахотной и целинной почв) прослеживается одинаковая закономерность: повышение содержания илистой фракции и снижением доли крупной пыли сопровождается снижением электрического сопротивления, т.е. утяжеление гранулометрического состава вызывает (сопровождается) снижение УЭС.

По данным электротомографии УЭС гумусово-аккумулятивного слоя (ниже 10 см) агрочернозема составляет около 70 Ом·м, а приповерхностный слой почвы 0-10 см (подвергнутый плоскорезной обработке на эту глубину) диагностируется пониженным до 40-45 Ом·м УЭС. Агротемногумусовый (пахотный) горизонт агростратозема выделяется пониженным УЭС до 30-45 Ом·м, что также может быть связано с обработкой почвы. Наряду с этим, этот горизонт отличается повышенным содержанием подвижного фосфора и обменного калия. Обеднённые этими веществами почвенные горизонты характеризуются несколько повышенным УЭС.

Темногумусовые горизонты (AU, RU) агростратозема имеют повышенное до 60-70 Ом·м электросопротивление на фоне низкоомной почвообразующей породы, классифицируемой как легкие глины по гранулометрическому составу. УЭС темногумусового горизонта на целинном участке значительно выше, чем в пределах пашни.

Для оценки плодородия гумусово-аккумулятивных горизонтов почв с помощью геофизических методов рекомендуется проводить картирование полей методом электротомографии на глубину до 30 см. В целом, наиболее перспективным мы считаем комплексное применение электротомографии и георадиолокации, которое позволяет оценить мощность и нижнюю границу гумусово-аккумулятивного слоя, включая его разделение на агротемногумусовый (пахотный) и темногумусовый горизонты, а также выделить глубину залегания иллювиального горизонта и верхнюю границу аккумулятивно-карбонатного горизонта.

Электропроводность почвенной суспензии отрицательно коррелировала с мелким песком и крупной пылью, и положительно – с содержанием глинистых (<0.002 мм) частиц, карбонатов, обменного кальция и реакцией среды. Электропроводность, анализируемая в лабораторных условиях, и электросопротивление, определяемое в полевых условиях, существенно различаются, что связано с разным вкладом объёмной и поверхностной проводимости в суммарную проводимость в образцах в виде пасты и в породах ненарушенного сложения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области: грант № 17-44-540892 p_a.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балков Е.В., Панин Г.Л., Маништейн Ю.А., Маништейн А.К., Белобородов В.А. Опыт применения электротомографии в геофизике // *Геофизика*. 2012. № 6. С. 54-63.
2. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б. Электрические свойства черноземных почв Аларской степи // *Вестник Бурятского государственного университета*. 2014. № 3. С. 156-160.
3. Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // *Разведка и охрана недр*. 2005. № 12. С. 52-54.
4. Берхин Ю.И., Чагина Е.Г., Янцен Е.Д. Диагностика условий фосфорного питания сельскохозяйственных культур в Западной Сибири // *Агрохимия*. 1989. № 6. С. 112-116.
5. Владов М.Л., Золотарёв В.П., Старовойтов А.В. *Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований*. Москва, 1997. 66 с.
6. Владов М.Л., Старовойтов А.В. *Введение в георадиолокацию*. Учебное пособие. М.: Из-до МГУ, 2004. 153 с.
7. Воронин А.Я. Критерии идентификации строения и функциональных свойств почвенного профиля в георадиолокационных исследованиях с использованием георадара "Лоза-В" // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2015. № 80. С. 106-126.
8. Гамзиков Г.П. *Агрохимия азота в агроценозах*. Новосибирск: СО РАСХН, 2013. 790 с.
9. *Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Кузбасская. Лист N-44-XII. Объяснительная записка*. Составители: Т.Ф. Васютинская, Д.В. Михайловский. Редактор А.Б. Гинцингер // Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр. Москва, 1963. С. 116.
10. Гинзбург К.Е. Методы определения фосфора в почве // *Агрохимические методы исследования почв / Под ред. А.В. Соколова*. Москва: Наука, 1975. С. 106-190.
11. Заплавнова А.А., Оленченко В.В., Цибизов Л.В., Барсуков П.А. Оценка плодородия почв на основе

- комплексного геофизического картирования // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2018. Т. 3. С. 124–133. doi: [10.18303/2618-981X-2018-3-124-132](https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-3-124-132)
12. *Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка)* / Под ред. Ю.С. Глебовского. М-во геологии СССР. Л.: Недра, 1981. 263 с.
13. *Классификация и диагностика почв СССР*. Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М.: Колос, 1977. 224 с.
14. Кленов Б.М. *Гумус почв Западной Сибири*. М.: Наука, 1981. 142 с.
15. Коснырева М.В. *Разработка комплекса геофизических методов для решения прикладных задач почвенного картирования*. Дисс. на соискание ученой степени к.г.-м.н. Москва, 2007. 135 р.
16. Манштейн Ю.А. *Методика исследования подповерхностных неоднородностей на основе малоуглубинного индукционного частотного зондирования*. Дис. на соискание ученого звания к.т.н. Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 2010. 111 с.
17. *Наумова Н.Б.* К вопросу об определении содержания органического углерода в почве // *Почвы и окружающая среда*. 2018. №1(2). С.98-103. doi: [10.31251/pos.v1i2.13](https://doi.org/10.31251/pos.v1i2.13)
18. Никитенко Ф.А. Лёссовые породы Новосибирского Приобья и их инженерно-геологическая характеристика // *Труды НИИЖТа*. Новосибирск, 1963. Вып. 34. 285 с.
19. Пансю М., Готеру Ж. *Анализ почвы: минералогические, органические и неорганические методы анализа: справочник*. Санкт-Петербург: Профессия. 2014. 799 с.
20. Поздняков А.И., Елисеев П.И. Зависимость удельного электрического сопротивления от некоторых свойств антропогенно-преобразованных легких почв агроландшафтов гумидной зоны // *Вестник ОГУ*. 2012. № 10 (146). С. 98-104.
21. Поздняков А.И., Елисеев П.И., Поздняков Л.А. *Электрофизический подход к оценке некоторых элементов окультуренности и плодородия легких почв гумидной зоны* // *Почвоведение*, 2015. № 7. С. 832–842. doi: [10.7868/S0032180X15050068](https://doi.org/10.7868/S0032180X15050068)
22. *Полевой определитель почв России*. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
23. Пягай Э.Т., Белобров В.П., Молчанов Э.Н., Сео Мунг Чул, Сон Йон Куи Использование георадара в почвенных исследованиях // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2009. Т. 64. С. 34-40.
24. Смоленцева Е.Н., Чумбаев А.С., Соколова Н.А. *Почвы Предальтайской лесостепной почвенной провинции Западной Сибири (на примере Буготакского мелкосопочника)*. Путеводитель полевой почвенной экскурсии Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН «Почвы в биосфере» (Новосибирск, 10-14 сентября 2018 г.) / Под ред. Б.А. Смоленцева. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 49 с.
25. Сорокин О.Д. *Прикладная статистика на компьютере*, 2-е издание. Новосибирск, 2012. 282 с.
26. Танасиенко А.А. Эрозия – ландшафты и почвы Присалаирской дренированной равнины // *Путеводитель научных полевых экскурсий IV съезда Докучаевского общества почвоведов РАН*. Новосибирск, 2004. С. 12-31.
27. *Теория и практика химического анализа почв* (Под редакцией Л.А. Воробьевой) М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
28. Хмелев В.А. *Лёссовые черноземы Западной Сибири*. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 200 с.
29. Шапорина Н.А., Чичулин А.В., Танасиенко А.А. Латеральная изменчивость агрофизических показателей и неоднородность гидротермического поля в почвенном покрове склоновых поверхностей Предсалаирья // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. №. 12-7. С. 1270-1275.
30. Шеин Е.В., Гончаров В.М. *Агрофизика*. Ростов н/Д: Феникс. 2006. 400 с.
31. Шеин Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций // *Почвоведение*. 2009. № 3. С. 309-317.
32. Algeo J., Van Dam R.L., Slater L. Early-Time GPR: A Method to Monitor Spatial Variations in Soil Water Content during Irrigation in Clay Soils // *Vadose Zone Journal*. 2016. Vol. 15(11). P.1-9. doi: [10.2136/vzj2016.03.0026](https://doi.org/10.2136/vzj2016.03.0026)
33. *Handbook of agricultural geophysics* / Eds. Allred B.J., Daniels J.J., Ehsani M.R. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. 410 p.
34. Dean Jr. W.E. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods // *J. Sediment. Res.* 1974. Vol. 44. №1. P. 242–248. doi: [10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D](https://doi.org/10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D)
35. *IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports. № 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
36. Kucerik J., Demyan M.S., Siewert C. Practical application of thermogravimetry in soil science. Part 4. Relationship between clay, organic carbon and organic matter contents // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016. Vol. 123. No. 3. P. 2441–2450. doi: [10.1007/s10973-015-5141-8](https://doi.org/10.1007/s10973-015-5141-8)
37. Kucerik J., Tokarski D., Demyan M.S., Merbach I., Siewert C. Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen // *Geoderma*. 2018. Vol. 316. P. 38–46. doi: [10.1016/j.geoderma.2017.12.001](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.001)
38. Mathé V., Lévêque F. High resolution magnetic survey for soil monitoring: detection of drainage and soil tillage effects // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 212. Iss.1-2. P. 241-251. doi: [10.1016/S0012-821X\(03\)00241-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00241-3)
39. Rogers C.D.F., Chapman D.N., Entwisle D. et al. Predictive mapping of soil geophysical properties for GPR

- utility location surveys // *5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*, Granada, Spain. 2009. P. 60-67.
40. Shi R., Cioppa M.T. Magnetic survey of topsoils in Windsor – Essex County, Canada. // *Journal of Applied Geophysics*. 2006. Vol. 60. Iss. 3-4. P. 201-212. doi: [10.1016/j.jappgeo.2006.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.03.002)
41. Siewert C. Rapid screening of soil properties using thermogravimetry // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2004. Vol.68. No.5. P. 1656–1661. doi: [10.2136/sssaj2004.1656](https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1656)
42. Siewert C., Demyan M.S., Kucerik J. Interrelations between soil respiration and its thermal stability // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2012. Vol. 110. No. 1. P. 413–419. doi: [10.1007/s10973-011-2099-z](https://doi.org/10.1007/s10973-011-2099-z)

Поступила в редакцию 18.01.2019; принята 06.02.2019

Опубликована 11.02.2019

Сведения об авторах:

Оленченко Владимир Владимирович - кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией геоэлектрики ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Новосибирск, Россия); olenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Смоленцева Елена Николаевна – научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); esmolenceva@issa-siberia.ru

Заплавнова Анна Алексеевна - лаборант лаборатории естественных полей ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Новосибирск, Россия); zaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru

Русалимова Ольга Александровна – младший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); rusalimova@issa-siberia.ru

Барсуков Павел Анатольевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); barsukov@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

USING GEOPHYSICAL METHODS TO ASSESS THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CHENOZEMIC SOILS

© 2018 Olenchenko V.V. ^{1,2}, Smolentseva E.N. ³, Zaplavnova A.A. ¹,

Rusalimova O.A. ³, Barsukov P.A. ³

Addresses: ¹ Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics SB RAS, Koptuga 3, Novosibirsk 630090 Russia, E-mail: olenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

² Novosibirsk State University, Pirogova 2, Novosibirsk 630090 Russia

³ Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090 Russia, E-mail: barsukov@issa-siberia.ru

The aim of the study. To assess the potential of geophysical methods to investigate the structure and properties of chernozemic soils.

Location and time of the study. The field work was carried out during June-October 2018 on the two arable soils, namely Luvic Greyzemic Chernozem (Siltic) and Haplic Phaeozem (Siltic, Colluvic, Pachic) over Haplic Phaeozem (Siltic, Luvic), in the Bugotak Hills, which is part of the Cis-Salair denudation-accumulation plain on the right side of the Ob River in the south-east of West Siberia.

Methodology. Soils were studied by the standard soil and agrochemical techniques as well as by such geophysical methods as magnetometry, electrotomography and ground-penetrating radar. Soil morphology was described, and soil samples were collected from soil genetic horizons. Physical, physicochemical and chemical (altogether up to 28) properties, pertaining to soil potential and actual fertility were determined.

Relationships between soil properties and geophysical parameters were studied using correlation and multiple regression analyses.

Main results. *The study showed that when underlying solid rock is rather close to the surface, the magnetometry cannot be used to solve urgent issues in soil science. When soil total carbon (STC) in humus-accumulating layer was high, the relationship of the decrease in electrical resistivity (ER) with the increase in STC did not work anymore. The ER was found to depend on soil texture, as the heavier soil granulometry resulted in decreased ER. This regularity allows establishing the depth of illuvial horizons in humus-accumulating soils and a fortiori texture-differentiated ones. The ER in the humus-accumulation layer of the Luvic Greyzemic Chernozem (Siltic) was estimated as 70 ohm-m, while the 0-10 cm thick soil layer after subsurface cultivator could be determined by the ER values decreased to 40-45 ohm-m. The combined use of electrotomography and ground-penetrating radar was found to be the most promising for soil studies as such combination allows estimating the thickness of the humus-accumulating layer and its lower boundary, as well as discriminating between agro-dark-humus (arable) and dark-humus horizons, establishing the depth of the illuvial horizon and the upper boundary of the carbonate horizon.*

Conclusion. *We believe that geophysical methods can be beneficial for soil genesis research and large-scale soil mapping because of their ability to account for natural heterogeneity of spatial variation of soil potential fertility properties. Large scale soil maps provide a fortiori indispensable basis to solve many agricultural and environmental problems such as monitoring soil properties' changes because of soil degradation due to erosion, estimating pollution degree, assessing soil nutrients' content and calculating fertilization rates, etc. Establishing even empirical relationships between soil geophysical parameters and crop yields currently seems to be a rather ambitious task, as crop yields are mostly determined not by "basic" soil characteristics (which may correlate with geophysical parameters), but by plant available mineral nutrients and such external factors as photosynthetically active solar radiation, precipitation, fertilizer and pesticide application.*

Keywords: *electrotomography; ground-penetrating radar; magnetometry; soil properties; soil fertility; Chernozemic soils; Bugotak Hills; West Siberia*

How to cite: *Olenchenko V.V., Smolentseva E.N., Zaplavnova A.A., Rusalimova O.A., Barsukov P.A. Using geophysical methods to assess the structure and properties of chernozemic soils // The Journal of Soil and Environment. 2019. 2(1). e57. doi:10.31251/pos.v2i1.57*

REFERENCES

1. *Balkov E.V., Panin G.L., Manstein Yu.A., Manstein A.K., Beloborodov V.A. Electrotomography - in the geophysics, The Russian Geophysics Journal, 2012. Vol. 6, p. 54-63. (in Russian)*
2. *Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B. Electrical properties of the alarsky steppe chernozem soils, Bulletin of the Buryat State University, 2014, Vol. 3, p. 156-160. (in Russian)*
3. *Bobachev A.A., Gorbunov A.A. Two-dimensional electrical prospecting by the method of resistance and induced polarization: equipment, methods, software, Prospect and protection of mineral resources, 2005, No.12, p. 52-54. (in Russian)*
4. *Berhin Yu.I., Chagina E.G., Yantsen E.D. Diagnostics of conditions of phosphorus nutrition of crops in Western Siberia, Agrohimiya, 1989, No. 6, p. 112-116. (in Russian)*
5. *Vladov M.L., Zolotaryov V.P., Starovoytov A.V. Methodological guide to conduct GPR studies. Moscow, 1997, 66 p. (in Russian)*
6. *Vladov M.L., Starovoytov A.V. Introduction to GPR. Tutorial. Moscow: Publishing House of MSU, 2004, 153 p. (in Russian)*
7. *Voronin A.Y. Criteria for identifying the structure and functional properties of the soil profile in GPR studies using the GPR "Loza-V", Bulletin of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2015, Vol. 80, p. 56-72.*
8. *Gamzikov G.P. Agrochemistry of nitrogen in agrocenoses. Novosibirsk, SB RAAS Pubs., 2013, 790 p. (in Russian)*
9. *Geological map of the USSR scale 1: 200000. Kuzbass series. Sheet N-44-XII. Explanatory note. Compiled by: T.F. Vasyutinskaya, D.V. Mikhailovsky (ed. by A.B. Gintsinger). State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Geology and Mineral Protection. Moscow, 1963, p. 116. (in Russian)*
10. *Ginzburg K.E. Methods for determination of phosphorus in the soil. In book: Agrochemical methods for studying the soil. Ed. by A.V. Sokolov. Moscow: Nauka Publ., 1975, p.106-190. (in Russian)*
11. *Zaplavnova A.A., Olenchenko V.V., Tsibizov L.V., Barsukov P.A. Assessment of soil fertility based on complex geophysical mapping, Interexpo GEO-Siberia, 2018, Vol. 3, p. 124-133. doi: 10.18303/2618-981X-2018-3-124-132 (in Russian)*
12. *Instructions for magnetic exploration (ground magnetic survey, aeromagnetic survey, hydromagnetic survey) / Ed. by Yu.S. Glebovsky. Ministry of geology of the USSR. Leningrad: Nedra Publ., 1981, 263 p. (in Russian)*
13. *Classification and diagnostics of Soils of the USSR / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Friev. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian)*
14. *Klenov B.M. Humus of Western Siberian soils. Moscow: Nauka Publ., 1981. 142 p. (in Russian)*
15. *Kosnyreva M.V. Development of a complex of geophysical methods for solving applied problems of soil*

- mapping. Dissection for the scientific title of candidate of Cand. of Geol.-Miner. Sci. in Geophysics. Moscow, 2007. 135 p. (in Russian)
16. Manstein Yu.A. *Procedure for the study of subsurface inhomogeneities based on shallow induction frequency sounding*. Dissection for the scientific title of candidate of Technical Sciences. Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics SB RAS, 2010. 111 p. (in Russian)
17. Naumova N.B. Writing about organic carbon determination in soil, *The Journal of Soils and Environment*. 2018, Vol.1, No 2, p. 98-103. doi: 10.31251/pos.v1i2.13 (in Russian)
18. Nikitenko F.A. Loess sediments of the Novosibirsk Priobye and their engineering and geological characteristics, *Proceedings of the Research Institute of Railway Transport*, 1963. Vol. 34. 285 p. (in Russian)
19. Pansu M., Gothera J. *Soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods of analysis: a reference book*. St. Petersburg: Professiya Publ., 2014, 799 p. (in Russian)
20. Pozdnyakov A.I., Eliseev P.I. Dependence of electrical resistivity on some properties of anthropogenically transformed light soils of agrolandscapes of the humid zone, *OGU Bulletin*, 2012, No. 10 (146), p. 98-104. (in Russian)
21. Pozdnyakov A.I., Eliseev P.I., Pozdnyakov L.A. Electrophysical approach to the assessment of some elements of the cultivation and fertility of light soils of the humid zone, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol.48, No. 7, p. 726-735. doi: 10.1134/S1064229315050063
22. *Field guide for Russian soil*. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute Publ., 2008, 182 p. (in Russian)
23. Pyagai, E.T., Belobrov, V.P., Molchanov, E.N., Seo Mung Chul, Son Yon Kyi. Use of GPR in soil studies, *Bulletin of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute*, 2009, Vol. 64, p. 34-40. (in Russian)
24. Smolentseva E.N. Chumbaev, A.S. Sokolov, D.A. Sokolova N.A. *Soils of the Pre-Altai forest-steppe soil province of Western Siberia (using the example of the Bugotak Hills)*. Guide for a field soil excursion at the Russian Scientific Conference with international participation dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences "Soils in the Biosphere" (Novosibirsk, 10-14 September 2018) / Ed. by Smolentsev B.A. Novosibirsk: ISSA SB RAS Publ., 2018. 49 p. (in Russian)
25. Sorokin O.D. *Applied statistics on a computer* / 2nd edition. Novosibirsk, 2012. 282 p. (in Russian)
26. Tanasienko A.A. Erosion — Landscapes and Soils of the Cis-Salair Drained Plain. In book: *A Guide for Scientific Field Excursions of the 4th Congress of the Dokuchaev Society of Soil Scientists of the Russian Academy of Sciences*. Novosibirsk, 2004, p. 12-31. (in Russian)
27. *Theory and Practice of Soil Chemical Analysis* / Ed. by L.A. Vorobyova. Moscow: GEOS Publ., 2006, 400 p. (in Russian)
28. Khmelev V.A. *Loess Chernozems of Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka SB Publ., 1989, 200 p. (in Russian)
29. Shaporina N.A., Chichulin A.V., Tanasienko A.A. The lateral variability of agrophysical indicators and the heterogeneity of the hydrothermal field in soil slope surfaces Predsalair'e, *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, No. 12-7, p. 1270-1275. (in Russian)
30. Shein E.V., Goncharov V.M. *Agrophysics*. Rostov-na-Donu: Fenix publ., 2006. 400 p. (in Russian)
31. Shein E.V. The particle-size distribution in soils: problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification, *Eurasian Soil Science*, 2009, No.3, p. 284-291. doi: 10.1134/S1064229309030053
32. Algeo J., Van Dam R.L., Slater L. Early-Time GPR: A Method to Monitor Spatial Variations in Soil Water Content during Irrigation in Clay Soils, *Vadose Zone Journal*, 2016, Vol. 15(11), p.1-9. doi:10.2136/vzj2016.03.0026
33. *Handbook of agricultural geophysics* / Eds. Allred B.J., Daniels J.J., Ehsani M.R. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008, 410 p.
34. Dean Jr.W.E. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods, *J. Sediment. Res.*, 1974, Vol. 44, №1, p. 242-248. doi: 10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D
35. *IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, World Soil Resources Reports. № 106. FAO, Rome, 2014, 181 p.
36. Kucerik J., Demyan M.S., Siewert C. Practical application of thermogravimetry in soil science. Part 4. Relationship between clay, organic carbon and organic matter contents, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2016, Vol. 123, No. 3, p. 2441-2450. doi: 10.1007/s10973-015-5141-8
37. Kucerik J., Tokarski D., Demyan M.S., Merbach I., Siewert C. Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen, *Geoderma*, 2018, Vol. 316, p. 38-46. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.12.001
38. Mathé V., Lévêque F. High resolution magnetic survey for soil monitoring: detection of drainage and soil tillage effects, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2003, Vol. 212, Iss. 1-2, p. 241-251. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00241-3
39. Rogers C.D.F., Chapman D.N., Entwisle D. et al. Predictive mapping of soil geophysical properties for GPR utility location surveys. In book: *5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*, Granada, Spain, 2009, p. 60-67.
40. Shi R., Cioppa M.T. Magnetic survey of topsoils in Windsor – Essex County, Canada, *Journal of Applied Geophysics*, 2006, Vol. 60, Iss.3-4, p. 201-212. doi: 10.1016/j.jappgeo.2006.03.002
41. Siewert C. Rapid screening of soil properties using thermogravimetry, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, Vol.68, No.5, p. 1656-1661. doi: 10.2136/sssaj2004.1656

42. Siewert C., Demyan M.S., Kucerik J. Interrelations between soil respiration and its thermal stability, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2012, Vol. 110, No. 1, p. 413–419. doi: 10.1007/s10973-011-2099-z

Received 18 January 2019

Accepted 06 February 2019

Published 11 February 2019

About the authors:

Olenchenko Vladimir V. - Cand. of Geol. and Mineral. Sci., Associate Professor, Head of Laboratory of Geoelectrics in the Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); olenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Smolentseva Elena N. – Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); esmolenceva@issa-siberia.ru

Zaplavnova Anna A. - Laboratory Assistant in the Laboratory of Natural Geophysical Fields in the Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); zaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru

Rusalimova Olga A. – Junior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); rusalimova@issa-siberia.ru

Barsukov Pavel A. – Cand. of Biol. Sci., Leading Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); barsukov@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ И ТРАНСФОРМАЦИИ БЕНЗ(А)ПИРЕНА В ПОЧВЕ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО

© 2019 Я.А. Попилешко , С.Н. Сушкова , Т.М. Минкина , Е.М. Антоненко , Т.С. Дудникова

Адрес: Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, пр. Стачки 194/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, Россия. E-mail: jana.bysin@yandex.ru

Цель исследования. Изучение особенностей аккумуляции и трансформации бенз(а)пирена (БаП) в почве в условиях модельного эксперимента при искусственном загрязнении.

Место и время проведения. Работа была выполнена в Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского на кафедре почвоведения (г. Ростов-на-Дону), а также в Ботаническом саду Южного Федерального университета (г. Ростов-на-Дону).

Методология. Экстракция БаП из почв проведена методом омыления. Качественное и количественное определение БаП и других полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) выполнено методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием.

Основные результаты. Аккумуляция БаП в черноземе обыкновенном зависела от вносимых концентраций поллютанта. Изучение особенностей деструкции ПАУ в почвах модельного эксперимента через год после внесения поллютанта показало, что концентрация БаП в почве снизилась на 11-40%, а через два года – на 15-44% от первоначального исходного содержания БаП в почве. Процент снижения концентрации БаП в черноземной почве возрастает с увеличением дозы внесенного ксенобиотика, и снижается на второй год проведения эксперимента. Увеличение дозы внесения поллютанта в почву модельного эксперимента способствовало закономерному возрастанию других высокомолекулярных полиаренов, что свидетельствовало о достаточно быстрой трансформации БаП в черноземе обыкновенном. По содержанию в почве модельного эксперимента в первый год исследований ПАУ образовывали следующий убывающий ряд: пирен > хризен > флуорантен > фенантрен, при этом их содержание превышало 20% от общего суммарного содержания ПАУ в почве. Во второй год исследований наблюдали иную закономерность в содержании приоритетных ПАУ: пирен > хризен > фенантрен > флуорантен, содержание которых превышало 20% от общего суммарного содержания ПАУ в почве.

Заключение. В первоначально загрязненной почве модельного эксперимента с увеличением дозы внесения поллютанта закономерно возрастало содержание всех ПАУ, и в большей степени высокомолекулярных полиаренов, что указывает на достаточно высокую степень аккумуляции ксенобиотика черноземом обыкновенным. Особенности аккумуляции и трансформации ПАУ в почвах в условиях искусственного загрязнения показало деградацию крупноядерных ПАУ, начиная от пяти кольчатых полиаренов, и их структурную реорганизацию в менее ядерные полиарены, т.е. ПАУ с двумя-четырьмя кольцами. Выраженное снижение концентрации БаП в почве при проведении модельного эксперимента указывает на способность почв черноземного ряда к самоочищению.

Ключевые слова: аккумуляция; полициклические ароматические углеводороды; искусственное загрязнение; почва; трансформация; модельный эксперимент

Цитирование: Попилешко Я.А., Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Антоненко Е.М., Дудникова Т.С. Особенности аккумуляции и трансформации бенз(а)пирена в почве при искусственном загрязнении чернозема обыкновенного // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 1. с32. doi: 10.31251/pos.v2i1.32

ВВЕДЕНИЕ

Исследования загрязнения окружающей среды проводят ученые многих стран в течение длительного времени (Опекунов и др., 2015; Максимова и др., 2014). Работы, посвященные исследованиям загрязнения приоритетными органическими загрязнителями – полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ), позволили изучить особенности механизмов аккумуляции данных поллютантов (Callen et al., 2013; Pereira et al., 2013; Singh et al., 2013; Sushkova et al., 2018; Witter et al., 2014). Накопление ПАУ в почвах вызвано повышением уровня загрязнения, а также химической устойчивостью токсикантов (Геннадиев, Цибарт, 2013; Касимов и др., 2016). Наиболее крупными источниками загрязнения окружающей среды ПАУ являются

предприятия электроэнергетики, использующие в качестве сырья низкокачественное угольное топливо (Witter et al., 2014; Yam, Leung, 2013; Сушкова и др., 2017). В настоящее время насчитывают более 200 представителей ПАУ, которые являются сильными канцерогенными соединениями (Стадник, 2013). Бенз(а)пирен (БаП) (Белинская и др., 2015) является одним из главных реперных соединений, характеризующих загрязнение почв ПАУ и подлежит обязательному контролю во всех природных средах (Предельно допустимые концентрации ..., 2006; Zelinkova, Wenzl, 2015). Наличие БаП в почвах, растениях, воде связано с повышенным уровнем техногенного воздействия (Жидкин и др., 2017; Абакумов и др., 2014; Винокуров и др., 2012). В связи с этим данное соединение выбрано в качестве модельного при загрязнении почвы в вегетационном эксперименте. В ходе трансформации БаП происходит образование ряда менее ядерных ПАУ, метаболизм которых необходимо контролировать для лучшего понимания процессов перераспределения ПАУ в почве, а также для оценки потенциального токсического ущерба при загрязнении БаП (Chen et al., 2018). В работе проводили изучение следующих ПАУ, образующихся в процессе деградации БаП: двухкольчатых (нафталин, бифенил), трехкольчатых (антрацен, аценафтен, аценафтилен, флуорен, фенантрен) и четырехкольчатых (бенз(а)антрацен, пирен, флуорантен, хризен) (Безносиков и др., 2008; Яковлева и др., 2008).

Цель работы – изучить особенности аккумуляции и трансформации БаП в почве при искусственном загрязнении чернозема обыкновенного.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для модельного эксперимента использовали БаП, как наиболее токсичный представитель ПАУ, который обладает мутагенной и канцерогенной активностью, а также потенциально опасен для здоровья человека (Zelinkova, Wenzl, 2015; Янышева и др., 2008), относится к веществам первого класса опасности и является главным маркером загрязнения почв ПАУ (Castano-Vinyals et al., 2004). Почву модельного эксперимента искусственно загрязняли БаП. Использовали полиэтиленовые сосуды объемом 4 л, на дно которых укладывали 3 см слой промытого стекла для обеспечения дренажа. В подготовленные сосуды опытов в соответствии со схемой вносили 2 кг почвы, просеянной через сито с диаметром ячеек 2 мм. Схема опыта включала следующие варианты: контроль (исходная почва без загрязнителя), фон (почва, в которую вносили чистый ацетонитрил), а также варианты с внесением 20, 200, 400 и 800 нг/г БаП (что соответствовало 1, 10, 20 и 40 ПДК БаП в почве). Раствор БаП в ацетонитриле вносили на поверхность почвы. Для лучшего взаимодействия с внесённым БаП почву постоянно увлажняли до состояния наименьшей полевой влагоёмкости.

Почву в сосудах инкубировали в условиях, близких к естественным, под навесом на экспериментальной площадке Южного федерального университета (г. Ростов-на-Дону), в течение 2-х лет, поливая ее дистиллированной водой по мере необходимости для поддержания оптимальной влажности, не давая ей пересыхать. Через 1 месяц после начала инкубации в первый год исследований сосуды засеивали тест-культурой. В качестве тест-культуры (Киреева и др., 2009) использовали ячмень яровой сорта «Одесский-100». Высев растений производили в первой половине апреля на глубину 5 см в количестве 30 зерен на сосуд. В течение 2-х лет исследований сосуды засеивали тест-культурой в начале апреля так, чтобы отбор образцов был возможен до наступления отрицательных температур во избежание дополнительной деструкции БаП. Полив осуществляли дистиллированной водой по рассчитанной норме полива на заданный объем почвы. Соблюдали равные условия освещенности всех вариантов модельного эксперимента. В 1-й и 2-й годы проведения модельного эксперимента перед посевом ячменя почву в сосудах перемешивали и отбирали средний образец для определения содержания ПАУ. Почвенные образцы подготавливали к химическому анализу в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.4.02-2017 (2018). Извлечение ПАУ проводили методом омыления (РД 52.10. 556-95, 2002).

В колбу для роторного испарителя объемом 100 мл помещали 1 грамм исследуемого образца, добавляли 30 мл щелочно-спиртового раствора и кипятили с обратным холодильником в течение трех часов. Полученный перколят сливали в конические колбы емкостью 100 мл, добавляли 5 мл дистиллированной воды и 15 мл гексана. Далее экстракцию проводили на шейкере в течение 10 минут при частоте движения 135 перемешиваний в минуту. Извлечение проводили три раза с очередной порцией гексана. Разделение слоев проводили в делительной воронке объемом 100 мл. Полученные гексановые экстракты объединяли в делительной воронке и промывали дистиллированной водой до рН 7. Далее экстракты пропускали через воронку,

заполненную прокаленным сульфатом натрия, в чистую сухую роторную колбу, упаривали на ротационном испарителе с водоструйным насосом при температуре водяной бани 40°C и скоростью вращения 120 оборотов в минуту до сухого остатка. В полученный сухой остаток добавляли 1 мл ацетонитрила, выдерживали 30 минут и проводили анализ методом ВЭЖХ с обращенно-фазной колонкой.

Содержание индивидуальных ПАУ в почве рассчитывали по формуле:

$$a = k \cdot S_1 \cdot C_{ст} \cdot 1000 / (S_{ст} \cdot m) \cdot V,$$

где a – содержание ПАУ, нг/г;

$S_{ст}$ и S_1 – площади пиков стандартного раствора и образца индивидуальных ПАУ;

$C_{ст}$ – концентрация стандартного раствора индивидуальных ПАУ, нг/мл;

k – коэффициент извлечения индивидуальных ПАУ из образца;

m – масса образца, г;

V – объем ацетонитрильного экстракта.

Идентификацию БаП проводили методом ВЭЖХ по относительным временам удерживания стандартного образца при детектировании на флуориметрическом детекторе (UV-1000 и FL-3000). Методика выполнения измерений массовой доли бенз(а)пирена в пробах почв, грунтов, донных отложений и твердых отходах методом ВЭЖХ с использованием анализатора жидкости «Флюорат-02 в качестве флуориметрического детектора» - ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.39-03 (2007).

Хроматограмма экстракта почвы, приведенная на рис. 1, свидетельствует о четком отделении БаП от сопутствующих компонентов пробы. Для разработанной методики определения БаП в почве оценена случайная составляющая погрешности измерения, которая для диапазона концентраций 2-200 мкг/кг составила 3,5-14,0%.

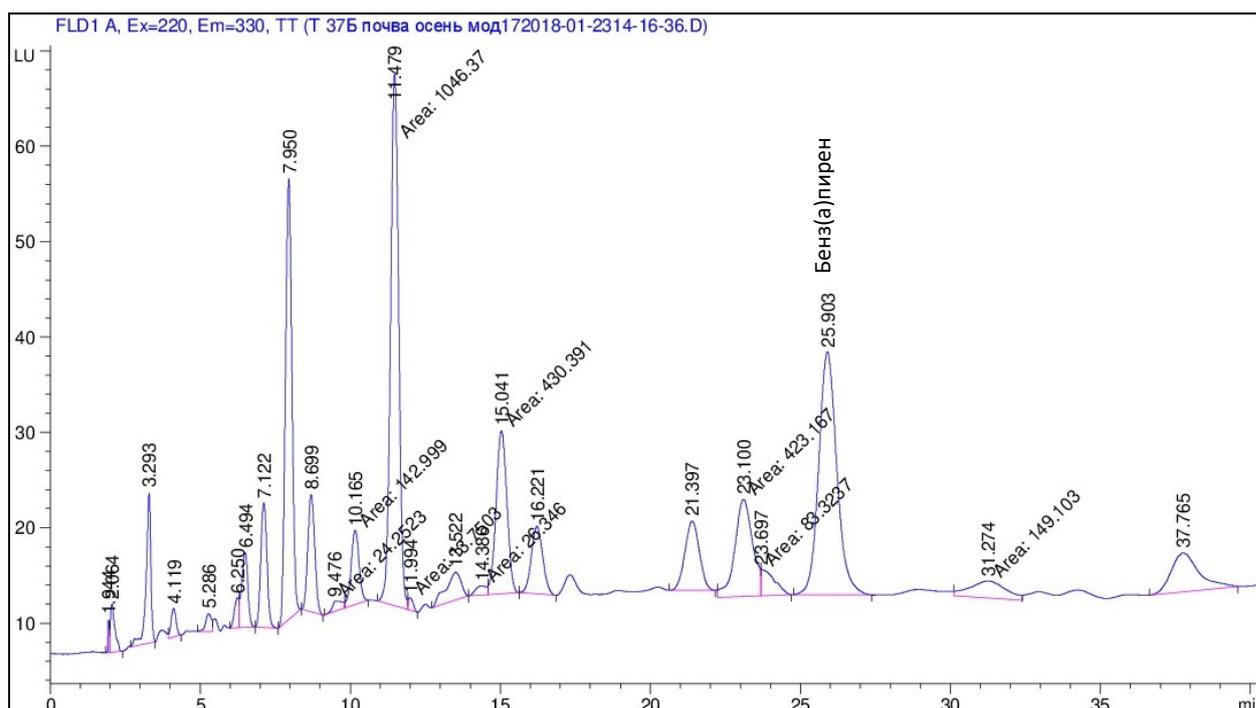


Рисунок 1. Хроматограмма почвенного экстракта по стандартам приоритетных ПАУ (время выхода БаП – 25,903 мин).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первый год исследований обнаружено следующее содержание БаП в черноземе обыкновенном модельного эксперимента: контроль – 21,8±1,2 нг/г; фон – 21,7±1,0 нг/г; 1 ПДК – 37,1±2,1 нг/г; 10 ПДК – 159,1±7,6 нг/г; 20 ПДК – 320,9±12,4 нг/г; 40 ПДК – 497,3±13,9 нг/г (рис. 2). Аккумуляция БаП в черноземе обыкновенном протекала соразмерно вносимым концентрациям БаП и закономерно увеличивалась в соответствии с увеличением концентраций внесенного токсиканта. Во второй год исследований обнаружено следующее содержание БаП в черноземе обыкновенном модельного эксперимента: контроль – 20,5±2,1 нг/г; фон – 21,6±0,8 нг/г; 1 ПДК – 35,7±2,6 нг/г; 10 ПДК – 127,7±8,4 нг/г; 20 ПДК – 255,6±13,9 нг/г; 40 ПДК – 458,2±18,5 нг/г (рис. 2).

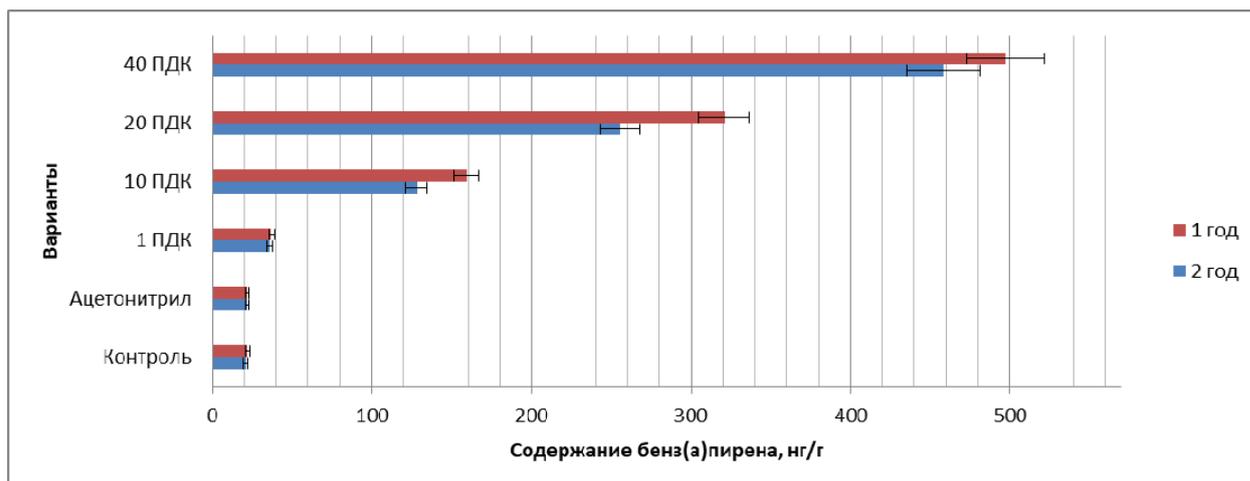


Рисунок 2. Содержание бенз(а)пирена в черноземе обыкновенном модельного эксперимента за 2 года проведения модельного эксперимента, нг/г

Полученные данные свидетельствуют о постепенном снижении содержания БаП во всех загрязненных вариантах модельного эксперимента на второй год проведения исследований (рис. 2). Корреляционная зависимость между содержанием БаП в почве и внесенными концентрациями токсиканта составила $R=0,99$ в первый и второй годы исследования.

Установлено, что относительное снижение содержания БаП в черноземной почве, искусственно загрязненной различными концентрациями БаП, возрастает с увеличением количества внесенного ксенобиотика за 2 года проведения модельного эксперимента по сравнению с первоначальным исходным содержанием БаП в почве (Габов и др., 2010; Lu et al., 2012). Так, в черноземе обыкновенном, специально загрязненном БаП в концентрациях 20, 100, 400 и 800 мкг/кг, в первый год разложилось 11,2, 28,3, 23,9, 39,5%, соответственно, а во второй год около 14,5, 42,4, 39,4 и 44,2% загрязнителя, соответственно, от первоначального исходного содержания БаП в почве. В чистой контрольной почве (фоновой и обработанной ацетонитрилом) содержание БаП составило 20,5-21,7 нг/г, что сравнимо с уровнем 1 ПДК (Табл.2), и было взято за фоновое значение БаП в черноземе обыкновенном.

Таблица 1.

Деструкция БаП в черноземе обыкновенном в начале 1 и 2-го года модельного эксперимента, % от первоначального исходного содержания БаП в почве

Варианты	1 год	2 год
Контроль	0,0	6,0
Ацетонитрил	0,5	0,9
1 ПДК	11,2	14,5
10 ПДК	28,3	42,4
20 ПДК	23,9	39,4
40 ПДК	39,5	44,2

Содержание индивидуальных ПАУ во всех вариантах опыта составило: двухядерных – $8,0 \pm 2,5$ - $16,0 \pm 3,6$ нг/г для нафталина, $1,0 \pm 0,1$ - $6,0 \pm 1,2$ нг/г для бифенила; трехядерных – $0,1 \pm 0,01$ - $1,1 \pm 0,1$ нг/г для аценафтена, $6,0 \pm 1,5$ - $37,0 \pm 3,5$ нг/г для аценафтилена, $3,2 \pm 0,9$ - $6,5 \pm 1,1$ нг/г для антрацена, $6,0 \pm 1,8$ - $8,5 \pm 2,1$ нг/г для флуорена, $39,0 \pm 3,1$ - $46,4 \pm 4,2$ нг/г для фенантрена; четырехядерных – $32,5 \pm 3,1$ - $87,4 \pm 5,7$ нг/г для флуорантена, $76,7 \pm 1,2$ - $132,4 \pm 1,2$ нг/г для хризена, $90,0 \pm 6,0$ - $146,1 \pm 7,2$ нг/г для пирена, $7,0 \pm 2,3$ - $10,1 \pm 3,3$ нг/г для бенз(а)антрацена (рис. 3). По содержанию в почвах модельного эксперимента в первый год исследований ПАУ образовывали следующий убывающий ряд: пирен > хризен > флуорантен > фенантрен; их содержание превышало 20% от общего суммарного содержания ПАУ в почве.

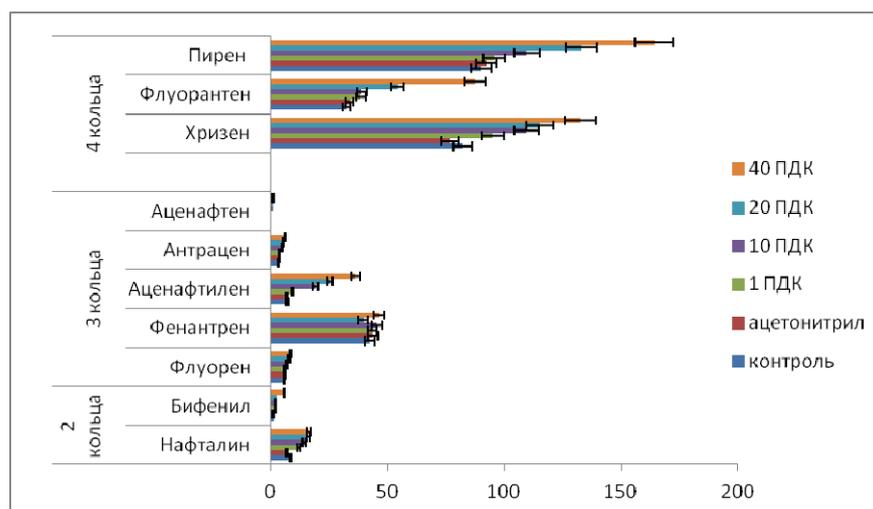


Рисунок 3. ПАУ в почве модельного эксперимента, загрязненных БаП, в первый год исследований, нг/г.

Показано, что с увеличением дозы внесения поллютанта в почву модельного эксперимента закономерно возрастает содержание всех ПАУ, в большей степени БаП, а также других высокомолекулярных полиаренов, что говорит о достаточно быстрой трансформации БаП в черноземе обыкновенном за первый год исследований.

Исследования трансформации БаП во 2-ой год исследований, включая детальный анализ образцов непосредственно после окончания инкубации, показал, что концентрации двухядерных ПАУ составили $7,0 \pm 1,5 - 18,1 \pm 2,8$ нг/г для нафталина, $1,2 \pm 0,01 - 5,7 \pm 0,9$ нг/г для бифенила; трехядерных – $0,05 \pm 0,001 - 1,3 \pm 0,02$ нг/г для аценафтена, $6,9 \pm 1,5 - 35,9 \pm 3,9$ нг/г для аценафтилена, $3,1 \pm 0,5 - 6,9 \pm 1,1$ нг/г для антрацена, $6,2 \pm 1,8 - 8,2 \pm 1,9$ нг/г для флуорена, $42,5 \pm 4,2 - 52,1 \pm 5,1$ нг/г для фенантрена; четырехядерных – $32,9 \pm 3,6 - 92,1 \pm 6,1$ нг/г для флуорантена, $74,6 \pm 6,2 - 185,1 \pm 7,8$ нг/г для хризена, $82,1 \pm 5,0 - 179,5 \pm 7,9$ нг/г для пирена, $7,8 \pm 1,3 - 12,4 \pm 3,6$ нг/г для бенз(а)антрацена (рис.4). Установлено аналогичное с первым годом увеличение содержания ряда индивидуальных ПАУ в почвах, загрязненных БаП, по сравнению с контрольной незагрязненной почвой. Достоверных отличий между содержанием приоритетных ПАУ (пирен, хризен, фенантрен, флуорантен, аценафтилен, нафталин, флуорен, бифенил, антрацен) в первый и второй год проведения эксперимента не обнаружено. Во второй год исследований в почвах модельного эксперимента ПАУ образовывали следующий убывающий ряд: пирен > хризен > фенантрен > флуорантен; их содержание превышало 20% от общего суммарного содержания ПАУ в почве. Полученные данные согласуются с данными, полученными при проведении исследований ранее (Alomirah et al., 2010; Яковлева, 2008).

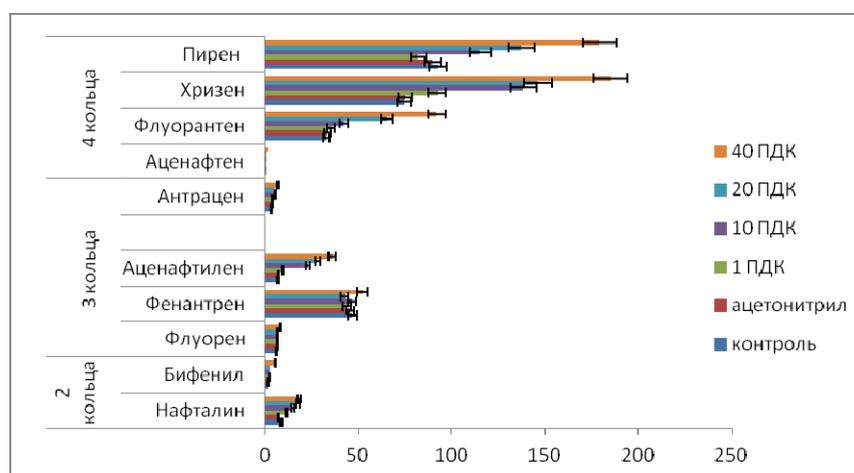


Рисунок 4. Содержание ПАУ в почве модельного эксперимента, загрязненных БаП, во второй год исследований, нг/г

На второй год в структуре высокомолекулярных полиаренов неизменно преобладали следующие индивидуальные ПАУ: БаП > хризен > пирен > флуорантен, содержание которых превышало 15-20% от общего суммарного содержания ПАУ в почве.

ОБСУЖДЕНИЕ

Аккумуляция БаП в черноземе обыкновенном искусственно загрязненной почвы в модельном эксперименте закономерно возрастала пропорционально внесенным концентрациям поллютанта. В течение двух лет проведения модельного эксперимента в загрязненных почвенных образцах разложилось от 15 до 44 % от внесенных концентраций БаП в почву. При этом степень деструкции БаП в первый год исследований варьировала от 11 до 40 %, а во второй год – от 15 до 44 %. Суммарное содержание БаП в почве за 2 года эксперимента уменьшилось: при дозе внесения 1 ПДК – на 15%, при дозе 10 ПДК – на 42%, при дозе 20 ПДК – на 40% и при дозе 40 ПДК – на 44%.

Деструкция БаП в черноземе обыкновенном происходит многостадийно, под влиянием многих факторов (Минкина и др., 2011). В результате деструкции ПАУ появляется большое количество окисленных форм, обладающих прямым канцерогенным воздействием, а также прямые ингибиторы роста растений (Chen et al., 2018). Исследованиями показано, что БаП в микродозах на уровне фона является биостимулятором роста для растений, а в больших дозах угнетает их рост (Zelinkova, Wenzl, 2015). Также БаП может проникать в растения механическим путем, т.е. через поры, а в почве образовывать сложные, прочно связанные, комплексные соединения, внедряясь в химические структуры. Данные процессы обуславливают особенности деструкции БаП в почвах модельного эксперимента, в котором ежегодно на протяжении 2-х лет выращивали ячмень яровой.

Процесс незначительного повышения концентраций ПАУ в почве при внесении БаП связан с их трансформацией и перераспределением полиаренов в менее низкомолекулярные формы, т.е. трансформацией высокомолекулярных соединений от пятичольчатых до двух-, трех- и четырехчольчатых ПАУ. Например, в некоторых работах отмечено, что в почве с рН 4,5 в первые 10 суток может разрушиться всего 1–5 % от внесенного БаП, тогда как в почве с рН 7,2 происходит разрушение до 20–80 % от внесенного БаП (Крылов и др., 2010). Также доказано, что воздействие света приводит к деструкции ПАУ (Чуков и др., 2006). Таким образом, на второй год проведения модельного эксперимента установлено незначительное повышение содержания некоторых трех- и четырехчольчатых ПАУ в образцах, загрязненных БаП, что свидетельствует о трансформации БаП в более низкомолекулярные соединения ПАУ.

Процесс трансформации ПАУ обусловлен микробиологической деградацией данных соединений в почве (Брянская и др., 2015). При попадании в живые организмы ПАУ проходят многоэтапную метаболическую активацию с помощью специфических ферментов. Ферментная система в первую очередь отвечает за метаболизм ПАУ, которые преобразуются при попадании в живой организм при помощи НАДФ и молекулярного кислорода из неполярных ПАУ в полярные производные (гидрокси- и арен- оксиды). Установлено, что в почвах модельного эксперимента процент деструкции БаП возрастал пропорционально увеличению исходной концентрации БаП в почве от 1 до 40 ПДК. Внесение одного растворителя (контроль с ацетонитрилом) лишь незначительно повлияло на исходное содержание поллютанта в почве и степень деструкции ПАУ. При трансформации БаП из его метаболитов обнаружены такие неокисленные формы ПАУ, как пирен, флуорантен, хризен, и промежуточные четырехчольчатые метаболиты. Также наблюдалось увеличение содержания трехядерных ПАУ, таких как фенантрен, аценафтилен, антрацен, и двухядерного ПАУ (нафталина).

Содержание индивидуальных ПАУ при модельном загрязнении почв БаП от 1 ПДК до 40 ПДК увеличилось по сравнению с контрольным образцом за первый год исследования в следующем порядке: бифенил (37–79%), нафталин (30–47%), аценафтилен (22–80%), флуорантен (15–62%), хризен (13–37%), антрацен (9–50%), пирен (5–45%), фенантрен (2–8%), флуорен (1–28%). Во второй год установлено следующее увеличение содержания индивидуальных ПАУ при загрязнении от 1 ПДК до 40 ПДК по сравнению с контролем: бифенил (44–79%), аценафтилен (26–80%), нафталин (25–52%), хризен (19–59%), антрацен (17–54%), флуорантен (6–23%), флуорен (6–31%), пирен (19–48%), фенантрен (1–9%). Из полученных данных следует, что на второй год происходит незначительное увеличение содержания ПАУ по сравнению с контролем, что свидетельствует о трансформации тяжелых ПАУ, например, четырехчольчатых в двух- и

трехкольчатые. Это связано со многими внешними и внутренними факторами, в частности, с воздействием ферментативных систем микроорганизмов, корневых экссудатов растений, метаболизмом ячменя и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что содержание БАП в искусственно загрязненном черноземе обыкновенном закономерно возрастает с увеличением дозы внесенного поллютанта. Особенности аккумуляции и трансформации ПАУ в почвах в условиях искусственного загрязнения почв, и изучение структуры образующихся канцерогенных метаболитов, показало трансформацию крупноядерных ПАУ, начиная от пятикольчатых полиаренов, и их структурную реорганизацию в менее ядерные полиареныб т.е. ПАУ с двумя-четырьмя кольцами. По содержанию в почвах модельного эксперимента ПАУ образовывали следующий убывающий ряд: пирен > хризен > фенантрен > флуорантен > аценафтилен > нафталин > флуорен > антрацен. Степень деструкции БАП за два года проведения исследований увеличивалась, составив от 9 до 44 % по окончании исследования. Выраженное снижение концентрации БАП в почве при проведении модельного эксперимента указывает на способность почв черноземного ряда к самоочищению.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 6.6222.2017/8.9). Исследования выполнены на оборудовании ЦКП Южного федерального университета «Высокие технологии», «Биотехнология, биомедицина и экологический мониторинг».

ЛИТЕРАТУРА

1. Абакумов Е.В., Лодыгин Е.Д., Габов Д.А., Крыленков В.А. Содержание полициклических ароматических углеводов в почвах Антарктиды на примере российских полярных станций // *Гигиена и санитария*. 2014. №. 1. С. 30-34.
2. Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Габов Д.Н. и др. Полициклические ароматические углеводороды в системе почва-растение // *Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*. 2008. №. 9. С. 2-8.
3. Белинская Е.А., Зыкова Г.В., Семенов С.Ю., Финаков Г.Г. Полициклические ароматические углеводороды в почвах г. Москвы // *Почвоведение*. 2015. №. 6. С. 668-674.
4. Брянская А.В., Уварова Ю.Е., Слынько Н.М. и др. Теоретические и практические аспекты проблемы биологического окисления углеводов микроорганизмами // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2015. Т. 18. №. 4/2. С. 999-1002.
5. Винокуров И.Ю., Карлович И.А., Окорков В.В. и др. Антропогенное воздействие на сельскохозяйственные ландшафты во Владимирском ополье и оценка загрязнений локального водосборного бассейна рек Каменка-Мжара // *Владимирский земледелец*. 2012. №. 3. С. 21-25.
6. Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Яковлева Е.В. Полициклические ароматические углеводороды в почвах техногенных ландшафтов // *Геохимия*. 2010. №. 6. С. 606-617.
7. Геннадиев А.Н., Цибарт А.С. Факторы и особенности накопления пирогенных полициклических ароматических углеводов в почвах заповедных и антропогенно измененных территорий // *Почвоведение*. 2013. №. 1. С. 32-40.
8. *Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы*. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.
9. *ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа*. М. Стандартинформ. 2018. 10 с.
10. Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С. Поступление и поведение полициклических ароматических углеводов в пахотных, залежных и лесных почвах таежной зоны (Тверская область) // *Почвоведение*. 2017. №. 3. С. 311-320. doi: [10.7868/S0032180X17030133](https://doi.org/10.7868/S0032180X17030133)
11. Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. *Геохимия ландшафтов Восточной Москвы*. Москва, АПР Москва, 2016, 276 с.
12. Киреева Н.А., Новоселова Е.И., Ерохина Н.И., Григориади А.С. Накопление бенз (а) пирена в системе «Почва растение» при загрязнении нефтью и внесении активного ила // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2009. №. 6. С. 579-581.
13. Крылов В.А., Мосягин П.В., Крылов А.В. и др. Влияние света люминесцентных ламп на стабильность образцов, содержащих полициклические ароматические углеводороды // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2010. №. 4. С. 79-85.

14. Максимова О.А., Горяинов С.В., Самохина К.Е. Определение содержания бенз(а)пирена в почвах ЮАО г. Москвы // *Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2014. №. 1. С. 56-63.
15. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С. и др. Влияние гранулометрического состава на поглощение меди, свинца и цинка черноземными почвами Ростовской области // *Почвоведение*. 2011. №. 11. С. 1304-1311.
16. Опекунов А.Ю., Митрофанова Е.С., Санни С. и др. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях рек и каналов Санкт-Петербурга // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Науки о Земле*. 2015. №. 4. С. 98-109.
17. ПНД Ф 16.1:2.2:3.39-03 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли бенз(а)пирена в пробах почв, грунтов, твердых отходов, донных отложений методом высокоэффективной, жидкостной хроматографии с использованием жидкостного хроматографа "Люмахром" / Министерство природных ресурсов РФ. М., 2007.
18. РД 52.10. 556-95. Методические указания. Определение загрязняющих веществ в пробах морских донных отложений и взвеси. Росгидромет, Государственный океанографический институт, 1996, 57 с.
19. Стадник М.Е. Негативное воздействие компонентов транспортной системы на состояние окружающей среды // *Научный диалог*. 2013. №.12 (24). С. 38-47.
20. Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Манджиева С.С. и др. Мониторинг содержания бенз(а)пирена в почвах под влиянием многолетнего техногенного загрязнения // *Почвоведение*. 2017. №. 1. С. 105-116. doi: [10.7868/S0032180X17010142](https://doi.org/10.7868/S0032180X17010142)
21. Чуков С.Н., Лодыгин Е.Д., Габов Д.Н., Безносиков В.А. Полициклические ароматические углеводороды в почвах Санкт-Петербурга // *Вестник СПбГУ*. 2006. Серия 3. №.1. С. 119-129.
22. Яковлева Е.В., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Габов Д.Н., Василевич М.И. Биоаккумуляция полициклических ароматических углеводородов в системе почва-растение // *Агрохимия*. 2008. №. 9. С. 66-74.
23. Янышева Н.Я., Черниченко И.А., Баленко Н.В. и др. Онкогигиенические аспекты регламентирования бенз(а)пирена в продуктах питания // *Гигиена и санитария*. 2001. №. 2. С. 67-70.
24. Alomirah H., Al-Zenki S., Husain A. et al. Benzo[a]pyrene and total polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) levels in vegetable oils and fats do not reflect the occurrence of the eight genotoxic PAHs // *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*. 2010. Vol. 27. No 6. p. 869-878. doi: [10.1080/19440040903493793](https://doi.org/10.1080/19440040903493793)
25. Callén M.S., López J.M., Iturmendi A., Mastral A.M. Nature and sources of particle associated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the atmospheric environment of an urban area // *Environmental Pollution*. 2013. Vol. 183. P.166-174. doi: [10.1016/j.envpol.2012.11.009](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.009)
26. Castano-Vinyals G., D'Errico A., Kogevinas M. Biomarkers of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons from environmental air pollution // *Occupational and Environmental Medicine*. 2004. Vol.61. No4. e12. doi: [10.1136/oem.2003.008375](https://doi.org/10.1136/oem.2003.008375)
27. Chen Y., Zhang F., Zhang J. et al. Accumulation characteristics and potential risk of PAHs in vegetable system grow in home garden under straw burning condition in Jilin, Northeast China // *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018. Vol. 162. P. 647-654. doi: [10.1016/j.ecoenv.2018.06.082](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.082)
28. Lu Z., Zeng F., Xue N., Li F. Occurrence and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in organo-mineral particles of alluvial sandy soil profiles at a petroleum-contaminated site // *Science of the Total Environment*. 2012. Vol. 433. P. 50-57. doi: [10.1016/j.scitotenv.2012.06.036](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.036)
29. Pereira T.S., Beltrami L.S., Rocha J.A. et al. Toxicogenetic monitoring in urban cities exposed to different airborne contaminants // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2013. Vol.90. p.174-182. doi: [10.1016/j.ecoenv.2012.12.029](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.12.029)
30. Singh D.P., Gadi R., Mandal T.K. et al. Emissions estimates of PAH from biomass fuels used in rural sector of Indo-Gangetic Plains of India // *Atmospheric Environment*. 2013. Vol.68. p.120-126. doi: [10.1016/j.atmosenv.2012.11.042](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.042)
31. Sushkova S., Deryabkina I., Antonenko E. et al/ Benzo[a]pyrene degradation and bioaccumulation in soil-plant system under artificial contamination // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol.633. P. 1386-1391. doi: [10.1016/j.scitotenv.2018.03.287](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.287)
32. Witter A.E., Nguyen M.H., Baidar S., Sak P.B. Coal-tar-based sealcoated pavement: a major PAH source to urban stream sediments // *Environmental pollution*. 2014. Vol. 185. P. 59–68. doi: [10.1016/j.envpol.2013.10.015](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.015)
33. Yam R.C.M., Leung W.H. Emissions trading in Hong Kong and the Pearl River Delta region—A modeling approach to trade decisions in Hong Kong's electricity industry // *Environmental Science & Policy*. 2013. Vol.31. P.1-12. doi: [10.1016/j.envsci.2013.03.010](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.03.010)
34. Zelinkova Z., Wenzl T. EU marker polycyclic aromatic hydrocarbons in food supplements: analytical approach and occurrence // *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2015. Vol.32. №.11. P. 1914-1926. doi: [10.1080/19440049.2015.1087059](https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1087059)

Поступила в редакцию 19.10.2018

принята 01.04.2019

опубликована 06.04.2019

Сведения об авторах:

Попилешко Яна Александровна – аспирант кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Ивановского Д.И. при Южном Федеральном университете (г.Ростов-на-Дону, Россия); jana.bysin@yandex.ru

Сушкова Светлана Николаевна – к.б.н., с.н.с. кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Ивановского Д.И. при Южном Федеральном университете (г.Ростов-на-Дону, Россия); snsushkova@sfedu.ru

Минкина Татьяна Михайловна – профессор, д.б.н., заведующий кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Ивановского Д.И. при Южном Федеральном университете (г.Ростов-на-Дону, Россия); minkina@sfedu.ru

Антоненко Елена Михайловна – к.т.н., с.н.с. кафедры почвоведения и земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Ивановского Д.И. при Южном Федеральном университете (г.Ростов-на-Дону, Россия); emantonenko@sfedu.ru

Дудникова Тамара Сергеевна – бакалавр 4-го курса, кафедры почвоведения и земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Ивановского Д.И. при Южном Федеральном университете (г.Ростов-на-Дону, Россия)

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

BENZO[A]PYRENE ACCUMULATION AND TRANSFORMATION IN HAPLIC CHERNOZEM UNDER ARTIFICIAL POLLUTION

© 2019 Ya.A. Popileshko , S.N. Sushkova , T.M. Minkina , E.M. Antonenko , T.S. Dudnikova

Address: Southern Federal University, Avenue Stachki 194/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

E-mail: jana.bysin@yandex.ru

The aim of the study. *The aim of the study was to evaluate the benzo[a]pyrene (BaP) accumulation and transformation rate and pathways in soil under the model experiment conditions with artificial pollution.*

Location of the study. *The work was carried out in the Academy of Biology and Biotechnology, Department of Soil Science and Land Resources Assessment, Southern Federal University (Rostov-on-Don), and in the Botanical Garden, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia).*

Methodology. *Extraction of BaP from the soil was carried out by the saponification method. The qualitative and quantitative determination of BaP and other polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) was performed by High Performance Liquid Chromatography with fluorescence detection.*

Main results. *The study showed that BaP accumulation in Haplic Chernozem depended on the rate of pollutant addition. The first year of the experiment showed 11-40% decrease in the soil BaP concentration, and two years later soil BaP concentration was found to decrease down to 15-44% from the initial soil BaP content. The relative soil BaP concentration decrease was found to increase with increasing rate of xenobiotic addition, and to decrease in the second year of the experiment. The increased rate of BaP addition into the soil of the model experiment led to the increase in other high molecular mass polyarenes, which indicated a fairly rapid BaP transformation in the Haplic Chernozem. The soil PAHs content in the first year of the model experiment could be ranked as: pyrene > chrysene > fluoranthene > phenanthrene, with their bulked content exceeding 20% of the total soil PAHs content. In the second year of the experiment, a different rank pattern was observed in priority PAHs: pyrene > chrysene > phenanthrene > fluoranthene, with their bulked content exceeding 20% of the total soil PAH content.*

Conclusion. *The content of all PAHs, mostly of high molecular mass polyarenes, in the artificially polluted soil of the model experiment, increased with the increased rate of pollutant application, indicating a rather high degree of xenobiotics accumulation by Haplic Chernozem. The PAHs accumulation and transformation in soil under artificial pollution showed the degradation of polycyclic PAHs into polyarenes with less number of rings (2–4 rings). During the two years of the model experiment, the concentration of BaP in the soil decreased up to 9–44%, indicating high potential of chernozemic soils for benzpyrene decomposition.*

Key words: *accumulation; benzo[a]pyrene; pollution; transformation; model experience*

How to cite: *Popileshko Ya.A., Sushkova S.N., Minkina T.M., Antonenko E.M., Dudnikova T.S. Benzo[a]pyrene accumulation and transformation in Haplic Chernozem under artificial pollution // The Journal of Soils and Environment. 2019. 2(1). e32. doi: [10.31251/pos.v2i1.32](https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.32) (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

1. Abakumov E.V., Lodygin E.D., Gabov D.A., Krylenkov V.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons content in Antarctica soils as exemplified by the Russian polar stations, *Hygiene and Sanitation*, 2014, No1, p. 30-35. (in Russian)
2. Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Gabov D.N. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil-plant system, *Bulletin of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2008, No 9, p. 2-8. (in Russian)
3. Belinskaya E.A., Zykova G.V., Semenov S.Yu., Finakov G.G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils of Moscow, *Eurasian Soil Science*, 2015, No 6, p. 578-583. doi: [10.1134/S1064229315060034](https://doi.org/10.1134/S1064229315060034)
4. Bryanskaya A.V., Uvarova Yu.E., Slynko N.M. et al. Theoretical and practical issues of biological oxidation of hydrocarbons by microorganisms, *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2015, Vol 18, No 4/2, p. 999-1002. (in Russian)
5. Vinokurov I.Yu., Karlovich I.A., Okorkov V.V. et al. Anthropogenic impact on agricultural landscapes in Vladimir Opolye and assessment of contaminated local catchments rivers Kamenka-Mzhara, *Vladimirskii zemledelets*, 2012, No 3, p. 21-25. (in Russian)
6. Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M., Yakovleva E.V. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils of technogenic landscapes, *Geochemistry International*, 2010, No 6, p. 569-579.
7. Gennadiev A.N., Tsibart A.S. Pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of reserved and anthropogenically modified areas: Factors and features of accumulation, *Eurasian Soil Science*, 2013, No 1, p. 28-36. doi: [10.1134/S106422931301002X](https://doi.org/10.1134/S106422931301002X)
8. *Maximum Permissible Concentrations (MACs) of Chemicals in Soil: Hygienic Standards*. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2006. 15 p. (in Russian)
9. GOST 17.4.4.02-2017. *Nature Conservation (MTS). Soils. Methods of sampling and sample preparation for chemical, bacteriological, helminthological analysis*. Moscow: Standardinform Pubs., 2018. 10 p. (in Russian)
10. Zhidkin, A.P., Gennadiev, A.N., Koshovskii T.S. Input and behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in arable, fallow, and forest soils of the taiga zone (Tver oblast), *Eurasian Soil Science*, 2017, No. 3, p. 296-304. doi: [10.1134/S1064229317030139](https://doi.org/10.1134/S1064229317030139)
11. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. *Geochemistry of landscapes of Eastern Moscow*. Moscow, APR Moscow, 2016, 276 p. (in Russian)
12. Kireeva N.A., Novoselova E.I., Erokhina N.I., Grigoriadi A.S. Accumulation of benzo (a) pyrene in the system "Soil - Plant" with oil pollution and the introduction of active sludge, *Bulletin of Orenburg State University*, 2009, No. 6, p. 579-581. (in Russian)
13. Krylov V.A., Mosyagin P.V., Krylov A.V. et al. Influence of luminescent lamps light on stability of polycyclic aromatic hydrocarbons samples, *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*, 2010, No 4(1), p. 79-85. (in Russian)
14. Maksimova O.A., Goryainov S.V., Samokhina K.E. Determination of benzopyrene in soils of Moscow, *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2014, No 1, p. 56-63. (in Russian)
15. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Sushkova S.N. et al. Effect of the particle-size distribution on the adsorption of copper, lead, and zinc by Chernozemic soils of Rostov oblast, *Eurasian Soil Science*, 2011, No11, p.1193-1200. doi: [10.1134/S1064229311110044](https://doi.org/10.1134/S1064229311110044)
16. Opekunov A.Yu., Mitrofanova E.S., Sunny S. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the bottom sediments of rivers and canals of Saint Petersburg, *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*, 2015, No4, p. 98-109. (in Russian)
17. PND F 16.1: 2: 2.2: 3.39-03. Quantitative chemical analysis of soils. Methods for measuring the mass fraction of benz (a) pyrene in soil, soil, solid waste, sediment samples by high performance liquid chromatography using a Ljumakhrom liquid chromatograph / Ministry of Natural Resources of the Russian Federation. Moscow, 2007. (in Russian)
18. RD 52.10. 556-95. *Methodical instructions. Determination of pollutants in samples of marine bottom sediments and suspensions*. Roshydromet, State Oceanographic Institute, 1995, 57 p. (in Russian)
19. Stadnik M.E. Transport System Components Negative Effect on State of Environment, *Nauchnyy dialog*, 2013, No12(24), p. 38-47. (in Russian)
20. Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S. et al. Dynamics of benzo[a]pyrene accumulation in soils under the influence of aerotechnogenic emissions, *Eurasian Soil Science*, 2017, No.1, p. 95-105. doi: [10.1134/S1064229317010148](https://doi.org/10.1134/S1064229317010148)
21. Chukov S.N., Lodygin E.D., Gabov D.N., Beznosikov V.A. Polycyclic aromatic carbonhydrates in the soil of St. Petersburg, *Biological Communications*, 2006, No1, pp. 119-128. (in Russian)
22. Yakovleva E.V., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. et al. Bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil-plant system, *Agrochimia*, 2008, No 9, p. 66-74. (in Russian)
23. Yanysheva N.Ya., Chernichenko I.A., Balenko N.V. et al. Oncology and hygiene aspects of the regulation of benzo (a) pyrene in food, *Hygiene and sanitation*, 2001, No.2, p. 67-70. (in Russian)
24. Alomirah H., Al-Zenki S., Husain A. et al. Benzo [a] pyrene and total polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), do not reflect the occurrence of the eight genotoxic PAHs, *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 2010, Vol. 27, No 6, p. 869-878. doi: [10.1080/19440040903493793](https://doi.org/10.1080/19440040903493793)

25. Callén M.S., López J.M., Iturmendi A., Mastral A.M. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the urban area, *Environmental Pollution*, 2013, Vol.183, p.166-174. doi: [10.1016/j.envpol.2012.11.009](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.009)
26. Castano-Vinyals G., D'Errico A., Kogevinas M. Biomarkers of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons from environmental air pollution, *Occupational and Environmental Medicine*, 2004, Vol.61, No4, e12. doi: [10.1136/oem.2003.008375](https://doi.org/10.1136/oem.2003.008375)
27. Chen Y., Zhang F., Zhang J. et al. Accumulation characteristics and potential risk of PAHs in vegetable system grow in home garden under straw burning condition in Jilin, Northeast China, *Ecotoxicology and environmental safety*, 2018, Vol. 162, p. 647-654. doi: [10.1016/j.ecoenv.2018.06.082](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.082)
28. Lu Z., Zeng F., Xue N., Li F. Occurrence and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in organo-mineral particles of alluvial sandy soil profiles at a petroleum-contaminated site, *Science of the Total Environment*, 2012, Vol. 433, p. 50-57. doi: [10.1016/j.scitotenv.2012.06.036](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.036)
29. Pereira T.S., Beltrami L.S., Rocha J.A. et al. Toxicogenetic monitoring in urban cities exposed to different airborne contaminants, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, Vol.90, p.174-182. doi: [10.1016/j.ecoenv.2012.12.029](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.12.029)
30. Singh D.P., Gadi R., Mandal T.K. et al. Emissions estimates of PAH from biomass fuels used in rural sector of Indo-Gangetic Plains of India, *Atmospheric Environment*, 2013, Vol.68, p.120-126. doi: [10.1016/j.atmosenv.2012.11.042](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.042)
31. Sushkova S., Deryabkina I., Antonenko E. et al. Benzo[a]pyrene degradation and bioaccumulation in soil-plant system under artificial contamination, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 633, p. 1386-1391. doi: [10.1016/j.scitotenv.2018.03.287](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.287)
32. Witter A.E., Nguyen M.H., Baidar S., Sak P.B. Coal-tar-based sealcoated pavement: a major PAH source to urban stream sediments, *Environmental pollution*, 2014, Vol. 185, p. 59-68. doi: [10.1016/j.envpol.2013.10.015](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.015)
33. Yam R.C.M., Leung W.H. Emissions trading in Hong Kong and the Pearl River Delta region—A modeling approach to trade decisions in Hong Kong's electricity industry, *Environmental Science & Policy*, 2013, Vol.31, p.1-12. doi: [10.1016/j.envsci.2013.03.010](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.03.010)
34. Zelinkova Z., Wenzl T. EU marker polycyclic aromatic hydrocarbons in food supplements: analytical approach and occurrence, *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2015, Vol.32, No11, p. 1914-1926. doi: [10.1080/19440049.2015.1087059](https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1087059)

Received 19 November 2018

Accepted 04 April 2019

Published 06 April 2019

About the authors:

Popileshko Yana A. – Graduate Student, Department of Soil Science and Land Resources Assessment, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia); jana.bysin@yandex.ru

Minkina Tatiana M. –Professor, Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia); minkina@sfedu.ru

Sushkova Svetlana N.– Senior Researcher, Ph.D., Department of Soil Science and Land Resources Assessment, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia); snsushkova@sfedu.ru

Antonenko Elena M.– Senior Scientist, Candidate of Technical Sciences, Department of Soil Science and Land Resources, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia); emantonenko@sfedu.ru

Dudnikova Tamara S. –Bachelor Student, Department of Soil Science and Land Resources Assessment, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)

The authors read and approved the final manuscript



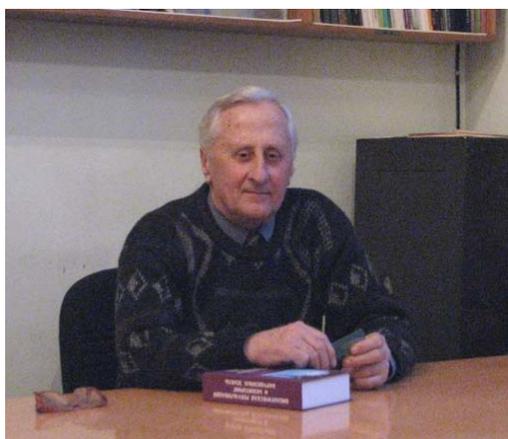
The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**К 80-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА ВЛАДИМИРА МИХАЙЛОВИЧА КУРАЧЕВА**© 2019 В.С. Артамонова , В.А. Андроханов *Адрес: Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: artamonova@issa-siberia.ru*

В статье приведены основные сведения о жизненном пути сибирского почвовед, доктора биологических наук, профессора Владимира Михайловича Курачёва - учёного, посвятившего свою научную деятельность изучению геохимии почв содового засоления и эволюции почвенно-поглощающего комплекса в техногенных ландшафтах Сибири.

Ключевые слова: Курачев Владимир Михайлович; почвовед, 80-летие, биография

Цитирование: Артамонова В.С., Андроханов В.А. К 80-летию профессора Владимира Михайловича Курачева // Почвы и окружающая среда. 2018. Том 2. № 1. с59. doi: [10.31251/pos.v2i1.59](https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.59)



13 марта 2019 года исполняется 80 лет Владимиру Михайловичу Курачёву, профессору, доктору биологических наук. Курачёв В.М. – известный в нашей стране и за рубежом почвовед, научный путь которого неразрывно связан с Институтом почвоведения и агрохимии СО РАН (ранее ИПА СО АН СССР). Многие годы он посвятил развитию геохимического направления почвоведения, внёс большой вклад в расшифровку фундаментальных и прикладных аспектов содового засоления, орошения и рекультивации почв.

В.М. Курачёв родился в 1939 г. в посёлке Батурино Асинского района Томской области, в семье рабочих Батуриной судовой верфи. В 1957 г. В.М. Курачёв окончил среднюю школу, затем работал помощником машиниста паровоза на железной дороге местного леспромхоза (п. Батурино). В 1959 г. поступил на биолого-почвенный факультет Томского государственного университета, который окончил в 1965 г. по специальности «почвоведение и агрохимия». Затем по распределению прибыл на работу в Новосибирскую землеустроительную экспедицию Сибирского филиала института Росгипрозем, где работал сначала инженером-почвоведом, а вскоре стал начальником почвенной партии.

В октябре 1968 г. В.М. Курачёв поступил в очную аспирантуру ИПА СО АН СССР по специальности «почвоведение». Тема его диссертационной работы – «Миграция воднорастворимых веществ засоленных почв Центральной Барабы». Научным руководителем аспиранта был утверждён д.с.-х. наук, проф. Р.В. Ковалёв.

Научные исследования Владимира Михайловича выполнялись в то время в соответствии с Международной биологической программой по проблеме «Биологическая продуктивность и факторы её обуславливающие». Объектом наблюдений послужила система геохимически сопряжённых ландшафтов – катена. Совместно с проф. Н.И. Базилевич, Т.Н. Рябовой, Ж.А. Рупасовой, В.М. Курачёв изучал почвенные процессы и режимы в пределах засоленной территории Барабинской низменности.

После окончания аспирантуры в 1971 г. В.М. Курачёв был избран на должность младшего научного сотрудника лаборатории генезиса и географии почв. Выполненная им диссертационная работа была успешно защищена, и В.М. Курачёву была присвоена ученая степень кандидата биологических наук. В работе были представлены результаты изучения водно-миграционных процессов в почвах геохимически сопряжённых ландшафтов Центральной Барабы, отражены особенности формирования основных почвенных свойств и режимов, продемонстрирована связь последних с биологической продуктивностью почв. Впервые им были получены сведения о солевом режиме почв, формировании плёночно-капиллярных растворов.

Дальнейшая научная работа В.М. Курачёва посвящена географии почв и геохимии ландшафтов в лесостепной и степной зонах Западной Сибири. Материалы полевых и стационарных исследований он публикует в отечественных и зарубежных изданиях, активно выступает с докладами на общесоюзных и региональных симпозиумах и совещаниях. В 1975 г. Владимира Михайловича избирают по конкурсу на должность старшего научного сотрудника. Основная деятельность в этот период сосредотачивается на изучении минеральной основы почвенно-поглощающего комплекса (ППК).

В начале 1980-х гг. Владимир Михайлович активно участвует в исследованиях лаборатории по двум разделам: «Исследование почвенно-геохимической обстановки почвообразования, её влияния на структуру, состав и свойства минеральной основы ППК» и «Исследование влияния орошения на поведение ППК чернозёмов Искитимского совхоза (Новосибирская область)». Одновременно участвует в составлении общей классификации почв Западной Сибири, с учётом специфики провинциального почвообразования на почвенно-генетическом уровне, в подготовке материалов для коллективной монографии по генезису, эволюции и географии западносибирских почв.

В 1984 г. В.М.Курачёву присвоено учёное звание старшего научного сотрудника по специальности «почвоведение».

В 1988 г. Владимир Михайлович защитил докторскую диссертацию «Структура и состав и свойства минеральной основы ППК», и в 1989 г. ему присуждена учёная степень доктора биологических наук. Материалы диссертации легли в основу одноимённой монографии, опубликованной в 1991 г. В ней представлена сложная структура почвенного ила, её зависимость от элементарных почвенных процессов и параметров, характеризующих геохимическую обстановку почвообразования, показаны особенности внутрипочвенных миграционных процессов и значение селективности различных фракций ила, продемонстрирована высокая устойчивость кристаллохимического строения наиболее распространённых в почвенном иле трехслойных глинистых минералов. Акцентировано внимание на влиянии на почвообразование изменений реакции среды, окислительно-восстановительного потенциала.

В 1989 г. В.М. Курачёв заменил на должности заведующего лабораторией рекультивации почв безвременно ушедшего проф. С.С. Трофимова и успешно руководил коллективом лаборатории до февраля 2010 г., развивая заложенные С.С. Трофимовым идеи и реализуя собственные новые. Большое внимание он уделял биологической рекультивации техногенных ландшафтов. Им создана почвенно-экологическая диагностика техногенных ландшафтов, разработана эколого-генетическая классификация почв на базе современной субстантивной концепции, позволяющая осуществлять картографические работы и проводить исследования в рамках почвенного мониторинга. На основе предложенной Владимиром Михайловичем классификации была проведена инвентаризация почвенного покрова всех техногенных ландшафтов Кузбасса, сформированных при открытой разработке каменноугольных месторождений.

Под руководством В.М. Курачёва было продолжено изучение генезиса и эволюции вновь образуемых почв в техногенных ландшафтах; осуществлена оценка их современного почвенно-экологического состояния; начата разработка методики оценки хозяйственной и экологической результативности приёмов рекультивации, без чего невозможен объективный выбор технологии рекультивации на этапе проектирования восстановительных работ.

Большую ценность представляет концепция В.М. Курачёва оптимизации почвоулучшения в корнеобитаемом слое растений в условиях техногенных ландшафтов. Его теоретические подходы были положены в основу использования местных ресурсов почвообразования, таких как потенциально плодородные суглинки, осадки сточных вод, сапрпели, торф и другие. В зарубежной практике они называются альтернативными субстратами для рекультивации и представляют интерес из-за выгоды их использования при дефиците плодородного слоя почв и низкого риска причинения вреда окружающей среде.

Владимир Михайлович акцентировал внимание на поиске новых технологий рекультивации, которые позволяют получать наиболее значимый экологический эффект, выражающийся в ускоренном восстановлении утраченных почвами функций, определяющих их физические, тепловые, водные и другие режимы.

Существенным прикладным элементом таких технологий он считал:

1) отказ от применения минеральных удобрений в их традиционном виде как фактора повышения плодородия субстратов;

2) использование стимуляторов процессов биогенной и абиогенной природы, позволяющих решить проблему минерального питания растений и обеспечить увеличение объёма субстрата, охваченного корневыми системами;

3) использование специальных приёмов формирования необходимых физических и гидротермических и других режимов в рекультивируемых почвах.

По мнению Владимира Михайловича, принципиальной особенностью таких технологий рекультивации земель должна быть адаптированность к местным, специфическим сибирским условиям климатической обстановки. Такие технологии позволят осуществлять в будущем эффективную рекультивацию нарушенных земель с породами, отличающимися широким спектром свойств, состава, степени токсичности.

В 1990-е гг. В.М. Курачёву удалось реализовать свои научные разработки в совместных с проектным институтом «Сибгипрошахт» работах по составлению технико-экономического обоснования рекультивации нарушенных земель на закрывающихся шахтах Кузбасса (Суртаиха, Карагайлинская, Черкасовская, Северный Маганак, имени Вахрушева). Для всех перечисленных выше объектов впервые использованы приёмы многовариантных решений и количественная оценка эффективности каждого варианта.

Следует отметить роль В.М. Курачёва в сохранении в трудные 1990-е гг. созданного еще в 1968 г. Атамановского стационара Института (Новокузнецкий район Кемеровской области). Стационар существует и поныне и продолжает функционировать в соответствии с направлением исследований «Биологическая рекультивация и почвообразовательный процесс на техногенных формах рельефа».

В 2006 г. В.М. Курачёву присвоено учёное звание профессора по специальности «почвоведение».

По результатам исследований В.М. Курачёва опубликовано более 100 печатных работ, как отечественных, так и зарубежных. Ему принадлежит одна авторская монография и около 10 коллективных. Среди наиболее востребованных в настоящее время монографий следующие:

Курачёв В.М., Рябова Т.Н. Засолённые почвы Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1981. 152 с.

Гаджиев В.М., Курачёв В.М., Шоба В.Н. и др. Генезис, эволюция и география почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб.отд-ние, 1988. 224 с.

Курачёв В.М. Минеральная основа почвенного поглощающего комплекса. Новосибирск: Наука, 1991. 226 с.

Гаджиев В.М., Курачёв В.А., Рагим-заде Ф.К. и др. Экология и рекультивация техногенных ландшафтов. Новосибирск: Наука. Сиб.отд-ние, 1992. 305 с.

Гаджиев В.М., Курачёв В.А., Андроханов В.А. Стратегия и перспективы решения проблем рекультивации нарушенных земель. Новосибирск: ЦЭРИС, 2001. 37 с.

Андроханов В.А., Курачёв В.М. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 224 с.

Многие годы Владимир Михайлович занимался подготовкой квалифицированных кадров для академической и вузовской науки, был постоянным членом диссертационного совета при ИПА СО РАН, членом советов в Новосибирском государственном аграрном университете и Алтайском государственном аграрном университете в Барнауле.

В.М. Курачёв имеет три свидетельства РФ на полезную модель, а также три свидетельства по внедрению. Он является соавтором «Почвенной карты РФ» (1988), карты «Охрана природы Новосибирской области» (1992).

В.М. Курачёв был оппонентом многочисленных диссертационных работ. Их список чрезвычайно солидный, и многие авторы этих научных трудов в настоящее время являются ведущими учёными нашей страны (В.Г. Мордкович, А.А. Танасиенко, А.В. Пузанов, А.П. Чевычелов и др.).

В.М. Курачёв в силу своего высокого профессионализма всегда был желанным ответственным редактором и рецензентом монографий. Его работы в этом качестве исчисляются многими десятками.

За успехи в работе Владимир Михайлович награждён Почётной грамотой АН СССР в связи с 250-летием АН СССР (1974), Знаком «Победитель социалистического соревнования АН СССР и ЦК Профсоюза» (1976); Медалью участника ВДНХ СССР (1977); Памятной медалью Президиума

Центрального Совета Всесоюзного общества почвоведов АН СССР, посвящённой 100-летию выхода книги «Русский чернозём» (1983); Почетным Знаком «Заслуженный ветеран СО РАН» (1990); Почётной грамотой Президиума СО АН СССР (1980); Дипломом 1-й степени Президиума СО АН СССР за работу «Земельные ресурсы Западной Сибири» (1990); Почётной грамотой РАН (1999).

Владимир Михайлович – прекрасный собеседник и рассказчик. Многие годы он проводил отпуск вместе со своей женой Антониной Алексеевной на Салаире в окружении дикой природы, рядом с горными речками, где раньше добывали золото. Именно там несколько столетий тому назад на одном из склонов англичане проложили дорогу из брусчатки (сохранившуюся местами до сих пор) и дражным способом намывали ценный металл. Владимир Михайлович знал последних жителей этого удивительного края, ныне уже безлюдного. Его воспоминания чрезвычайно интересны, очень значимы для истории Новосибирской области и для потомков.

В 2010 г. Владимир Михайлович ушел на заслуженный отдых, но в научной жизни авторов данной статьи, жизни лаборатории, Института и в отечественном почвоведении Владимир Михайлович продолжает занимать особое место. Желаем ему здоровья, долголетия и сил.

ЛИТЕРАТУРА

Артамонова В.С., Андрокханов В.А. *Фундаментальные исследования почвообразования в техногенных ландшафтах Кузбасса: прошлое, настоящее, будущее (к юбилею ИПА СО РАН)*. Новосибирск, 2013. 74 с.

Поступила в редакцию 25.02.2019

Принята 04.04.2019

Опубликована 06.04.2019

Сведения об авторах:

Артамонова Валентина Сергеевна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории рекультивации Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия), artamonova@issa-siberia.ru

Андрокханов Владимир Алексеевич – доктор биологических наук, заместитель директора по науке Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); androkhanov@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

PROFESSOR V.M. KURACHEV CELEBRATES 80TH ANNIVERSARY

© 2019 V.S. Artamonova,  V.A. Androkhonov 

Address: Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: artamonova@issa-siberia.ru

The article presents the basic biographic information about the prominent Siberian soil scientist, Doctor of Biological Sciences, Professor Vladimir Mikhailovich Kurachev, who devoted his research to studying soil geochemistry in saline soils and the evolution of soil absorption complex in technogenic ecosystems of Siberia.

Key words: Kurachev V. M.; soil scientist; 80 years; biography

How to cite: Artamonova V.S., Androkhonov V.A. Professor V.M. Kurachev celebrates his 80th anniversary // *The Journal of Soils and Environment*. 2019. 2(1). e57. doi: [10.31251/pos.v2i1.59](https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.59) (in Russian with an English abstract).

REFERENCES

Artamonova V.S., Androkhonov V.A. *Fundamental studies of soil formation in technogenic landscapes of Kuzbass: past, present, future (to the anniversary of IPA SB RAS)*. Novosibirsk, 2013. 74 p. (in Russian)

Received 25 February 2019

Accepted 04 April 2019

published 06 April 2019

About the authors:

Artamonova Valentina S. – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); artamonova@issa-siberia.ru

Androkhanov Vladimir A. – Doctor of Biological Sciences, Deputy Director of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); androhanov@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

90 ЛЕТ ПРОФЕССОРУ НАДЕЖДЕ НИКОЛАЕВНЕ НАПЛЁКОВОЙ© 2019 В.С. Артамонова 

Адрес: ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: artamonova@issa-siberia.ru

В статье приведены основные сведения о научном пути почвенного микробиолога, доктора биологических наук, профессора Надежды Николаевны Наплёковой, проработавшей в академической науке 25 лет и посвятившей свою деятельность почвенной микробиологии, изучению микроорганизмов целинных, окультуренных и техногенных почв Сибири и Горного Алтая.

Ключевые слова: Наплекова Надежда Николаевна; почвы; целлюлозоразрушающие микроорганизмы

Цитирование: Артамонова В.С. 90 лет профессору Надежде Николаевне Наплёковой // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. №1. е62. doi: [10.31251/pos.v2i1.62](https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.62)



20 января 2019 года исполнилось 90 лет Надежде Николаевне Наплёковой, заслуженному деятелю науки России, доктору биологических наук, профессору, действительному члену Российской академии аграрного образования и Международной академии аграрного образования, академику РАЕН – крупному советскому и российскому микробиологу. Её научный путь начинался в Биологическом институте СО АН СССР, затем продолжился в Институте почвоведения и агрохимии СО АН СССР (ныне ИПА СО РАН) в лаборатории микробиологии. Надежда Николаевна посвятила академической науке около 25 лет: активно развивала почвенную микробиологию, изучала микроорганизмы и их метаболическую активность в почвах Сибири и Горного Алтая. С 1981 года и поныне Н.Н. Наплёкова работает в вузовской науке, в направлении сельскохозяйственной микробиологии, формирует современные агрономические компетенции у студентов, разрабатывает различные технологии с применением эффективных микроорганизмов.

Надежда Николаевна Наплёкова родилась в 1929 году в селе Шереметьевка Лысогорского района Саратовской области. После окончания средней школы поступила в Саратовский государственный университет, который окончила в 1952 году по специальности «физиология растений», пройдя также подготовку по микробиологии и защитив диплом на тему «Остаточная микрофлора овощных консервов кабачковой икры». Первые три года трудовой деятельности Надежды Николаевны прошли в г.Новокузнецке Кемеровской области, где она вначале работала микробиологом на хлебопекарном комбинате, затем учителем биологии и химии, а также завучем в средней школе.

Увлеченная с первых университетских дней микробиологией, в 1955 году Надежда Николаевна поступила в аспирантуру при Биологическом институте Западно-Сибирского филиала АН СССР (г. Новосибирск) под руководством к.б.н. А.И. Сидоренко. С тех пор вся её жизнь посвящена науке. После окончания аспирантуры Надежда Николаевна продолжила работу в том же институте, который в 1958 году был передан в организованное в то время Сибирское отделение АН СССР. В 1959 г. Н.Н. Наплёкова была переведена с должности старшего лаборанта на должность младшего научного сотрудника, а в 1961 г. в Саратовском государственном университете она защитила диссертацию «Экология азотобактерий в чернозёмах Новосибирской области» и через год получила ученую степень кандидата биологических наук. Материалы её диссертации были основаны на полевых и лабораторных исследованиях, связанных с вопросами почвенной микробиологии и физиологии растений. Основное внимание было уделено азотобактеру, его отношению к низким температурам, влажности, взаимоотношению с актиномицетами, дикорастущими и культурными растениями. Также были изучены некоторые ферменты микроорганизмов, выделенные из почв Барабы, установлена связь между физиологической активностью микроорганизмов и активностью ферментов почвы.

В 1966 г. Президиум АН СССР (секция химико-технологических и биологических наук) присвоил к.б.н. Наплёковой Н.Н. учёное звание и выдал аттестат старшего научного сотрудника по специальности «микробиология».

В этот же год Президиум СО АН СССР постановил (2 декабря 1966):

1) организовать в 1967 г. Институт почвоведения и агрохимии на базе Отдела почвоведения Биологического института СО АН СССР;

2) считать основными направлениями научной деятельности института:

исследование генезиса сибирских и дальневосточных почв;

изучение земельного фонда; исследование биологических процессов в почвах; агрохимические проблемы в Сибири и на Дальнем Востоке;

разработку научных основ коренных мелиораций почв;

3) утвердить основные научные направления лабораторий и структуру Института.

Следует отметить, что это были шестидесятые годы, время первого десятилетия Новосибирского научного центра – трудное, но вместе с тем счастливое и интересное время бурного развития науки в Сибири. На долю сотрудников-«шестидесятников» выпал сложный и в то же время интересный период организации Института почвоведения и агрохимии в Сибирском отделении СО РАН (тогда СО АН СССР). Весьма примечательно, что совсем недавно ИПА СО РАН, единственный в огромной азиатской части нашей страны специализированный академический институт почвенного профиля, отметил своё 50-летие. Открытие Института в 1968 г. было поистине волнующим и незабываемым событием. И Надежда Николаевна много лет своей трудовой деятельности посвятила ИПА и внесла огромный вклад в его развитие. В числе пока что немногочисленных лабораторий во вновь организованном институте была и существующая с 1950-х гг. лаборатория микробиологии, которую с 1963 г. возглавляла к.б.н. Ия Леонидовна Клевенская. В состав лаборатории входила тогда и с.н.с. Н.Н. Наплёкова, одна из немногих сложившихся специалистов с ученой степенью во всём отделе почвоведения Биологического института. В ИПА СО РАН она входила в состав исполнителей одного из основных направлений исследований, а именно исследование биологических процессов в почвах, активно изучала бактерии, разрушающие целлюлозу в почвах Сибири, отличающихся своим температурным оптимумом и источниками азота. Уделяла большое внимание взаимосвязи интенсивности разложения различных растительных остатков с азотным и фосфорным режимами почв в разных географических зонах Сибири. Надежда Николаевна выявила ряд культур микро- и актиномицетов, растущих на клетчатке, способных к азотфиксации, а также пять новых видов микромицетов рода *Chaetomium*, обитающих в сибирских почвах. Ею проведена работа по выяснению влияния микроэлементов на процесс разложения целлюлозы и их биологическому закреплению. Показано неоднозначное влияние Mn, Mo, B, Cu на процесс разложения. Надежда Николаевна установила так же, что микроорганизмы, разрушающие целлюлозу, способны использовать фосфор из труднодоступных минеральных и органических фосфатов, обеспечивая себя фосфором, а другую часть этих фосфатов возвращая в окружающую среду. Ею получены оригинальные сведения по методике определения целлюлозолитической активности микроорганизмов и стимуляции зоогенной микробиоты почв.

Основные результаты многолетних исследований Надежда Николаевна опубликовала в авторской монографии «Аэробное разложение целлюлозы микроорганизмами в почвах Западной Сибири». Эти результаты в дальнейшем были использованы при написании докторской диссертации с одноимённым названием. В 1971 г. Н.Н. Наплёкова защитила докторскую диссертацию по специальности «почвоведение» на Объединённом учёном совете по биологическим наукам СО АН СССР в Новосибирске.

По результатам защиты в 1972 г. Решением Высшей Аттестационной комиссии Министерства высшего и среднего специального образования СССР Надежде Николаевне была присвоена учёная степень доктора биологических наук.

После защиты докторской диссертации Н.Н. Наплёкова изучала способность целлюлозоразрушающих микроорганизмов синтезировать биологически активные вещества (витамины группы В, аминокислоты, ауксины, гиббереллины), оказывающие влияние на растения. Особое внимание уделяла также влиянию пигментов и слизи микробов на структурообразование и гумусогенез почв.

Характерной особенностью научной деятельности Надежды Николаевны является её постоянное участие в комплексных научных темах и полевых экспедициях. Она много лет

работала с лабораторией географии и генезиса почв, биогеохимии почв, рекультивации почв и другими. Она – прекрасный комплексант, всегда бодрая и выдержанная, увлеченная научными идеями, в меру требовательная и неизменно справедливая и доброжелательная. Такой её помнят и знают все в ИПА СО РАН, кто с нею сотрудничал. А для молодежи, которую она любит, Надежда Николаевна – высокий научный стандарт.

Комплексными исследованиями было установлено, что вибрионы высвобождают больше свободных аминокислот, чем актино- и микромицеты. Впервые было выявлено влияние некоторых целлюлозоразрушающих микроорганизмов на клубеньковые бактерии, полученные из ВНИИСХ микробиологии, а также на симбиотические бактерии осоки и вейника высокогорий Чуйской степи Горного Алтая.

Следует сказать, что до сих пор большой интерес представляют её результаты о влиянии тяжёлых металлов и радиации на аэробные целлюлозолитики, а также о продуцировании биологически активных веществ. Особенно значимы сведения о пигментах, сходных по физико-химическим показателям с гуминовыми кислотами, а также о протекторном действии меланопигментов в условиях облучения вибрионов.

Результаты работы Надежда Николаевна неоднократно докладывала на совещаниях и конференциях разного уровня и активно публиковала как в отечестве, так и за рубежом. По результатам исследований только в ИПА СО СССР Н.Н. Наплёковой опубликовано около 150 работ, как отечественных, так и зарубежных. Ей принадлежит одна авторская монография, участие в 10 коллективных монографиях. Особенно следует выделить такие публикации:

Наплёкова Н.Н. Аэробное разложение целлюлозы микроорганизмами в почвах Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние., 1974.250 с.

Клевенская И.Л., Наплёкова Н.Н., Гантимурова Н.И. Микрофлора почв Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние., 1970.222 с.

Трофимов С.С., Наплёкова Н.Н., Кандрашин Е.Р. и др. Гумусообразование в техногенных ландшафтах. Новосибирск: Наука, 1986. 165 с.

Многие годы Надежда Николаевна занималась подготовкой квалифицированных кадров для академической и вузовской науки, была постоянным членом диссертационного совета при ИПА СО РАН, Новосибирского государственного аграрного университета и других.

Н.Н. Наплёкова была руководителем и официальным оппонентом многих кандидатских и докторских диссертаций. За годы работы в ИПА СО СССР Надежда Николаевна подготовила 10 аспирантов и соискателей, которые успешно защитили кандидатские диссертации.

Со свойственной ей пунктуальностью, тщательностью, прилежанием и неутомимостью Надежда Николаевна всегда выполняет не только научную работу, но и общественную. Многие годы была членом партбюро КПСС, возглавляла партийную организацию ИПА СССР, была Председателем народного контроля института, зам. председателя Новосибирского микробиологического общества, председателем комиссии по охране труда и быта женщин.

За успехи в научной работе Н.Н. Наплёкова награждена медалью «За освоение целинных и залежных земель», медалью «За доблестный труд в связи со 100-летием дня рождения В.И. Ленина», орденом «Знак почёта», знаком «Ударник 9-й пятилетки», Почётной грамотой Президиума СО АН СССР, Большой медалью Всесоюзного общества охраны природы.

В октябре 1981 г. Надежда Николаевна прошла конкурс на постоянную должность в Новосибирский сельскохозяйственный институт (ныне Новосибирский государственный аграрный университет, НГАУ), где затем возглавляла многие годы кафедру агроэкологии и микробиологии. В НГАУ она активно продолжает научную деятельность, постоянно работая в творческом союзе с сотрудниками ИПА СО РАН. Приглашает их на преподавательскую работу, направляет к ним студентов на практику. С участием Н.Н. Наплёковой были созданы микробные препараты «АгроОбь» и «БакСиб», которые неоднократно были востребованы и в академической науке. В настоящее время в ИПА СО РАН успешно работают её бывшие студенты, достигшие кандидатского уровня. Желаем Надежде Николаевне здоровья, долголетия, новых идей и новых статей.

Поступила в редакцию 28.02.2019

Принята 04.04.2019

Опубликована 06.04.2019

Сведения об авторе:

Артамонова Валентина Сергеевна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории рекультивации ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); artamonova@issa-siberia.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

PROFESSOR NAPLEKOVA N.N. CELEBRATES 90TH ANNIVERSARY

© 2019 V.S. Artamonova 

Address: Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: artamonova@issa-siberia.ru

The article presents the research biography of Nadezhda Nikolaevna Naplekova, Professor, Doctor of Biological Sciences, a prominent soil microbiologist, who had worked in academic science for 25 years, devotedly investigating microorganisms of virgin, agricultural and technogenic soils of Siberia and the Altai Mountains.

Key words: *Naplekova Nadezhda Nikolaevna; soils; cellulolytic microorganisms*

How to cite: *Artamonova V.S. Professor Naplekova N.N. celebrates her 90th anniversary // The Journal of Soil and Environment. 2019. 2(1). e62. doi:[10.31251/pos.v2i1.62](https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.62)*

Received 28 February 2019

Accepted 04 April 2019

Published 06 April 2019

About the author:

Artamonova Valentina S. – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Reclamation in Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); artamonova@issa-siberia.ru

The author read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)