

ПОЧВЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Научный журнал

2020

Том 3. Выпуск 4

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

Якименко Владимир Николаевич - доктор биологических наук, зав.лабораторией агрохимии 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

Соколов Денис Александрович - кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории рекультивации почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Члены редколлегии

Андроханов Владимир Алексеевич – доктор биологических наук, ВРИО директора ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Абакумов Евгений Васильевич - профессор РАН, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной экологии ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет

Бойко Василий Сергеевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заместитель директора по научной работе ФГБНУ Омский аграрный научный центр (Омск, Россия)

Будажанов Лубсан-Зонды Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, профессор, директор ФГБНУ Бурятский НИИ сельского хозяйства (Улан-Удэ, Россия)

Гамзиков Геннадий Павлович – академик РАН, доктор биологических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО Новосибирский государственный аграрный университет (Новосибирск, Россия)

Гольева Александра Амуриевна – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт географии РАН (Москва, Россия)

Дюкарев Анатолий Григорьевич – доктор географических наук, заведующий лабораторией мониторинга лесных экосистем ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Томск, Россия)

Кулижский Сергей Павлович – доктор биологических наук, профессор, проректор по социальным вопросам ФГБОУ ВО Национальный Исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)

Колесников Сергей Ильич - доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования ФГБОУ ВО Южный федеральный университет

Пузанов Александр Васильевич – доктор биологических наук, профессор, директор ФГБУН Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

Рожков Вячеслав Александрович – член-корреспондент РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Почвенный институт им.В.В. Докучаева (Москва, Россия)

Сиромля Татьяна Ивановна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Сысо Александр Иванович – доктор биологических наук, заместитель директора по науке ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Убугунов Леонид Лазаревич – доктор биологических наук, профессор, директор ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

Чевычелов Александр Павлович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией генезиса почв и радиоэкологии ФГБУН Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН (Якутск, Россия)

Танасиенко Анатолий Алексеевич – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенно-физических процессов ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Шарков Иван Николаевич – доктор биологических наук, доцент, руководитель Сибирского НИИ земледелия и химизации СФНЦА РАН

Шпедт Александр Артурович - доктор сельскохозяйственных наук, доцент, ВРИО директора ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН (Красноярск, Россия)

Якутин Михаил Владимирович – доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеоценологии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Содержание

Гаврилов Д.А., Нечаева Т.В., Наумова Н.Б., Якименко В.Н. e138
От редколлегии

Биология и биохимия почв

Нечаева Т.В., Смирнова Н.В., Худяев С.А., Любечанский И.И. e130
Изменение элементного химического состава опада березы повислой

Мордкович В.Г., Любечанский И.И. e131
Почвенные беспозвоночные Русского лесостепья
(обзор публикаций XX-XXI вв. и ревизия результатов)

Деградация и рекультивация почв

Беспалов А.Н., Беланов И.П. e132
Жуки-жужелицы (Coleoptera, Carabidae) как природный индикатор
процессов развития биоценоза золоотвалов твёрдотопливной
теплоэлектростанции на примере ТЭЦ № 5 (Новосибирск)

Гуркова Е.А., Андроханов, В.А., Лавриненко А.Т. e127
Ресурсы и специфика рекультивации отвалов угледобывающей
промышленности Хакасии

Юбилеи и памятные даты

Артамонова В.С. e134
Сто лет со дня рождения д.б.н. Ии Леонидовны Клевенской



ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

Уважаемые коллеги и друзья!

Предлагая Вашему вниманию очередной номер журнала, особо хотим отметить работу В.Г. Мордковича и И.И. Любечанского, посвященную почвенным беспозвоночным Русской лесостепи. Статья представляет собой обширный обзор публикаций XX-XXI вв. с анализом имеющихся результатов, подготовленный известными российскими специалистами по почвенной зоологии. Поскольку значительная часть рассматриваемых в ней данных опубликована в различных монографиях, из которых многие недоступны в электронном виде, то предлагаемая вашему вниманию статья, размещенная в открытом доступе на сайте нашего журнала, несомненно, будет очень полезна для всех, кто интересуется не только почвенными беспозвоночными как таковыми, но и историей отечественной почвенной биологии/зоологии. Заметим, что в России, как и в мире в целом, почвоведов становится все меньше и меньше (Baveye, 2020), в том числе и специалистов по почвенной зоологии, знакомых с классическими методами и их результатами, знающих изучаемых «зверушек в лицо». В этом контексте статья В.Г. Мордковича и И.И. Любечанского представляет особый интерес.

Несмотря на появление и развитие инновационных технологий, мировая, в том числе и российская энергетика наряду с электроэнергией и теплом ежегодно производит, к сожалению, миллионы тонн золошлаковых отходов. Основная масса этих отходов годами хранится в золоотвалах, площадь которых во всем мире будет только возрастать (Das et al., 2013; Usmani et al. 2019). В России, в частности, в настоящее время площадь золоотвалов превышает 20 тыс. гектаров (Шилов, Шилова, 2017). В этой связи актуальны и познавательны тематические статьи данного номера журнала: Е.А. Гурковой с соавторами о ресурсах и специфике рекультивации отвалов угледобывающей промышленности Хакасии (уголь является основным топливом на твердотопливных теплоэлектростанциях) и статья А.Н. Беспалова, И.П. Беланова о сообществах жуков-жужелиц, формирующихся в ходе спонтанного самовосстановления территории, занятой завершённым золоотвалом теплоэлектростанции. Жуки являются ключевой группой насекомых, вносящей значительный вклад в биоразнообразие на планете, играют важную роль в функционировании многих наземных экосистем, в том числе степных и лесостепных. В частности, жужелицы являются активными участниками деструкции растительного опада и хорошими индикаторами разного рода экосистемных сдвигов. Информации о составе и структуре сообществ жуков-жужелиц немного вообще, но еще меньше известно о формировании их сообществ в ходе первичной и вторичной сукцессии на спонтанно зарастающих отработанных золошлаковых отвалах.

Исследования циклов различных химических элементов, особенно, элементов-биофилов, в естественных и агрогенных экосистемах, несомненно, представляют повышенный интерес и имеют как экологическое, так и биогеохимическое значение. В западносибирской лесостепи береза повислая (*Betula pendula* Roth.) является основной лесобразующей породой, поэтому изучение изменения элементного химического состава ее опада важно для понимания роли последнего в процессах трансформации углерода и минеральных элементов в почве. Результаты серии лабораторных модельных опытов по изучению специфики разложения опада березы в условиях засоления и выщелачивания представлены в статье Т.В. Нечаевой с соавторами.

Продолжая рубрику юбилейных публикаций журнала, представляем краткий биографический очерк, посвященный столетию со дня рождения Ии Леонидовны Клевенской, доктора биологических наук, специалиста по почвенной микробиологии, занимавшейся, в частности, очень интересными исследованиями клубеньковых бактерий и процесса азотфиксации.

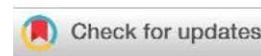
По традиции выражаем надежду, что представленный номер журнала «Почвы и окружающая среда» будет полезен читателям и заинтересует их настолько, что они и сами захотят внести свой вклад в публикационную деятельность нашего издания.

Редакция журнала

Д.А. Гаврилов, Н.Б. Наумова, Т.В. Нечаева, В.Н. Якименко

ЛИТЕРАТУРА

1. Шилов С.О., Шилова Е.А. Выбор возможного варианта расширения золоотвала на основании сметного расчета // *Синергия наук*. 2017. № 12. С. 821–827.
2. Baveye P. Bypass and hyperbole in soil research: A personal view on plausible causes and possible remedies // *Eur J. Soil Sci.* 2020. P.1–8. DOI: [10.1111/ejss.12940](https://doi.org/10.1111/ejss.12940)
3. Das M., Agarwal P., Singh R., Adholeya A. A study of abandoned ash ponds reclaimed through green cover development // *Int. J. Phytoremed.*, 2013, 15, P. 320-329. DOI: [10.1080/15226514.2012.702801](https://doi.org/10.1080/15226514.2012.702801)
4. Usmani Z., Kumar V., Pratishtha Gupta P., Gupta G., Rani R., Chandra A. Enhanced soil fertility, plant growth promotion and microbial enzymatic activities of vermicomposted flyash // *Sci. Rep.* 2019. Vol.9, 10455. DOI: [10.1038/s41598-019-46821-5](https://doi.org/10.1038/s41598-019-46821-5)



ПОЧВЕННЫЕ БЕСПОЗВОНОЧНЫЕ РУССКОГО ЛЕСОСТЕПЬЯ (ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ XX-XXI ВВ. И РЕВИЗИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ)

© 2021 В. Г. Мордкович, И. И. Любечанский 

Адрес: ФГБУН Институт систематики и экологии животных СО РАН, ул. Фрунзе, 11, г.Новосибирск, 630091, Россия. E-mail: lubech@gmail.com

В обзорной статье описываются основные этапы становления и развития почвенной зоологии – науки на стыке зоологии, экологии и почвоведения, примерно за столетие – с начала 1920-х гг. по настоящее время. Проведен анализ почвенно-зоологических работ, выполненных в лесостепной зоне, предметом которых служили фауна и население почвенных простейших, червей, моллюсков, микроартропод и более крупных членистоногих – мезофауны. Лесостепь была выбрана темой литературного обзора из-за своей хорошей изученности и потому, что большая часть работ по этой природной зоне опубликована на русском языке и мало известна за рубежом (что неудивительно, поскольку более 80 % территории лесостепи расположено в России). В обзор включены наиболее значимые работы по инвентаризации почвенной фауны, анализу ее экологической структуры и функциональной роли различных компонентов, изучению антропогенного влияния на животное население почв. Работы представлены по территориальному принципу: запад Европейской части СССР (России), Поволжье и Западная Сибирь. Показано высокое видовое богатство и оригинальность почвенной фауны лесостепья, ее высокая устойчивость к природным и антропогенным воздействиям. В конце приводятся перспективные направления исследований почвенной фауны в Русском лесостепье. Обзор включает около 170 литературных источников.

Ключевые слова: почвенная зоология; экология; история; фауна; структура сообщества; функциональная роль

Цитирование: Мордкович В.Г., Любечанский И.И. Почвенные беспозвоночные Русского лесостепья (обзор публикаций XX-XXI вв. и ревизия результатов) // Почвы и окружающая среда. 2020. Том 3. № 4. e131. doi: 10.31251/pos.v3i4.131

ВВЕДЕНИЕ

Выбор почвенных беспозвоночных объектом литературного обзора объясняется возникновением и становлением оригинального научного направления на стыке зоологии, экологии и почвоведения — почвенной зоологии. Ее основоположник в СССР и России М.С. Гиляров кроме фундаментальных трудов (Гиляров, 2012) оставил после себя разветвленную школу последователей, развивших традиционные и разработавших новые отрасли педозоологии. Этот опыт, рассредоточенный в десятках монографий, тысячах статей и докладов, нуждается в инвентаризации, критическом анализе и обобщении, чтобы в полном объеме представить контуры, структуру, потенции почвенной зоологии и оценить вклад отечественных специалистов в ее развитие.

Предлагаемый обзор публикаций – экспансия в указанном направлении на примере почвенно-зоологических исследований геобиома лесостепи. Его приоритет в качестве образца для освещения успехов отечественной педозоологии определяется, во-первых, тем, что лесостепь как самостоятельная ландшафтная зона и оригинальная макроэкосистема расположена почти целиком в пределах России (только 10 % – в Украине, 5 % – в Казахстане). Во-вторых, лесостепь, максимально удаленная от океанов и пустынь – триггеров климатических катаклизмов, обладает наиболее уравновешенным климатом и комфортными условиями обитания, а именно: а) сбалансированным соотношением количества осадков и испаряемости (около единицы); б) положительными среднегодовыми температурами; в) почвами, где, в отличие от всех остальных, гумификация органического вещества преобладает над его минерализацией, а в структуре биотического круговорота веществ, наряду с продукцией и деструкцией, важнейшую роль играет процесс депонирования биокосной субстанции в виде гумуса; г) сосуществование древо- и травостоев, альтернативных друг другу по ценотической структуре и условиям обитания. Эти особенности обуславливают формирование уникальных почв – черноземов, лугово-черноземных, черноземно-луговых – с содержанием гумуса до 10–14 % массы почвы (Биогеографическое и ландшафтное изучение..., 1972). В свою очередь, благоприятные свойства гумусового субстрата обеспечивают в лесостепи высокий уровень биоразнообразия (Алехин, 1940; Алейникова, 1964;

Арнольди, 1965; Мордкович, 2006, 2007). В-третьих, лесостепь, благодаря высочайшему плодородию почв, богатству сенокосов, огромной массе и численности педобионтов-гумификаторов, предоставляет людям идеальный набор экологических услуг, обеспечивающих средоточие в относительно неширокой полосе земли 70 % народонаселения России. Лесостепь всегда привлекала повышенное внимание педозоологов-классиков и современников.

Прогресс земледелия и оформление почвоведения в научную дисциплину о почве как самобытном природном теле и особой среде жизни (Докучаев, 1948) пробудили интерес к почвенной биоте. Первые же попытки биологов восполнить шокирующий пробел в системе зооразнообразия показали, что мир почвенных организмов настолько богат и своеобразен, что заслуживает статуса самостоятельной биоценотической категории, получившей название "эдафон". Первоначально к нему относили, главным образом, микроскопические организмы: водоросли, грибы, Protozoa и лишь некоторых Metazoa (энхитреид, нематод), не покидающих пределов почвы (France, 1921). Ограничение эдафона формами, образующими замкнутое сообщество, вызывало неприятие биоценологов и привело к "вымыванию" термина из педобиологического лексикона. Одним из первых усомнился в замкнутости почвенного зооценоза В.А. Догель (1924), разделив педобионтов на геобий – обитателей собственного почвенного яруса – и герпетобий, с имаго, активными на поверхности почвы, но периодически вторгающимися ниже и отряжающими в почву личинок, куколок, яйца. Позже Г. Френцель (Frenzel, 1936) разделил педобионтов на геобионтов – постоянных обитателей почвы (эдафон в смысле Р. Франце); геофилов, у которых в почве протекают лишь некоторые стадии онтогенеза; и геоксенов, временно использующих почву в качестве убежища. Затем К. Форслунд (Forsslund, 1943) сфокусировал внимание на том, что категории Френцеля адекватны не времени, проведенному в почве, а участию в процессах почвообразования. В наиболее обобщенном виде классификация почвенных беспозвоночных предстала в конце 1930-40-х гг. в работах М. С. Гилярова, который считал вычленение почвенного сообщества из общей экосистемы условностью, поскольку с почвой, так или иначе, связано 90 % сухопутных беспозвоночных (Гиляров, 2012). В результате термин "эдафон", зафиксированный в словарях и справочниках по экологии (Горышина и др., 1988; Реймерс, Яблоков, 1982; Реймерс, 1988; Быков, 1988), трактуется расширенно, как совокупность всех почвенных организмов – почвенный биоценоз. Применительно к животному компоненту употребляется термин "зооэдафон" (Мордкович и др., 2014). С подачи М.С. Гилярова (1944) важное значение для классификации зооэдафона имеет соотношение размеров особей и численности популяции. Исходя из этого, в составе зооэдафона различают категории размерности: нано-, микро- и мезофауну (Программа и методика..., 1966; Методы почвенно-зоологических исследований, 1975).

Рассматривая почву как трехфазную среду, с учетом морфо-физиологических адаптаций беспозвоночных к обитанию в каждой из фаз, М.С. Гиляров (1949, 1970) разделил педобионтов на обитателей твердой фазы, жителей пленочно-капиллярной почвенной влаги и население почвенных полостей, заполненных воздухом. Нашим обзором в той или иной степени охвачены все отмеченные категории зооэдафона.

1. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА И БИОГЕОГРАФИЧЕСКИЙ СТАТУС РУССКОГО ЛЕСОСТЕПЬЯ КАК СРЕДЫ ОБИТАНИЯ В СИСТЕМЕ ШИРОТНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ

Своеобразие лесостепи определяется в первую очередь мозаичным сочетанием в пространстве травяных и древесных экосистем, с альтернативной физиономией и характером биотического круговорота. В лесостепи и те и другие, не теряя индивидуальности, сосуществуют в тесном соседстве, то и дело замещают друг друга (Мильков, 1964; Зонн, 1967; Утехин, 1972). Аналогичными свойствами «двуличия» обладают в градиенте широтной зональности лесотундры Субарктики, саванны тропиков, паркленды Канады (Стамп, 1975). Однако и в таком формате лесостепь выделяется наибольшим контрастом элементов мозаики – семиаридных луговых степей и гумидных редколесий, демонстрируя парадоксальное единство противоположностей. Лесистость в девственном состоянии, до вмешательства человека, составляла в лесостепи 50 %, в середине XX столетия – 27 % в Поволжье, 5–10 % в центрально-черноземных областях (Мильков, 1964), а сегодня – еще меньше. Учитывая сведение леса человеком, основоположники учения о широтной зональности считали лесостепь полноценной ландшафтной зоной, равной по статусу остальным. При этом В.В. Докучаев (1948), отдавая приоритет почвам, называл характеризующую зону черноземной и не считал черноземы маркером степей, с их ярко выраженным постоянным

дефицитом влаги и господством процессов минерализации над гумификацией. Лесостепью характеризуемый ландшафт впервые назвал Л.С. Берг (1947). Позднее, в ходе продолжительной и жаркой научной дискуссии о том, лес ли наступает на степь или наоборот, лесостепью "развенчали" до маргинального образования вторичного порядка – якобы спорную территорию борьбы за существование между лесом и степью (Лавренко, 1950; Мильков, 1952). Опуская детали этого спора, отметим, что сегодня ортодоксальные ландшафтоведы вернулись на позиции основоположников и выделяют лесостепь как оригинальное природное явление. Титульными признаками лесостепья считается сочетание на водоразделах ограниченных по площади травяных редколесий на серых лесных почвах и низкобонитетных лесочков-колков в округлых суффузионных западинах диаметром 50–100 м на дерновых солодах среди злаково-разнотравных луговых степей на типичных или обыкновенных черноземах; остепненных разнотравных лугов на выщелоченных черноземах или лугово-черноземных почвах и мезофитных богаторазнотравных лугов на черноземно-луговых почвах (Мильков, 1952, 1957, 1964). При этом серые лесные почвы имеют общие черты генезиса не с титульными подзолами и дерново-подзолистыми почвами лесной зоны, а с черноземами. Дерновые солоды колков на автоморфных позициях рельефа схожи по генезису с луговыми солодами и солонцами, а не с полугидроморфными почвами лесной зоны. Выщелоченные черноземы и лугово-черноземные почвы имели в своей истории стадию облесения, а типичные, даже мощные черноземы встречаются в лесостепи как под редколесьем, так и под травостоем луговых степей (Зонн, 1967).

В географическом плане лесостепная широтная зона протянулась непрерывной полосой от предгорий Карпат до Алтая. Ее северная граница близко совпадает с южной границей ели. Следуя Л.С. Бергу (1947, 1955), Ф.Н. Мильков (1964) проводит ее через Киев – Нижний Новгород – Казань – южнее Тюмени – севернее Новосибирска. Западнее и восточнее (в Карпатах, на Урале, в Средней и Восточной Сибири) лесостепь встречается лишь фрагментами, в качестве высотного пояса в пограничье гор и межгорных котловин (Мильков, 1964).

Южная граница лесостепья проходит по южной окраине Кодр и Донецкого Кряжа, южнее Саратова, по северным склонам Общего Сырта, южнее Петропавловска в Казахстане и Омска в Сибири. При этом Ф. Н. Мильков (1964) включил в состав лесостепья значительную часть контура обыкновенных черноземов юга Западно-Сибирской и Русской равнин, считая их сегодняшнее безлесье следствием беспрецедентного антропогенного прессинга (вырубка, распашка, пожары).

С учетом административного деления территории в сферу интересов нашего обзора попадают Тульская, Орловская, Курская, Рязанская, Тамбовская, Нижегородская, Ульяновская, Пензенская, Липецкая, Воронежская, Челябинская, Омская, Новосибирская, Курганская области, юг Тюменской области, Пермский и Алтайский края, Чувашия, Татарстан, Башкортостан, а также Черниговская и Сумская области Украины и территории Казахстана севернее г. Петропавловска.

На протяжении лесостепной полосы в ее пределах отчетливо просматриваются три меридиональных сектора по условиям обитания: Среднерусский – в верховьях Днепра и Дона между 20–40° в.д., Поволжский – между 40–60° в.д. и Западно-Сибирский – между 60–80° в.д.

От Русской равнины вглубь просторного Евразийского материка все основные показатели климата уменьшаются в пределах не меньше, чем в широтно-зональном ряду. Крайние значения этих изменений показывают потенциал возможных климатических трендов в рамках характерной физиономии и организации лесостепного геобиома (табл. 1).

Таблица 1

Изменения климатических параметров Русского лесостепья вдоль градиента континентальности с запада на восток

Параметры климата	Меридиональные сектора		
	Среднерусский	Поволжский	Западно-Сибирский
Осадки, мм/год	550–650	400–440	325–360
Среднегодовая температура, °С	3,5–4,0	2,0–3,0	-0,7
Сумма среднесуточных температур выше 10 °С	2400–2600	2000–2200	1900–2000
Отношение суммы осадков (мм/год) к испаряемости	0,9	0,65	0,55
Автор	Раунер, 1972	Алейникова, 1964	Дзюба, 1971

2. ЗНАЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗООЭДАФОНА ЛЕСОСТЕПЬЯ В РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ПОЧВЕННОЙ ЗООЛОГИИ

Разработанная М. С. Гиляровым программа имела в основе парадигму – эволюционно-экологическую функцию почвы как особой многофазной среды обитания, служившей экологическим буфером при переходе беспозвоночных от водного образа жизни к наземному (Гиляров, 1949, 1970, 2012). Такой императив требовал всестороннего изучения животного мира почвы на разных уровнях его организации – от суборганизменного до экосистемного – с учетом вариаций состава и структуры зооэдафона в разных регионах и типах почв. Для реализации столь широких планов была организована сеть лабораторий и рабочих групп в столицах союзных республик и других крупных городах. Единство взглядов и методов поддерживалось наличием координационного центра и нескольких его филиалов в Москве, где проводились консультации, обучение специалистов по различным направлениям. К 1970-м гг. сообщество почвенных зоологов в СССР насчитывало более 200 специалистов (Захаров, Чернова, 1990; Чеснова, Стриганова, 1999). Исследованиями были охвачены практически все природные зоны Советского Союза, но в первую очередь – регионы близ центров, где сложились солидные коллективы исследователей, имелись ландшафты с хорошей сохранностью нативных экосистем и почвы, таящие в своем генезисе гидроморфную стадию и эволюционно-экологическую интригу, в решении которой могли сыграть положительную роль зоологические аргументы.

Таким объектом оказалась лесостепь. В её Среднерусском секторе особой привлекательностью для москвичей пользовались Центрально-Черноземный и Воронежский заповедники, где почвенно-зоологические исследования начались в конце 1950-х – начале 1960-х гг. силами лаборатории почвенной зоологии Института морфологии животных АН СССР (позднее ИЭМЭЖ АН СССР) (Гиляров, 1960б; Криволуцкий, 1962, 1967; Arnoldi, Ghilharov, 1963; Арнольди, 1965; Курчева, 1965; Арнольди и др., 1972) и лаборатории биогеографии Института географии АН СССР (Исаков, Панфилов, 1969; Злотин, 1969; Злотин, Ходашева, 1974). В этих заповедниках сохранились в первозданном виде репрезентативные по площади участки луговых степей и парковых травяных лесов на черноземах, их дериватах и серых лесных почвах с феноменальным плодородием и способностью взаимозамещения в исторически обозримый период времени. Работы в этих заповедниках продолжались и позднее (Гречаниченко, Гусева, 1999, 2000), идут они и в настоящее время.

В Поволжском секторе лесостепья повышенным интересом казанского коллектива почвенных зоологов пользовались близлежащие обыкновенные и выщелоченные черноземы и серые лесные почвы, которые, в отличие от мощных курских черноземов, сформировались в условиях острого дефицита влаги, вплоть до режимов засухи и суховея (Почвенная фауна Среднего Поволжья, 1964; Кадастр ... , 2014).

В Западно-Сибирском секторе лесостепья новосибирский коллектив почвенных зоологов тоже уделял большое внимание окрестным лесостепным ландшафтам (Стебаев, Волковинцер, 1964; Волковинцер, 1974, 1976; Мордкович, 1964, 1973, 1974, 1976, 1977; Дудко, Любечанский, 2002; Любечанский, 2009). Генезис здешних почв, в целом соответствуя лесостепным стандартам, отличался обязательным прохождением в недалекой голоценовой истории полугидроморфной стадии развития, осложненной засоленностью подстилающих пород и почв, проявляющейся в пульсирующем режиме (Структура ..., 1974, 1976).

Во всех трех указанных центрах основными направлениями почвенно-зоологических исследований стали:

а) инвентаризация таксономического состава почвенной фауны, оценка уровня ее α -разнообразия и зоогеографического статуса;

б) система экологических связей беспозвоночных между собой и почвенной средой обитания: топических, трофических, фабрических, форических стратегий выживания. Выделение типов адаптивной организации педобионтов и соответствующих блоков населения с аутентичными экологическими стереотипами жизнедеятельности, комбинации которых формируют структуру сообщества и определяют их самоорганизацию в ходе сукцессий;

в) участие почвообитающих беспозвоночных в процессах биотического круговорота и почвообразования;

г) зоодиагностика типовой принадлежности и трансформация сообществ педобионтов под антропогенной нагрузкой.

Ниже мы рассматриваем эти направления подробнее.

3. ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ ФАУН ЛЕСОСТЕПЬЯ

Эта процедура предусматривает обязательное решение трех задач. Первая — количественный учет таксономического разнообразия и обилия почвообитающих беспозвоночных в широком спектре биотопов лесостепья на всем его протяжении. Вторая — идентификация, по возможности до вида, всех почвенных обитателей и издание серии соответствующих определителей. Третья — расшифровка фауногенеза и степени оригинальности зооэдафона лесостепья.

Уже при первичной инвентаризации фауны лесостепья в начале 1960 гг., даже со скидкой на тогдашний низкий уровень идентификации многих групп педобионтов, в Среднерусском секторе были зафиксированы имаго и личинок более 20 семейств жесткокрылых, 16 семейств двукрылых и других летающих насекомых, десятки видов полужесткокрылых, паукообразных, многоножек, мокриц, кольчатых и круглых червей, моллюсков. В составе мезогерпетобия наиболее представительным контингентом оказались жуки-жужелицы (65 видов). Значительно уступали им жуки-долгоносики (24 вида), стафилиниды (16), мертвоеды (14), щелкуны (11), пластинчатоусые (10), листоеды (8), чернотелки (6). Из других насекомых наибольшую долю в разнообразии внесли полужесткокрылые и муравьи — по 25 видов. Среди геобия выделялись таксономическим разнообразием личинки жуков и мух, а по числу особей — дождевые черви (7 видов) (Arnoldi, Ghilharov, 1963).

Похожий набор таксонов выявлен в те же годы и в фауне почвенных беспозвоночных Среднего Поволжья (Алейникова, 1964; Алейникова, Утробина, 1964; Кадастр..., 2014). Из насекомых, связанных с почвой, наиболее разнообразна фауна жуков, представленная семействами Cicindelidae – 5 видов, Carabidae – 290 видов, Histeridae – 29 видов, Lucanidae – 3 вида, Scarabaeidae – 106 (из них – 36, Cetoniinae – 70), Silphidae – 12, Staphylinidae – 120, Elateridae – 80, Brentidae – 6, Dermestidae – 3, Coccinellidae – 17, Lagriidae – 1, Meloidae – 2, Tenebrionidae – 15, Cerambycidae – 2, Chrysomelidae – 30, Curculionoidea – 163. Всего около 3000 видов. Другие группы: Formicidae – 29, Araneinae – 121, Diplopoda – 11, Chilopoda – 33, Lumbricidae – 16 видов.

В Западно-Сибирском секторе лесостепья подобный анализ был проведен значительно позже (на рубеже XX и XXI вв.), зато гораздо детальнее: в ходе него были охвачены не фрагменты, а вся лесостепная полоса Западно-Сибирской равнины. В результате анализа, проведенного коллективом специалистов ИСиЭЖ СО РАН, зарегистрировано более 1500 видов отряда жесткокрылых (Coleoptera), в том числе: 372 вида жужелиц (Carabidae), 329 видов долгоносикообразных жуков видов семейств Brentidae, Curculionidae, 206 видов листоедов (Chrysomelidae), 115 видов стафилинид (Staphylinidae), 98 видов пластинчатоусых (Scarabaeidae), 65 видов щелкунов (Elateridae), 45 видов нарывников (Meloidae), 25 видов малашек (Malachiidae), 17 видов мягкотелок (Cantharidae), 9 видов узкотелок (Oedemiridae), 5 видов карапузиков (Histeridae), 6 видов мертвоедов (Silphidae), 4 вида рогачей (Lucanidae), 15 видов чернотелок (Tenebrionidae); 531 вид чешуекрылых (Lepidoptera); около 500 видов двукрылых (Diptera), в том числе 247 видов журчалок (Syrphidae), 88 видов настоящих мух (Muscidae), 43 вида слепней (Tabanidae) 34 вида комаров (Culicidae), 16 видов мошек (Simuliidae), 25 видов мокрецов (Ceratopogonidae); более 164 видов полужесткокрылых (Heteroptera), 66 видов стрекоз (Odonata), более 77 видов ногохвосток (Collembola), а также 415 видов клещей (Acari), в том числе 288 видов панцирных (Oribatei) и 95 видов гамазовых (Gamasina); 400 видов пауков (Aranei). В целом, общий уровень зарегистрированного видового богатства членистоногих лесостепной зоны Западной Сибири достигает 3700 видов (Мордкович и др., 2002).

Обилие и разнообразие полученных материалов положили начало изданию определителей и сводок по ключевым таксонам почвенной фауны Русской равнины: определитель более сотни семейств обитающих в почве личинок насекомых под ред. М.С. Гилярова (Определитель ... , 1964), почвенных простейших (Лепинис и др., 1973), раковинных корненожек (Гельцер и др., 1995), дождевых червей (Всеволодова-Перель, 1997), пауков (Ажеганова, 1968), панцирных клещей (Буланова-Захваткина, 1967), определитель обитающих в почве клещей в трех книгах под редакцией М.С. Гилярова и Д.А. Криволюцкого (1975, 1977, 1978), гамазовых клещей (Давыдова, Никольский, 1986), двупарноногих многоножек (Локшина, 1969), многоножек-костянок (Залесская, 1978), коллембол (Мартынова, 1964; определитель коллембол фауны СССР (Определитель..., 1988), определитель коллембол фауны России и сопредельных стран (Определитель..., 1994), личинок жужелиц (Шарова, 1960), стафилинид (Потоцкая, 1967; Тихомирова, 1973), личинок щелкунов (Долин, 1978).

Появление первых определителей позволило уже в 1970-е гг. удвоить, а в ряде случаев утроить знание уровня видового богатства лесостепной зоны в западном секторе (жужелиц – до

254 видов, шелкунов – до 80, чернотелок и пыльцеедов – до 67, усачей – до 152, муравьев – до 42 видов (Арнольди, 1965; Арнольди и др., 1972).

К.В. Арнольди (1965), приняв число видов из шести семейств насекомых в лесостепной зоне за 100 %, сравнил на их примере уровень разнообразия этих же насекомых в соседних лесной и степной зонах Русской равнины. Оказалось, что видовое богатство всех отмеченных семейств в Курской лесостепи в 1,5–2 раза выше, чем в степной и лесной зонах.

Этот вывод подтверждают данные по фауне западносибирской лесостепи, где уровень разнообразия членистоногих в 2–2,5 раза выше, чем в соседних – более северной лесной и более южной степной зонах (рис. 1) (Мордкович, 2006, 2007). Причиной этого феномена, отмеченного и ранее, долгое время считали простое суммирование в лесостепной зоне степной и лесной фаун (Бобринский, 1948; Берг, 1955; Кириков, 1959), игнорируя очевидный паралогизм такой концепции. Все ландшафтные зоны выделялись благодаря большой доле в составе биоты эндемичных или оригинальных в конкретном регионе видов, а в лесостепье, получившем статус самобытной зоны, оригинальные виды отсутствовали по определению, на фоне изобилия банальных маргиналов.

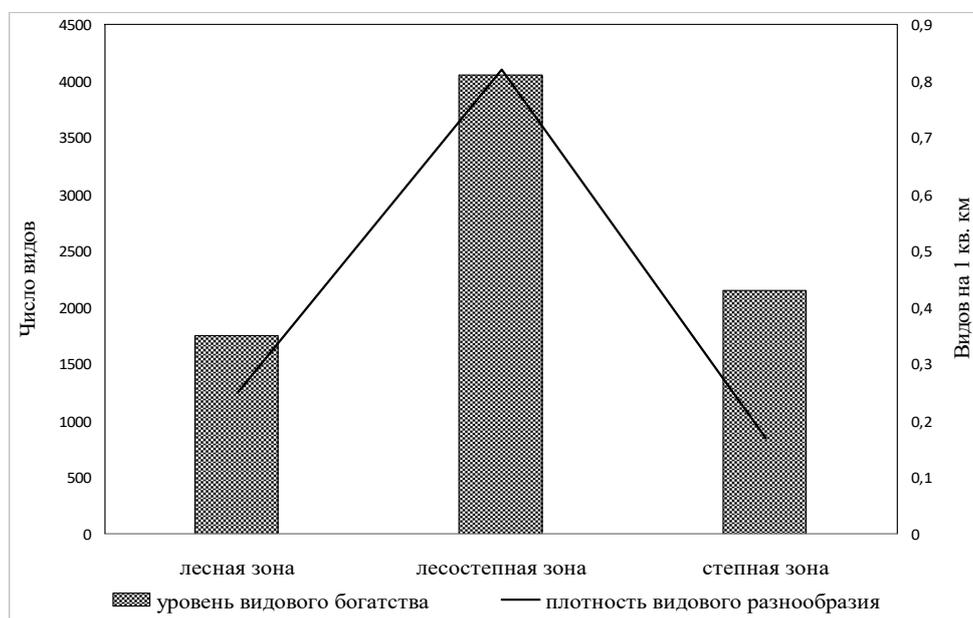


Рисунок 1. Уровень видового богатства и плотность видового разнообразия Западно-Сибирской равнины.

К.В. Арнольди (1965), опираясь на результаты почвенно-зоологических исследований, провел тщательный ареалогический и фауногенетический анализ биоразнообразия русского лесостепья и сформулировал несколько новаторских положений. Первое – энтомофауна Среднерусского сектора лесостепья не только численно богаче видами беспозвоночных по сравнению с фаунами степной и лесной зон, но и гораздо сложнее их по фаунистической структуре. Второе – похожесть лесостепной фауны беспозвоночных на лесную и степную объясняется значительной долей в составе всех трех зон широко распространенных видов (голарктических, палеарктических, европейско-сибирских). Третье – на этом общем фоне отмечено значительное количество видов, ареалы которых преимущественно располагаются в лесостепи и лишь неглубоко, редкими вклиниваниями заходят в пределы лесной или степной зон. Многие из таких видов бесосновательно относят к степным или лесным. Четвертое – не менее 10–13 % видов фауны строго ограничены лесостепной зоной и относятся к автохтонам. Эта цифра может показаться незначительной, но сугубо степных и неморально-лесных видов в составе лесостепи не больше. Например, среди 16 видов рода *Carabus*, характерных для лесостепи, половина (*C. marginalis*, *C. exellens*, *C. scheglovi*, *C. haeres*, *C. fossulatus*, *C. estreicheri*, *C. scabriusculus*, *C. violaceus*) приурочена исключительно к зональным почвам – мощным выщелоченным черноземам или серым лесным почвам. Наконец, пятое положение – лесостепье не только по физико-географическим и ботаническим, но и по фаунистическим параметрам безусловно заслуживает статуса самобытной биогеографической категории высокого ранга (Арнольди, 1965).

Для Поволжского сектора лесостепья М.М. Алейникова (1964) отмечала в почвенной фауне доминирование эвритопных видов. Свыше 60 % из них встречаются на территории всего Среднего Поволжья, охватывающего три широтные зоны: лесную, лесостепную и степную, однако распространение таких видов в каждой из зон отличается особенностями внутреннего «кружева ареалов» и численными соотношениями плотности популяций. Поэтому многие виды, огульно относимые к полизональным, можно считать лесостепными.

В Западно-Сибирском секторе лесостепья полизональные виды представленного семейства жужелиц составляют около 12 % состава фауны. Эндемики с исключительно лесостепным ареалом среди жужелиц здесь отсутствуют (Дудко, Любечанский, 2002), но известны среди панцирных клещей и некоторых других таксонов. Зато достаточно много видов встречается в лесостепи только этого сектора. В фауне жуков-щелкунов доля такого элемента 55 %, долгоносиков – 20, бабочек-совок – 15, панцирных клещей – 13, мух-журчалок – 10 % (Мордкович и др., 2002).

Важным, но редко используемым показателем особенности фауны служит плотность биоразнообразия, т.е. число видов на единицу площади ландшафтной зоны в целом. Превосходство европейской лесостепи над соседними зонами по плотности биоразнообразия неочевидно из-за фрагментарности естественных ландшафтов и минимуме площадей конкретных фрагментов (заповедники: Центрально-Черноземный, Луганский, Аскания-Нова и т.д.). Зато в Сибири такое сравнение объективно отражает зональные изменения. В лесной зоне плотность видового разнообразия членистоногих составляет всего 0,17 вида/км²; в степной чуть выше – 0,25; а в лесостепной достигает 0,82 вида/км². Такое значительное превосходство, более сильное, чем на Русской равнине, достигается, прежде всего, благодаря сужению лесостепной зоны к востоку от Урала почти вдвое. Еще нагляднее своеобразие сибирской лесостепи подчеркивает такой показатель, как концентрация биоразнообразия, т.е. процентная доля видов, сосредоточенных в конкретной зоне, от общего для региона видового списка. В лесной зоне Западно-Сибирской равнины этот показатель составляет около 40 %, в степной – около 30, а в лесостепной поднимается до 70 % (у отдельных таксонов еще выше). Такая высокая концентрация объясняется отнюдь не только переходным географическим положением лесостепи между лесом и степью. Однако переходность не является единственной или главной причиной высокой концентрации разнообразия, ибо проявляется в любой широтной зоне, как обычная дань положению в градиенте инсоляции. Не отличается в этом плане от других зон и лесостепная. Здесь тоже есть виды, господствующие в соседних зонах. Однако плотность их популяций в лесостепных сообществах никогда не превышает 50 % от их плотности в оптимальных для них широтных зонах (Мордкович, 2006). Кроме того, своеобразное предложение комфортной абиотической среды лесостепи предопределило появление на широте 50–53° с.ш. целой плеяды видов с экологическим стандартом, главным достоинством которого является мезофилия. Она позволяет этим видам расширять свои ареалы за пределы лесостепной зоны – в лесную по элювиальным и в степную по аккумулятивным позициям катен. Наличие луговых мезофилов в зональной лесостепи, не изолированной ярко выраженными географическими преградами, в какой-то мере компенсирует отсутствие локальных эндемиков, обеспечивая оригинальность фауны.

Кроме видового богатства, показательным аргументом в пользу своеобразия зооэдафона лесостепи служит обилие особей – общее и по отдельным таксонам. Универсальной шкалой сопряженного количественного сравнения экологических и адаптивных реакций биоты, в том числе обилия, служит широтно-зональный климатический градиент. Сравнение обилия беспозвоночных вдоль него показало, что в лесостепи в целом, по сравнению со всеми другими геобиомами, уровень общего обилия почвенных беспозвоночных возрастает, несмотря на снижение численности некоторых таксонов (ногохвосток, чернотелок, личинок двукрылых) (Гиляров, 1960б; Arnoldi, Ghilharov, 1963; Арнольди, 1965; Чернов и др., 1967). (табл. 2).

Снижение большинства количественных показателей животного населения к северу и югу от лесостепной зоны определяется нарастающим в обоих направлениях недостатком одного из составляющих гидротермического режима — тепла к северу, и влаги — к югу, лимитирующих жизнь (Гиляров, Чернов, 1975). На примере панцирных клещей Д.А. Криволицким (1967) установлено, что суммарное обилие микроартропод коррелирует с особым показателем "благоприятствования", вычисляемым как отношение суммы растительного опада и запаса подстилки к количеству опада, помноженное на коэффициент увлажнения и значение радиационного баланса.

Таблица 2

Численность основных групп почвенных беспозвоночных в зональных экосистемах широтных зон Русской равнины (макс. число экз./м²) (по: Гиляров, Чернов, 1975)

Таксоны	Типичная тундра	Среднетаежные леса	Лесостепь		Сухие и засушливые степи
			Широколиственные древостои	Луговые степи	
Мезофауна					
Enchytraeidae	1200	10000	3700	2000	0
Lumbricidae	10	20	500	114	12
Oniscoidea	0	0	90	0	11
Chilopoda	0	12	120	60	4
Diplopoda	0	20	133	80	2
Elateridae, l	0	24	46	25	30
Scarabaeidae, l	0	0	3	18	7
Curculionidae, l	0	Нет данных	64	100	20
Tenebrionidae, l	0	0	1	6	8
Cerambycidae, l	0	0	0	3	3
Diptera, l	120	Нет данных	100	33	8
Микрофауна					
Nematoda	2000000	15000000	17000	30000000	Нет данных
Gamasida	3000	13000	3000	5000	«
Oribatei	4500	80000	50000	80000	50000
Tyroglyphoidea	0	800	20000	1000	Нет данных
Collembola	44200	12000	12000	8000	«

Примечание. l – личинки.

Отмеченные явления могут претендовать на статус закономерности, если сохраняются на всем протяжении лесостепи с запада на восток. Это не просто большое расстояние (4000 км), а измерительная шкала глобального масштаба – градиент континентальности климата в виде вытянутого от геометрического центра Евразии на запад к Атлантике узкого отрога высокого зимнего давления, исполняющего роль ветрораздела на материке. Этот отрог именуется осью А.И. Воейкова в честь великого климатолога, впервые описавшего и объяснившего этот феномен, диктующий характер распределения биоты в пространстве Северной и Средней Евразии (Берг, 1947). Сравнение обилия основных групп почвенных беспозвоночных в трех секторах русского лесостепья выявило снижение общего обилия педобионтов с запада на восток вдоль климатической оси Воейкова, по мере увеличения континентальности климата. Наиболее весомо сокращается обилие мезофауны, особенно сапрофагов, чувствительных к влаге: энхитрид – в 15 раз, дождевых червей – в 17–20, диплопод – в 7, геофилид – в 25 раз. Менее значительно сокращается обилие насекомых (личинок мух – в 3 раза, пауков – в 6 раз). Зато сохраняется на солидном уровне и даже возрастает в почве численность личинок фитофагов сем. Elateridae, Curculionidae, способных компенсировать дефицит влаги в абиотической среде питанием свежими, богатыми влагой растительными тканями (табл. 3).

В целом, инвентаризация фауны и населения почвенных беспозвоночных лесостепи выдвинула этот контингент биоразнообразия в ряду широтных зон умеренного пояса Евразии на лидирующую позицию в качестве мощного сгущения жизни (Мордкович, 2007).

Таблица 3

Обилие основных групп почвенной фауны в трех меридиональных секторах русского лесостепья

Таксоны	Среднерусский сектор		Поволжский сектор		Западно-Сибирский сектор	
	Редколесье	Луговая степь	Редколесье	Луговая степь	Редколесье	Луговая степь
1	2	3	4	5	6	7
Мезофауна						
Enchytraeidae	128,1	76,4	Нет данных	Нет данных	0	5,0
Lumbricidae	102,1	39,9	30,8	12,0	5,7	0
Oniscoidea	9,2	0	0	0	0	0
Chilopoda	19,4	9,4	19,5	1,2	3,2	1,7
Diplopoda	15,1	9,3	6,2	0	0	0
Geophilidae	18,9	48,7	42,5	3,0	1,2	1,8

Таблица 3. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7
Elateridae, 1	22,7	24,4	11,0	11,2	28,3	35,7
Scarabaeidae, 1	3,9	7,4	7,4	0	0	0,8
Curculionidae, 1	63,7	49,2	7,8	18,0	5,2	53,3
Tenebrionidae, 1	0,4	1,2	0,4	3,0	0	6,2
Cerambycidae, 1	0	0,1	Нет данных	Нет данных	0	2,7
Diptera, 1	81,5	16,8	8,4	2,5	28,2	8,2
Staphylinidae, 1	34,0	9,8	2,2	4,0	10,3	4,5
Aranei	25,3	18,0	4,0	7,5	0	0
Литературный источник	Arnoldi, Ghilharov, 1963		Арнольди, 1965; Кадастр, 2014		Волковинцер, 1974	

Примечание. 1 – личинки.

4. СТРУКТУРА СООБЩЕСТВ ЗООЭДАФОНА

Сообщества, как обособленные и самоорганизующиеся общности биоты, сохраняют свою самобытность в пространстве и во времени благодаря наличию структуры, поддерживаемой сосуществованием в оптимальном для данного местообитания количественном соотношении видов и особей разной экологической ориентации и функционального предназначения. Структурообразующими элементами служат блоки населения с определенным типом адаптивной организации, выделенные и обоснованные априори по отдельным признакам: морфологическим, физиологическим, топологическим, трофическим, демографическим или их совокупностям.

4.1. Морфо-экологические типы организации как структурные элементы сообществ.

Примерами экологической классификации на морфологической основе служат: типы строения кутикулы и других черт у разных таксонов членистоногих и кольчатых червей в зависимости от условий обитания или питания (Семенова, 1960, 1961), типы организации личинок двукрылых (Кривошеина, 1959, 1964) и жесткокрылых (Гиляров, 1960а, 1964).

Широко используются классификации жизненных форм панцирных клещей (Криволуцкий, 1965, 1967), ногохвосток (Стебаева, 1970), стафилинид (Стриганова, 1966; Тихомирова, 1973), чернотелок (Келейникова, 1963; Мордкович, 1971), жуков-жужелиц (Шарова, 1960, 1981), построенные на морфометрической основе, с привлечением физиологических, трофических, топических свойств, отраженных в морфологии. В разработку типов дыхания и метаболизма беспозвоночных большой вклад внесла Ю.Б. Бызова (1965). Случались попытки изобрести универсальную классификацию жизненных форм, охватывающую весь диапазон зооэдафона (Стебаев, Колпаков, 2003).

Сравнение ключевых карабидоценозов Курской лесостепи (по данным Арнольди и др., 1972) с использованием появившейся позднее системы жизненных форм И.Х. Шаровой (1981) подтверждает сделанный К.В. Арнольди вывод об уникальной насыщенности лесостепья видами разной экологической ориентации, казалось бы не совместимых, но встречающихся вместе на одном участке любой из зональных почв Курской лесостепи (Арнольди, 1965) (табл. 4.).

Этот феномен объясняют усредненными значениями лимитирующих экологических факторов в лесостепи (Мильков, 1964), плавностью их изменений от биотопа к биотопу (Герцык, 1965), обратимостью почвенных свойств черноземов, серых лесных, лугово-черноземных почв (Роде, 1956) и необычайно комфортными для зооэдафона условиями жизни в черноземах и их дериватах: большой мощностью обитаемого слоя, допускающего глубинные миграции беспозвоночных; промывным режимом почв, гарантирующим оптимальный для беспозвоночных режим увлажнения в течение всего лета и из года в год (Афанасьева, 1966).

Оказалось, что сообщества жужелиц луговой степи, поляны и дубравы имеют близкие значения динамической плотности (соответственно, 222, 204 и 278 экз./10 ловушко-суток) и практически одинаковый набор жизненных форм. В течение конкретного года каждое из них отличается численным доминированием представителей разных жизненных форм: эпигеобионтов-зоофагов – в луговой степи, геохортобионтов-миксофагов – на поляне, стратогеобионтов-зоофагов – в дубраве. Тем не менее, индексы различия по структуре жизненных форм между сообществами дубравы, луговой степи и поляны не превышают значения 0,7 (при интервале от 0 до 1), а между сообществами луговой степи и луговой поляны среди редколесья – 0,4. В многолетней динамике даже эти различия нивелируются, свидетельствуя в пользу широких комплементных

возможностей организации жужелиц, а также дождевых червей, многоножек, микрофауны и других групп беспозвоночных (Арнольди, 1965; Гиляров, Чернов, 1975).

Таблица 4

Структура жизненных форм в зональных сообществах жуков-жужелиц (имаго) типичных черноземов Курской лесостепи, экз./10 ловушко-суток (по: Арнольди и др., 1972)

Категории жизненных форм	Биотоп		
	Луговая степь	Поляна среди дубравы	Дубрава
I. Эпигеобионты крупные, облигатные зоофаги	130	58	14
II. Стратобионты s. str. Мелкие и крупные, облигатные зоофаги	2	8	33
III. Стратопедобионты мелкие и средние, облигатные зоофаги	36	38	204
IV. Геобионты+ботриобионты крупные, облигатные зоофаги	25	0	0
V. Стратохортобионты мелкие и средние, миксофаги	0	2	14
VI. Геохортобионты средние, миксофаги	29	98	12
В с е г о	222	204	277

Примечание. I – обитатели поверхности почвы, ходящие, облигатные зоофаги с внекишечным пищеварением (*Carabus*, *Calosoma*, *Cicindela*); II – обитатели собственно подстилки, ходящие, средние и мелкие, облигатные зоофаги (*Calathus*, *Synuchus*, *Platyderus*, *Badister*, *Trechus*); III – обитатели подстилки, проникающие и в почву по узким полостям или зарывающиеся в нее, мелкие и средние облигатные зоофаги (*Notiophilus*, *Loricera*, *Chlaenius*, *Licinus*, *Panagaeus*, *Agonum*, *Pogonus*, *Lebia*, *Syntomus*, *Corsyra*, *Pterostichus*, *Poecilus*, *Masoreus*); IV – обитатели нор, выходящие на поверхность почвы, облигатные зоофаги (*Taphoxenus*, *Pristonichus*, *Laemostenus*, *Broscus*); V – обитатели поверхности почвы и подстилки, лазящие иногда по траве, миксофаги с сочетанием зоо- и фитофагии (*Stenolophus*, *Ophonus*, *Amara* (*Zezea*)); VI – обитатели подстилки и нередко травяного яруса, миксофаги, сочетающие зоо- и фитофагию с большой склонностью к растительности (*Harpalus*, *Amara*, *Anisodactylus*, *Curtonotus*, *Daptus*, *Zabrus*). Жизненные формы – по: И. Х. Шарова, 1981.

4.2. Типы распределения по биотопам (внутреннее «кружево ареала»)

Из комплекса экологических факторов чаще других для дифференциации адаптивных типов беспозвоночных используется влажность местообитания, что позволяет различать среди обитателей почвы: гидро-, гигро-, мезо- и ксерофилов (Арнольди, 1965; Мордкович, 1964; Стебаев, Волковинцер, 1964; Гиляров, Чернов, 1975). В лесостепной широтной зоне такая градиация проявляется четче, чем в лесной и степной, благодаря широчайшему диапазону изменений среды обитания, в том числе почв, в пространстве и времени. Степные ксерофилы, проникающие в лесостепье, избирают для жизни интразональные биотопы: южные склоны сухих логов и речных долин, выходы известняков и меловых отложений. Лишь единично типичные степняки заходят в луговые степи на плакорах (жужелицы *Poecilus sericeus*, *Zabrus spinipes*; чернотелка *Blaps halophila*; усачи-корнегрызы *Dorcadion equestre*, *D. holosericeum*; долгоносики *Otiorhynchus velutinus*, *O. conspersus*, *Eusomus acuminatus*; муравьи *Myrmica deplanata*, *Leptothorax stipaeus*; клопы *Psocasta affinis*, *Philus lituratus*).

Виды, свойственные, главным образом, лесной зоне, мезофилы по своим предпочтениям, в лесостепи приурочены исключительно к влажным многоярусным лесным анклавам и избегают суховатых одноярусных лесостепных редколесий, тем более открытых травяных местообитаний (жужелицы *Calosoma investigator*, *Pterostichus aethiops*, *Synuchus vivalis*, *Loricera pilicornis*, листоед *Crioceris quinquestopeculata*, муравей *Camponotus ligniperda*, долгоносик *Otiorhynchus spondyloidea*). Облигатные лесостепные виды отличаются от неморально-лесных умеренной мезофилией, от типично-степных – умеренной ксерофилией и толерантностью к широкому диапазону изменчивости среды в мозаике лесостепи. Поскольку такие условия соблюдаются как в зональных травяных, так и в древесных экосистемах Среднерусского лесостепья и поддерживаются буферностью господствующих почв-черноземов, то лесостепные виды, постоянно имея высокую плотность популяций в луговой степи, проявляют стремление внедриться под полог леса, нередко достигая и там плотности популяций не ниже, чем в луговой степи (жужелицы *Carabus excellens*, *C. fossulatus*, *C. marginalis*, *C. convexus*, *Amara communis*,

Harpalus latus, *Platyderus rufus* и др.). Такая тенденция в большей мере характерна для герпетобионтов, в меньшей – для геобионтов. Обитатели одноярусных лесостепных дубрав тесно связаны с биоценозами небольших полей с луговой растительностью и разреженных групп деревьев. Например, майский хрущ (*Melolontha melolontha*) развивается в почве полей, но дополнительно питается на дубе. Животное население луговых полей наиболее богато видами и обилием беспозвоночных-мезофилов – лесных, луговых и даже степных. Так, на полях наряду с лесной и луговой жужелицей *Poecilus lepidus* уживаются вместе степные ксерофилы *Zabrus spinipes* и *Cymindis humeralis*; шелкокрыльщики: лугово-степные *Melanotus brunneoides*, *Limonius minutulus* и лесной *Dalopius marginalis*; чернотелки: умеренный ксерофил *Opatrum sabulosum* и лесостепной *Oodescelis melas* (Арнольди, 1965; Арнольди и др., 1972).

Герпетобионтные беспозвоночные обеспечивают себе двойную "биотопическую прописку" за счет своих миграционных возможностей. Типичные геобионты – дождевые черви, – даже встречаясь в двух-трех биотопах лесостепи, численно предпочитают лишь один из них, присутствуя в остальных в небольшом числе особей. Например, *Eisenia nordenskioldi*, *Octolasion complanatum* достигают в луговых степях плотности популяции 17–44 экз./м², под пологом дубрав и на полях снижают плотность на два порядка величин. Лесные поляны, опушки и разреженные куртины деревьев, играя роль переходного биотопа, сочетают в составе зооценоза лесных и лугово-степных люмбрицид. Однако плотность популяций лесных такая же, как под пологом леса, а лугово-степных – ниже на два порядка величин, чем в предпочитаемых биотопах (Арнольди, Ghilarov, 1963).

Дифференциация лесных, лугово-лесных и лугово-степных сообществ лесостепи более отчетливо проявляется по вкладу доминантных групп беспозвоночных в суммарное обилие. В дубравах среди мезофауны безраздельно господствуют люмбрициды (до 40 % населения), в почвах лесных лугов – энхитреиды (до 35 %), в почвах луговых степей – многоножки косянки и геофилиды (36 % населения). Среди микроартропод всех трех вариантов зональных лесостепных угодий наибольший вклад в обилие населения делают клещи (54 % – панцирные в дубравах, 25 % – гамазовые на лесных полях). Доля коллембол в дубравах не превышает 18 % населения (Гиляров, Чернов, 1975; Арнольди, Ghilarov, 1963). В Стрелецкой лесостепи Центрально-Черноземного заповедника население крупных почвенных беспозвоночных в начале 60-х гг. XX столетия, по данным М. С. Гилярова и К. В. Арнольди (1965), достигало в выщелоченных черноземах лесных полей 997 экз./м² за сезон, в серых лесных почвах дубрав – 605 экз./м², в тучных черноземах луговых степей – 463 экз./м². На поверхности почв и в подстилке по числу особей доминировали в луговых степях, дубравах и лесных полях муравьи (80–135 экз./м²), личинки мух (92), жуки-коротконадкрылы (12–28), пауки (16–29), многоножки-косянки (26–31 экз./м²). В более глубоких горизонтах почвы дубрав преобладали: дождевые черви (242 экз./м²), энхитреиды (347), диплоподы (73 экз./м²). В почвах луговых степей доминировали личинки жужелиц (12 экз./м²), долгоносиков (26 экз./м²). В 2.5 раза, по сравнению с дубравами, меняется численность дождевых червей, в 4–5 раз – личинок мух. Среди многоножек литобииды уступают доминантные позиции геофилидам (49 экз./м²) (табл. 5).

Учет динамической плотности мобильных герпетобионтов методом земляных ловушек показал высокую численность жужелиц, пауков, муравьев, других жуков, многоножек-косянок и других беспозвоночных во всех биотопах Среднерусского лесостепья (Арнольди и др., 1972). Особенно выделяются в этом плане имаго жужелиц. Например, в Стрелецкой луговой степи численность жужелиц рода *Carabus* достигает 129 экз./10 ловушко-суток, рода *Amara* – 23, *Synthomus* – 25, в дубравах: *Carabus* – 58, *Badister* – 17, *Poecilus* – 17, *Amara* – 88, *Pterostichus* – 181 экз./10 ловушко-суток.

На примере в целом космополитного семейства жуков-жужелиц установлено, что в лесостепной зоне Западной Сибири, с ее умеренно теплыми и влажными условиями существования и резко-континентальным неустойчивым климатом, виды с полизональным распространением составляют лишь 10–12 % населения. Подавляющая его часть – виды, приуроченные к какой-то определенной природной зоне. Среди таких четко обособиваются три компонента: а) бореальные виды, обильно представленные к северу от лесостепи, главным образом в лесной зоне, но нередкие в лесостепи; б) субаридные виды, обильные к югу от лесостепи, главным образом в степной зоне, но частые в лесостепи; в) суббореальные гумидные виды, наиболее обильные в лесостепи, но проникающие либо в лесную, либо в степную зоны, либо в обе (Дудко, Любечанский, 2002). Многие полизональные виды, имея широкий ареал, населяют в разных зонах разные наборы биотопов и имеют в них неодинаковую численность, а в

одинаковых биотопах соседних зон – разное обилие, формируя совершенные разные типы "кружева ареала" (Арнольди, 1957). Этот популярный и в целом верный постулат может претендовать на статус экологического правила, но лишь в том случае, если сравнительный анализ схемы биотопического распределения популяций и видов проводится относительно единой стандартизированной матрицы среды, относительно стабильной в большом промежутке времени, пригодной на любых равнинных территориях для всех или многих подразделений беспозвоночных (Мордкович, Любечанский, 1998). Примером может служить зонально-катенная матрица, представляющая собой координатную решетку из широтных зон и катен в каждой из них, то есть из цепочек взаимосвязанных водным и геохимическим стоком местообитаний вдоль геоморфологического профиля с перепадом высот от метров до десятков метров, приуроченных к разным позициям мезорельефа (Глазовская, Геннадиев, 1995; Мордкович и др., 1985). Виды беспозвоночных, предпочитающие элювиальные и плакорные позиции, наиболее ксерофильны относительно других, виды с количественной преференцией транзитных позиций относятся к мезофилам, а виды, наиболее обильные на аккумулятивных позициях, – к гигрофилам, на супераккумулятивных – к полугидрофилам (Мордкович и др., 1985).

Таблица 5

Численность основных групп почвенных беспозвоночных в различных экосистемах Стрелецкой лесостепи (экз./м²)

Таксоны	Дубрава	Лесные луга на полянах	Нативная луговая степь
Мезофауна			
Enchytraeidae	2800	1300	109
Lumbricidae	170	95	66
Oniscoidea	90	90	0
Chilopoda	92	117	64
Diplopoda	40	56	125
Elateridae, I	46	37	48
Scarabaeidae, I	0	2	10
Curculionidae, I	8	18	31
Tenebrionidae, I	0	0	4
Diptera, I	25	29	26
Silphidae, I	2	3	1
Всего ...	3273	1747	484
Микрофауна			
Gamasida	3100	7800	3000
Oribatei	21000	19400	17600
Tyroglyphoidea	7900	1000	750
Collembola	7000	3060	3200
Всего	39000	31260	24550

Примечание. Данные по микроартроподам – Бызова, 1965; Курчева, 1971; прочие материалы – Злотин, Ходашова, 1974.

Анализ биотопического распределения, проделанный с учетом вышеизложенных критериев показывает, что из встречающихся в западносибирской лесостепи видов герпетобиотных жуков виды жужелиц *Pterostichus oblongopunctatus*, *Agonum fuliginosum*, *Amara brunnea* оказываются преимущественно обитателями лесной зоны, встречаясь там на всех позициях катен, а в лесостепи – лишь избирательно. Виды *Carabus granulatus*, *Trechus secalis*, *Pterostichus niger*, *P. melanarius*, *Calathus melanocephalus*, *Poecilus versicolor*, *Harpalus latus*, *Amara infima*, *A. Equestris*, наоборот, могут считаться преимущественно лесостепными и представлены здесь во всем катенном диапазоне условий, а в лесную зону проникают лишь по аккумулятивным позициям катен. Зато виды *Harpalus froelichi*, *Curtonotus folinae*, *Carabus cribellatus*, *Cymindis angularis*, *Poecilus punctulatus*, *P. sericeus* следует считать степными. Здесь они встречаются на всем протяжении катен, а в лесостепи – лишь избирательно в пространстве и во времени (Мордкович, 1973; Мордкович, 2006; Мордкович, Любечанский, 2010).

Одной из главных особенностей распространения видов, квалифицируемых как лесостепные, служит ярко выраженная стресс-толерантность жизненной стратегии. В отличие от характерных обитателей лесной и степной широтных зон, лесостепные виды не только населяют широкий набор биотопов лесостепи, но одинаково успешно сосуществуют, казалось бы, в

альтернативных условиях, хоть древесного, хоть травяного ландшафтов. Исходной причиной такого феномена служит широчайший диапазон изменчивости среды, свойственный всем без исключения биотопам лесостепи. Особенно ярко это проявляется в Западной Сибири. Убедительно показано, что на одной и той же катене в течение нескольких лет болотные экосистемы переходят в полугидроморфный режим и наоборот, а парково-лесные — в луговой и со временем — в лугово-степной (Структура ... , 1974, 1976). С другой стороны, экосистемы западносибирской лесостепи десятилетиями хранят "память" о прошлых состояниях в виде особых горизонтов почв на подходящих позициях катены. Это относится не только к абиотическим свойствам, но и к составу биоты. Например, в средних солонцах на вершине увала в аридный период цикла увлажнения под лугово-степной растительностью, на глубине нескольких метров обнаружены живые корневища болотных трав, свидетельствующие о гидроморфном режиме в недалеком прошлом. В населении почвенных беспозвоночных тоже, наряду с ксерофилами, ранней весной нередко встречаются ярко выраженные гигрофилы родов *Chlaenius*, личинки мезофилов *Cantharis* sp., *Pterostichus niger*, *Galeruca wisei* и др., а на усыхающем болоте — степные *Carabus cribellatus*, *Opatrum riparium*, *Crypticus quisquillus* (Мордкович, 1973, 1974). При этом сезонный порядок встречаемости и активности видов с разными экологическими стандартами в рамках конкретных биотопов соответствуют последовательности фаз экогенетических сукцессий (Мордкович, 1973).

Сравнение спектров топо-экологических групп в сообществах в таксоценах герпетобионтных жуков древесных редколесий и травяных экосистем западносибирской лесостепи по среднесезонным данным показало, что сообщества колков, травяных лугов, луговых степей ближе друг к другу, чем к населению настоящих лесов или степей соседних широтных зон. Эту близость в наибольшей мере обеспечивают виды-мезофилы, легко манипулирующие плотностью популяций и мигрирующие по катене.

4.3. Трофическая структура сообществ

Классическая схема дифференциации беспозвоночных по трофическим параметрам на зоо-, сапро-, фитофагов в конкретных экологических ситуациях существенно усложняется сочетанием нескольких способов питания. Простейшие питаются бактериями, одноклеточными водорослями, гниющими частицами органического детрита и растворенными в воде питательными веществами. Энхитреиды кроме микрофлоры используют в пищу органический детрит. Дождевые черви по характеру питания делятся на: утилизаторов листовой подстилки и потребителей детрита, попутно усваивающих простейших и других мелких гетеротрофов. Мокрицы кроме микробальной массы, живой или мертвой, питаются листовым опадом, гниющей древесиной, животными тканями (Гиляров, Чернов, 1975; Стриганова, 1980; Криволицкий, Покаржевский, Сизова, 1985). Диплоподы главным образом потребляют растительные остатки, но нередко питаются живыми тканями (Покаржевский, 1976). Лабильность рациона миксофагов, в частности, жуков-щелкунов, подтверждается и современными данными (Samoilova, Tiunov, 2017).

Среди специализирующегося на зоофагии семейства жуков-жужелиц, кроме облигатных хищников, значительную долю составляют роды и виды, способные параллельно или последовательно сочетать хищничество с фитофагией (Шарова, 1981). Миксофитофаги (миксофаги), занимающие доминантные позиции в сообществах степной зоны, в лесостепи Русской равнины имеют небольшую долю: 4–11 % в луговой степи, 9 % в дубравах (Арнольди и др., 1972). В Сибири, с ее континентальным климатом, доля миксофитофагов в сообществе жужелиц луговой степи возрастает, по сравнению с европейской, до 43 %, а в колке паркового облика — до 32 % (Мордкович, Любечанский, 2010). Однако решающую функциональную силу сообщества почвообитающих беспозвоночных лесостепи составляют не зоофаги, а сапрофаги, направляющие биотический круговорот по детритной цепи превращений (Злотин, Ходашова, 1974; Стриганова, 1980; Гиляров, Чернов, 1975). В дубравах Русской равнины сапрофаги в течение всего сезона составляют в мощных черноземах до 98 % населения крупных беспозвоночных. При этом в луговых степях данного региона их доля, по сравнению с дубравами, сокращается до 56 % за счет конкурирующих фитофагов (до 37 % населения). Доля зоофагов скромна — 6.5 % (Гиляров, Чернов, 1975). Этим соотношением сообществ лесостепи Русской равнины кардинально отличаются от сообществ лесной зоны, где лидирующие позиции занимают фитофаги, направляющие круговорот по растительной цепи.

Иная картина наблюдается в лесостепи Западно-Сибирской равнины, где дефицит влаги проявляется как минимум в середине лета, а в сухие годы — на протяжении всего вегетационного

сезона, кроме ранней весны. В умеренно сухих березовых колках на элювиальной позиции рельефа доля сапрофагов в сообществе педобионтов не превышает 16 %. Обилие дождевых червей по сравнению с дубравой Русской равнины сокращается на порядок величин (с 102–144 до 34 экз./м²). Лидирующие позиции переходят, как в степной зоне, к фитофагам (личинки жуков-щелкунов и долгоносиков). В луговых степях на обыкновенных, как в Европе, черноземах при доле сапрофагов 15 % из состава населения совсем выпадают дождевые черви и энхитреиды. В составе зоофагов облигатных хищников замещают зоофитофаги. Суммарная доля фитофагов возрастает до 78 % (Волковинцер, 1974).

Таким образом, при сохранении под луговыми степями почв черноземного облика, западносибирский зооэдафон лесостепи первым из компонентов биогеоценоза перестраивает трофическую структуру сообщества в сторону остепнения, переходя с детритного сценария круговорота на растительный, характерный для степной зоны.

5. РОЛЬ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ В БИОТИЧЕСКОМ КРУГОВОРОТЕ ВЕЩЕСТВ И ПОЧВООБРАЗОВАНИИ

Среднерусское лесостепье, с его оптимальными для жизни экологическими условиями, массировано насыщено биотой, относится к наиболее изученным в функциональном отношении мегаэкосистемам и служит моделью проведения таких исследований в других регионах (Криволицкий и др., 1985). На примере сообществ лесостепи усовершенствованы или разработаны заново методы количественных биоценологических анализов, полевых и лабораторных экспериментов, долговременного мониторинга зооэдафона, упорядочены процедуры сравнения сообществ (Курчева, 1965, 1971; Покаржевский, Криволицкий, 1981; Стриганова, 1980; Злотин, Ходашова, 1974).

5.1. Запас зоомассы – важнейший показатель ценотических возможностей и структурного своеобразия сообщества. Из лесостепного геобиома, с его высочайшим уровнем α - и β -разнообразия, получены наиболее масштабные результаты по дифференцированной оценке зоомассы разных экологических видов, компонентов зооэдафона, из которых складывается общая зоомасса эталонных сообществ лесостепи.

Масса крупных беспозвоночных в большинстве цитируемых источников определена путем прямого взвешивания, а для микрофауны путем пересчета по данным средней массы. Получены значения зоомассы наиболее значимых обитателей почв лесостепи (Курчева, 1971; Стриганова, 1980; Криволицкий и др., 1985). Оказалось, что 98 % зоомассы эталонных экосистем лесостепи сосредоточено в почвенном ярусе. При этом суммарная живая масса зооэдафона в дубравах Среднерусского лесостепья колеблется в пределах 500–1030 кг/га, в луговой степи – 350–1000 кг/га (Гиляров, Чернов, 1975; Злотин, Ходашова, 1974; Курчева, 1965, 1971).

Полученные результаты позволили М.С. Гилярову и Ю.И. Чернову еще в 1970-х гг. предсказать, что в последующие десятилетия ведущее место в синэкологических исследованиях займут общие закономерности глобального распределения интегральных характеристик сообщества в связи с климатическими факторами (Гиляров, Чернов, 1975). Пределы и характер климатических трендов анонсированы в широтно-зональном градиенте, подтверждая принцип неразрывного единства категорий пространства и времени (Вернадский, 1988).

Почвенно-зоологические исследования, проведенные по Международной биологической программе, показали, что в гумидных зонах от тундр до лесостепья 30–90 % запаса зоомассы в сообществах составляют дождевые черви. Масса свободноживущих почвенных нематод достигает 200 кг/га, микроартропод – 30 кг/га. Масса почвенных беспозвоночных составляет от общей зоомассы экосистем в тундровой зоне 5 %, в лесной – 1,6–4,0 %, а в лесостепи – лишь 0,1–1,0 % (Чернов и др., 1967).

Была выведена генеральная закономерность изменения количественных характеристик зооэдафона относительно климатического градиента Северной Евразии. Она проявляется ярко выраженным устойчивым максимумом в середине широтно-зонального градиента не только видового богатства и обилия, но и зоомассы, энергетического потенциала и участия педобионтов в биогенном круговороте веществ и почвообразовании. При этом показатели зоомассы достигают максимума как в дубравах на серых лесных почвах, так и на черноземах, а по величине метаболизма – в черноземах, хоть под дубравами, хоть в луговой степи (рис. 2). К северу и югу от зоны лесостепи значения всех интегральных показателей зооэдафона убывают на порядок величин от зоны к зоне, реагируя, прежде всего, на недостаток одной из составляющих гидротермического режима: тепла – к тундрам, влаги – к пустыням (Чернов и др., 1967; Криволицкий, 1968; Гиляров,

Чернов, 1975). Кривая общих запасов зоомассы в рамках широтно-зонального градиента Русской равнины четко коррелирует с параллельным изменением запаса фитомассы, а кривая суммарного метаболизма зооэдафона – с величиной годового прироста фитомассы (Бызова, 1965; Гиляров, Чернов, 1975).

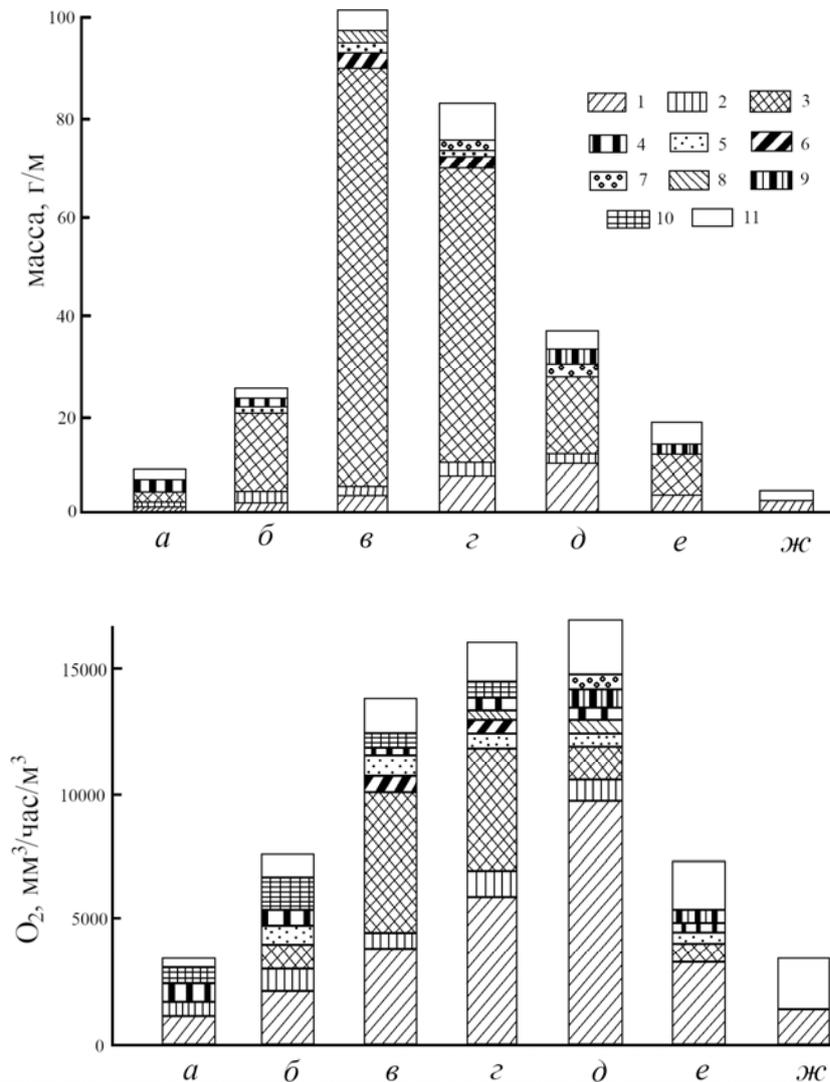


Рисунок 2. Суммарная масса (вверху) и изменение интенсивности потребления кислорода (внизу) почвенными беспозвоночными в различных зональных сообществах на территории Европейской части СССР (по: Гиляров, Чернов, 1975).

а – типичные тундры, б – среднетаежные ельники, в – дубравы на серых лесных почвах, г – дубравы на черноземе, д – луговая степь, е – сухая степь, ж – полупустыня. 1 – Nematoda, 2 – Enchytraeidae, 3 – Lumbricidae, 4 – Collembola, 5 – Oribatei, 6 – Gastropoda, 7 – Diplopoda, 8 – Elateridae, 9 – Scarabaeidae, 10 – Diptera, 11 – прочие.

Однако величины массы не эквивалентны энергетически потенциам организмов, масштабам их химических воздействий на среду, трофической активности. Поэтому при анализе структуры сообществ и функциональной деятельности беспозвоночных в почве, кроме численности и биомассы, применяется такой показатель, как интенсивность метаболизма, выраженный в калориях или в интенсивности потребления кислорода, с учетом данных по интенсивности дыхания различных групп животных (Nielsen, 1964; Edwards, 1967; Chernova et al., 1971). В России наиболее продуктивный вклад в этот аспект внесла Ю.Б. Бызова (1965, 2007). В результате оказалось, что по энергетическим потенциам лидерами оказались не крупные, а мелкие

организмы. Среди педобионтов по интенсивности суммарного дыхания на первом месте оказались нематоды, энхитреиды, коллемболы и панцирные клещи.

5.2. Специфика участия зооценоза в биотическом круговороте и почвообразовании определяется структурой сообщества, т.е. соотношением в нем таксонов животных, их жизненных форм, трофических групп, категорий различной размерности и других элементов. В почвах Среднерусского лесостепья функциональная значимость беспозвоночных определена в большинстве до вида. Установлено, что наибольшее влияние на круговорот оказывают сапрофаги. Заметное место занимают фитофаги. Значение хищников в абсолютном выражении невелико и проявляется, главным образом, косвенно (Криволицкий и др., 1985; Стриганова, 1980).

Деятельность различных сапрофагов, в свою очередь, носит дифференцированный характер, так как разные их контингенты участвуют лишь в определенных звеньях одного процесса (Стриганова, 1980). Установлено, что голые амебы утилизируют от 30 до 85 % продукции бактерий, а жгутиконосцы – лишь 0.2 %; клещи (главным образом оribатидаы) усваивают около 2 % продукции бактерий. Ежегодное потребление грибного мицелия оribатидами в лесной подстилке составляет 6 г/м², т.е. 2 % ежегодной продукции грибов (Криволицкий и др., 1985). Из мезофауны наиболее мощным и разнообразным воздействием на процессы круговорота отличаются олигохеты, особенно дождевые черви.

Суточный рацион *Lumbricus terrestris*, обычного в почвах дубрав и лесных полян Среднерусского лесостепья, в эксперименте при кормлении опадом клена был равен 17,7 г/экз.; дуба – 35,3; липы – 45,6; лещины – 50,0; вяза – 80,0 мг/экз. (Перель, 1979). За вегетационный сезон дождевые черви съедают в лесостепной дубраве 112 г/м² опада (около 30 % его общего запаса), в луговой степи – 90 г/м², из которых 5 г/м² – ветошь, остальное – корни (80 % их ежегодной продукции) (Покаржевский, Татищева, 1980; Стриганова и др., 1987).

Количество почвы, поглощаемой любмрицидами *A. calliginosa*, составляет 200–430 мг/г живой массы червя. Черви *E. nordenskioldi* потребляют за сезон 355 мг почвы на грамм живой массы. При этом масса копролитов достигает 55 мг/г, а поглощаемой почвы – 711 г/м². Энхитреиды в дубравах лесостепья используют до 35 г/м² (~10 % общего листового опада (Стриганова, 1982).

У мокриц коэффициент потребления при питании травяным опадом в луговых степях составляет 11–41 %, дубовым опадом в дубравах лесостепи – 20–35 %. Величина потребления меняется от 500 мг/г сухой массы тела у молодых до 137 мг/г у старых мокриц. В течение вегетационного сезона масса потребленного корма растет от лета к осени в 3 раза (с 308 до 991 мг/г в сутки). В дубравах Среднерусского лесостепья мокрицы съедают за сезон до 6 г/м² дубового опада, т.е. 2 % его ежегодного опада, и поглощают до 9 г/м² почвы за сезон (Покаржевский, 1976).

Диплоподы *Sarmatiulus kessleri* съедают ежесуточно 99–243 мг дубового опада на грамм сухой массы тела многоножки. В луговой степи диплоподы питаются еще и опадом корней, съедая около 39 г/м² растительных остатков за сезон (Покаржевский, 1981).

Среди насекомых активными потребителями растительного опада и микрофлоры являются личинки жесткокрылых и двукрылых. Коэффициент потребления личинок мух *Bibio marci*, питающихся опадом дуба, составляет 28 %. При этом личинки ранних возрастов съедают ежесуточно в 3,7 раза больше, чем весят сами, возвращая в среду большую часть съеденной массы с фекалиями. Личинки комаров-типулид при питании опадом дуба имеют коэффициент потребления 4 %, опада березы – 56, липы – 33 % (Стриганова, 1976, 1980). Личинки *Tipula scripta* при кормлении опадом дуба потребляют его ежесуточно 59,5 мг/г живой массы (Курчева, 1971). В дубравах лесостепи личинки типулид съедали за 15 суток мая 600 мг/м² дубового опада. При средней плотности гнезд бибионид 1 гнездо/м² и численности личинок в гнезде 300–900 экз., эти личинки съедают за 2 мес. до 318 г опада на 1 м² (92 % ежегодного опада дуба). При этом в экосистему возвращается до 100 г фекалий, составляя 0,04 % массы гумусового слоя почвы (Покаржевский, 1976).

5.3. Велик вклад сапрофагов в биогенный круговорот многих химических элементов, значимых для метаболизма беспозвоночных и почвы (Криволицкий и др., 1985). Наибольшее влияние на эти процессы оказывают дождевые черви. В дубравах лесостепи через популяции любмрицид проходит за летний сезон 10,2 г/м² Са; 0,9 г/м² Mg; 0,5 г/м² К. На диплопод приходится около 2,5 % общего потока элементов, проходящего через популяции почвенных сапрофагов, на мокриц – 1,5 %. При потреблении за сезон ~ 33 % опада почвенные сапрофаги вовлекают в круговорот 36 % Са, 25 Mg, 26 К, 13 % Na от количества этих элементов в опаде.

Суммарное количество Са, вовлекаемое в круговорот популяциями сапрофагов в лесостепной дубраве, составляет 178 % от содержания этого элемента в листовом опаде, 136 % – от содержания в общем опаде и 2,4 % – от содержания обменной формы этого элемента в слое почвы 0–5 см. Для Mg соответствующие величины составляют 58,9; 40,8; 10,4 %; для К – 64,4; 14,3; 4,1 %. В луговой степи, как и в дубравах, главную роль в миграции химических элементов играют люмбрициды. Из 6,3 г/м² Са, вовлекаемого в круговорот популяции сапрофагов, 5,4 г/м² приходится на долю дождевых червей. Для Mg соответствующие величины – 0,9 и 0,7 г/м², для К – 0,6 и 0,4 г/м². На долю диплопод приходится около 20 % массы элементов, вовлекаемых в круговорот. Суммарное количество Са, вовлекаемое популяциями сапрофагов в луговой степи, составляет 629 % от количества этого элемента в степной ветоши весной, 103 % от его количества в продукции подземной части травянистых растений. Дефицит элементов, извлекаемых из фитомассы, восполняется из почвы. Отношение количества Са, проходящего через популяции сапрофагов в луговой степи в течение сезона, к количеству этого элемента, аккумулированного в популяциях педобионтов, равно 22, Mg – 21, К – 29 (Покаржевский, 1976). Важнейшим элементом, лимитирующим продуктивность популяции многих беспозвоночных, является фосфор. Общий поток его через популяции сапрофагов в дубравах лесостепи равен 0,1 г/м², в луговой степи – 0,2 г/м². Всего через популяции сапрофагов в течение сезона проходит количество Р, составляющее 14,7 % от его количества в ежегодном листовом опаде в дубраве, и 13–19 % – от продукции травяных растений в луговой степи.

Количество микроэлементов, пропускаемых сапрофагами через себя в течение сезона, сравнимо с поступлением этих элементов в почву с растительным опадом (Mg – 172, Cu – 88, Zn – 183 %). Ни растительный опад, ни почва не могут поставлять достаточное количество Р в популяцию сапрофагов. Единственным источником пополнения дефицита могут служить только микроорганизмы, потребляемые вместе с почвой и растительным опадом. Содержание Р в микробомассе в 30 раз выше, чем в растительных остатках (Покаржевский, Гордиенко, 1984).

Кроме сапрофагов, значительный вклад в круговорот химических элементов вносят фитофаги. Однако возврат элементов в почву с экскрементами фитофагов в несколько раз ниже, чем у сапрофагов. Прямое участие хищников в вовлечение химических элементов в биогенную миграцию составляет не более 2 % от общего потока.

5.4. Результаты работ по функциональной роли беспозвоночных в почвах русской лесостепи можно свести к нескольким ключевым направлениям. В лесостепи, несмотря на самые высокие значения разнообразия, численности, зоомассы в широтно-зональном ряду, запас вторичной продукции зооэдафона по сравнению с первичной продукцией и почвой ничтожен. Тем не менее, значение почвенных беспозвоночных в биотическом круговороте и почвообразовании велико. Каждое подразделение зооэдафона в интегральном круговороте специализируется на отдельных его звеньях, отличаясь спецификой функциональной деятельности (Курчева, 1971; Стриганова, 1980; Криволицкий и др., 1985).

В круговороте веществ и почвообразовании участвуют зоо-, фито-, но особенно масштабно – сапрофаги. Их влияние нарастает от гумидных тундр и лесов и аридных полупустынь и степей с севера и юга к лесостепи в середине широтно-зонального ряда с оптимальными условиями существования, где отличается максимальными значениями потребления пищи, продукцией экскрементов, разнообразием других функций.

Почвенные сапрофаги используют широкий спектр источников питательных веществ, необходимых для успешного метаболизма. Беспозвоночные получают минеральные элементы, углеводы, аминокислоты и другие вещества в процессе пищеварения из поглощаемой почвы, растительных остатков и внекишечной и специализированной внутрикишечной микрофлоры (Стриганова, 1980; Козловская, Загуральская, 1966). Экспериментально показано, что в гумидных и аридных геобиомах почвенные беспозвоночные большей частью специализированы на функции разложения растительных остатков. В опытах скорость разложения подстилки в лесных почвах при исключении участия дождевых червей снижается на 50 %. Под влиянием фитофагов – личинок мух-бибионид – скорость минерализации опада увеличивается вдвое (Перель, 1967).

Деятельность различных групп почвенных сапрофагов меняет скорость и характер процессов разложения органических остатков. Участие дождевых червей приводит к накоплению в почве гуминовых кислот. В отсутствие люмбрицид в опыте происходит деструкция опада без заметной гумификации (Стриганова, 1980; Гиляров, Чернов, 1975).

Полученные данные позволяют считать, что синтез прогумусовых веществ, гуминовых и фульвокислот начинается уже в кишечнике дождевых червей с участием кишечной микрофлоры. В кишечниках энхитреид, бедных кишечной микрофлорой, такие процессы заторможены (Козловская, Жданникова, 1963; Козловская, Загуральская, 1966; Козловская, Белоус, 1967). Из этих результатов следует, что главным фактором влияния олигохет на разложение опада является с наибольшей вероятностью стимуляция микробиологических процессов. Гумусонакопление, начинаясь в кишечниках сапрофагов, продолжается в их экскрементах, которые становятся очагами последующих каскадных реакций, связанных с трансформацией и накоплением гумусовых веществ в почве (Стебаев и др., 1964).

Из вышеизложенного следует, что лесостепь является особым экологическим полигоном, где к обычным для биотического круговорота процессам продукции и деструкции органического вещества добавляется третий процесс – депонирование гумуса, представляющего собой уникальную экологическую услугу не только беспозвоночным животным, но и человечеству.

6. ИЗМЕНЕНИЕ ЗООЭДАФОНА ЛЕСОСТЕПЬЯ ПОД АНТРОПОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Этот аспект почвенно-зоологических исследований, важный в любом ландшафте, в лесостепе, густо насыщенном людьми и продуктами их бурной деятельности, особенно актуален и требует взвешенной оценки.

6.1. Агроценозы лесостепья, с их высоко плодородными почвами, привлекли внимание отечественных педозологов еще на заре возникновения этой отрасли (Arnoldi, Ghilarov, 1963). Сравнительный анализ данных по агроценозам и нативным экосистемам показал, что умеренные нарушения лесостепных экосистем – сенокосы, пашни, посевы – не приводят к гибели зоообществ почвы, а вызывают их перестройку, сохраняя ключевые элементы прежней структуры, весьма устойчивой к колебаниям среды. Индекс различия Брэя-Кертиса сообществ почвенной мезофауны некосимой и косимой луговых степей имеет низкие значения – 0,4 (при интервале от 0 до 1). Неизменным остается набор доминантов – кольчатых червей (Lumbricidae, Enchytraeidae) и нематод (Mermithidae). Тем не менее в сообществе педобионтов косимой степи по сравнению с некосимой резко снизилось обилие хищных многоножек-геофилид (в 25 раз) и паразитических мермитид (в 2–3 раза. Зато почти в 3 раза увеличилось обилие дождевых червей. При этом, на видовом уровне доминирующие в нативных черноземах *E. nordenskioldi* в косимой луговой степи уступили лидирующие позиции *E. rosea*. В функциональном плане ведущей группой обоих сообществ остались сапрофаги. Роль гумификаторов в косимом варианте лугово-степного сообщества зооэдафона даже возросла по сравнению с некосимым. Этот парадокс обусловлен, по-видимому, ущербностью заповедной луговой степи, лишенной стадных копытных, обязательных в степной экосистеме (Мордкович, 1982). В косимой луговой степи этот недостаток в какой-то мере компенсируется массивованным кошением травостоя и уплотнением почвы сельхозтехникой.

Распашка луговой степи, несмотря на очевидные нарушения среды, в то же время стимулировала деструкцию корней, что создало комфортные условия для люмбрицид. Поэтому их численность в черном пару оказалась не ниже, чем в некосимой луговой степи, а снижение численности *E. nordenskioldi* компенсировалось увеличением численности таких видов, как *E. rosea*, *Allolobofora caliginosa*, *Octolasion complanatum* (Arnoldi, Ghilarov, 1963).

Более масштабно и разнообразно, по сравнению с Курской заповедной лесостепью, изучены особенности структурных сообществ зооэдафона в агроценозах Поволжского сектора лесостепной зоны. Установлено, что в этих агроценозах, с их регулярными технологическими нарушениями почвенного и растительного ярусов, выживать способны только полифаги с высокой экологической пластичностью в отношении физико-химических, гидротермических и трофических условий. Наибольшее обилие почвенного населения Поволжской лесостепи связано с черноземными почвами (Алейникова, 1964). Степень заселения почв беспозвоночными увеличивается от светло-серых к темно-серым и черноземным почвам. В светло-серых почвах численность мезофауны достигает 22–51 экз./м², микрофауны – 4657–10780 экз./м², в темно-серых почвах – 39–61 и 18770–22037 экз./м², в черноземах – 52–109 и 25719–44500 экз./м² соответственно. Обилие животного населения зависит от различных сельскохозяйственных культур на полях. На парах оно сильно сокращается. Влияние сельскохозяйственных культур наиболее сильно сказывается на микроартроподах. Количество ногохвосток и панцирных клещей увеличивается от пара и пропашных культур к злакам и многолетним травам в 5–9 раз (Алейникова, 1964; Утробина, 1964; Гатилова, 1964).

Разница в степени заселенности почв более крупными беспозвоночными в зависимости от сельскохозяйственных культур выражена менее отчетливо. При этом фитофаги-щелкуны, широко распространенные во всех почвах и зонах Среднего Поволжья, наиболее многочисленны и разнообразны под многолетними травами. Чернотелки-сапрофитофаги, отсутствующие в почвах лесной зоны, в лесостепи, особенно в черноземах, являются немногочисленным, но постоянным контингентом агроценозов, приуроченным, главным образом, к паровым полям и посевам пропашных культур (Алейникова, Утробина, 1964). Та же зависимость характерна для жужелиц, которые в почвах под кукурузой встречаются в количестве 23–36 экз./м², а под люцерной – только 3–5 экз./м² (Утробина, 1964). Обильны в черноземах агроценозов хрущи, особенно под многолетними травами. Многоножки отсутствуют. Численность дождевых червей в полевых землях Поволжского сектора лесостепья невелика (найжены только в темно-серых лесных почвах).

В целом разница в численности микро- и мезофауны под покровом различных сельскохозяйственных культур меньше, чем в различных типах почв лесной, лесостепной и степной зон Среднего Поволжья (Алейникова, 1964).

6.2. Пожары в лесостепи — явление регулярное, но более экологически щадящее, чем в лесной зоне, мало затрагивающее луга с их полугидроморфным режимом и даже луговые степи между колками на водоразделах, испытывающие дефицит влаги лишь изредка. Из-за малой площади колка и небольшого запаса горючего материала в обособленном биотопе, пожары в них недолгие и, как правило, затрагивающие лишь древостой и подстилку, но не почву. Одни горевшие колки: восстанавливаются до исходного состояния в течение 2–4 лет, другие зарастают быстро проходящей рудеральной растительностью, потом дерновинно-злаковой, превращаясь надолго в луговые экосистемы, достигающие в ходе сукцессии климаксового состояния луговых степей (Структура ... , 1974, 1976).

Исследования, проведенные в 2008 г. на водораздельном участке южной лесостепи в Новосибирской области, где колки выполнены березой с подростом из осины, шиповника, и с травяным покровом под пологом, включающим более 25 видов травянистых растений, показали, что горелый колкок сильно и значимо отличается от контрольного по показателям гидротермического режима, что объясняется разреженностью крон деревьев на свежей гари и гибелью их на прошлогодней (табл. 6).

В негорелом колке обнаружено 15 видов коллембол. Такой уровень видового богатства — один из самых высоких среди всех исследованных биотопов Барабы. Общая плотность населения коллембол достигает 10,9 тыс. экз./м².

На свежей гари коллемболы встречаются почти исключительно в сохранившихся фрагментах мало пострадавшей от огня подстилки. В них население достигает высоких показателей плотности, во много раз превышающих таковые контрольного колка. Средняя плотность населения коллембол свежей гари в 3 раза выше, чем в аналогичной позиции негорелого колка (до 33,5 тыс. экз./м²) (Березина, 2008).

Таблица 6

Показатели гидротермического режима в исследованных биотопах Барабы и общая характеристика населения педобионтов, (по: Березина, 2008)

Показатель	Гарь			Контроль
	свежая		прошлогодня	
	голая земля	с подстилкой		
Влажность почвы, %	5,2±0,8	9,5±1,8	7,8±1,2	13,7±0,8
Температура почвы на глубине 2,5 см, °С	18,3±0,8	14,3±0,5	16,0±0,7	10,6±0,1
Температура поверхности почвы, °С	27,5±1,5	24,4±1,8	25,7±1,2	17,0±1,8

В горелом колке обнаружен ряд видов, не встречавшихся в контрольном. Жужелицы (имаго), более доступны огню, чем коллемболы. В негорелом колке их 6 видов. Общая численность жужелиц составляет 83 экз./10 ловушко-суток, что на порядок величин больше, чем в любом луговом сообществе лесостепи. По своим биотопическим предпочтениям обитатели колочного сообщества относятся к психроаридной лесной, реже к психрогумидной лесной экологическим группам (Мордкович, Любечанский, 2010).

Сразу после пожара общая численность герпетобионтных жужелиц уменьшилась в 4 раза (до 20 экз./10 ловушко-суток). Однако общее число видов возросло с 6 до 8. Обращает на себя

внимание появление в составе видов-криофилов. Возможно, их появление обязано частичной дефолиации кроны деревьев. В той части колка, где со времени предшествующего пожара прошел год, количество видов жуужелиц возросло по сравнению со свежесгоревшим участком вдвое, а с негорелым – в 2,5 раза. На этой стадии сукцессии сохранились виды, характерные для свежесгоревшего колка, увеличив численность особей в 4–6 раз, и в то же время, вернулись в состав сообщества виды, характерные для негоревшего колка. Заново появились в единичном количестве психроаридные лесные и травяные виды. Общим итогом первого года сукцессии колючего сообщества является восстановление численности жуужелиц после массового ее спада сразу после пожара до исходных значений негорелого колка.

Несхожесть допозарного, пирогенного и послепожарного сообщества коллембол возрастает. О различной реакции на пожар сообществ коллембол и жуужелиц говорят также результаты дисперсионного анализа: фактор "биотоп" сильно и значимо влияет на распределение общей плотности населения коллембол, а для жуужелиц это влияние несущественно (Березина, 2008).

Ход сукцессии сообщества коллембол отличается более масштабными изменениями от стадии к стадии, чем у жуужелиц. Сообщество жуужелиц возвращается к исходному допозарному состоянию быстрее и полнее, чем население коллембол. Уже через год после пожара оно обнаруживает следы сходства с исходным населением негорелого колка. Пожары способствуют замещению видов в сообществах коллембол лесостепных колков с лесных на луговые. У жуужелиц, экологическая классификация которых разработана детальнее, чем у коллембол (Мордкович, Любечанский, 1998; 2010), население на всех этапах пирогенной сукцессии формируется, главным образом, психрофилами, т.е. видами, тяготеющими количественно к лесостепной зоне, с ее сбалансированными экологическими условиями. На всех стадиях сукцессии сугубо аридные виды даже в свежесгоревшем колке, несмотря на иссушение почвы, так и не появились.

В заключение отметим, что пожары в лесостепной зоне, по сравнению с лесной, приводят не к полной деградации биоты и последующей сукцессии с нуля, а лишь к перестройке уцелевшего состава и структуры таксоценов на том же или более высоком уровне численности многих видов.

6.3. Рекультивация земель в регионах горнодобычи – единственная стратегия хозяйственной эксплуатации ландшафта, направленная не на безальтернативную деградацию, или упрощение естественных экосистем, а на их воссоздание с нуля. Не миновала этой участи и лесостепь, с её уникальными плодородными почвами. Ярким примером реставрации лесостепных экосистем на промышленных отвалах угледобычи открытым способом служит территория Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса (КАТЭК) на юге Красноярского края в Средней Сибири. Обязательная рекультивация земель здесь большей частью ограничивается вывозом и отсыпкой вскрышных пород в виде валов, разделенных ложбинами протяженностью несколько километров. Искусственно формируемый рельеф напоминает естественный гривно-ложбинный в Барабинской лесостепи юга Западной Сибири. Небольшую часть отвалов разравнивают в плато под конкретные проекты благоустройства территории. Вскрышные породы Канско-Ачинского бурогоугольного бассейна имеют идеальный механический состав, не токсичны, обладают естественным плодородием и представляют собой оптимальный подстилающий субстрат для почвообразования черноземного типа. Поэтому на отвалах КАТЭКа с первых дней и даже часов их существования без дополнительных мер со стороны человека в ходе экогенетических сукцессий формируются примитивные, но быстро и эффективно развивающиеся экосистемы.

Первыми включаются в биотический круговорот: микроорганизмы и протисты (Богородская и др., 2010), следом беспозвоночные. Среди последних лидируют микроартроподы: коллемболы и панцирные клещи, сразу же появляющиеся в субстрате отвалов и достигающие уже через месяц высокой численности. Далее в ходе сукцессии она многократно увеличивается, но за счет лишь немногих видов-эврибионтов (например, панцирные клещи *Oppiella nova*, *Tectocephus velatus* и др.) (Бабенко, 1982; Дмитриенко, 1990; Сукцессии ... , 1993; Стебаева, Андриевский, 1997).

Высоким обилием, таксономическим и экологическим разнообразием среди мезофауны выделяются жуки-жуужелицы, благодаря широкому диапазону форетических, трофических и топических возможностей. Они появляются на техногенных отвалах КАТЭКа с первых часов после отсыпки, прилетая на запах сырой земли и оставаясь в составе зооэдафона ведущей группой на протяжении десятилетий. По этим причинам жуужелицы претендуют на роль модельного объекта для характеристики, анализа и диагностики этапов и направления сукцессии (Сукцессии ... , 1993; Мордкович, Любечанский, 2019а, б).

Техногенная нивелировка рельефа отвалов ускоряет развитие сукцессии на первом этапе (1–3 года), но после этого до 25 лет прогресс прекращается, а сукцессия затормаживается, так и не достигая климаксовой стадии, эталонной для лесостепного ландшафта (Мордкович, Любечанский, 2019б).

Параметры демографической структуры населения жужелиц (видовое разнообразие, плотность населения, индекс Менхиника) после 25 лет сукцессии на всех позициях техногенных катен так и не достигают полного сходства с луговыми, лесными, лугово-степными сообществами естественной лесостепи, а лишь слегка напоминают их в отдельные годы и сроки сезона. Из этого следует, что принятые на сегодня стандарты биологической рекультивации, якобы достаточные для восстановления естественного ландшафта – 12–25 лет (Моторина, 1986), не соответствуют реалиям сукцессионного процесса, который достигает оптимального состояния в рекультивированных экосистемах, как минимум, в 1,5 раза дольше.

Порядок, скорость и направление сукцессии таксоцена жужелиц существенно различаются в зависимости от положения суррогатных ценозов в рельефе неспланированных отвалов. На элювиальных и транзитных позициях техногенных катен сообщества приобретают лишь некоторые черты остепненно-луговых и лугово-степных сообществ зональной лесостепи. На аккумулятивной позиции сукцессия развивается более полно, но медленнее. Однако таксоцен жужелиц обретает к 25 годам черты сходства не с зональными травяными, а интразональными лесными сообществами, опережая на годы появление соответствующих древесных компонентов растительного покрова, тем самым подсказывая избирательный выбор вариантов биологической рекультивации на разных элементах рельефа неспланированных отвалов вместо единой стандартной схемы (Мордкович, Любечанский, 2019а).

7. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЧВЕННЫХ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ В ЛЕСОСТЕПЬЕ

Исследования почвенных беспозвоночных в лесостепи продолжаются в настоящее время. В недавних работах можно выделить несколько активно развивающихся и новых направлений:

Инвентаризационное. Кроме "классических" групп почвенных беспозвоночных, на новом современном уровне исследуются почвенные простейшие (раковинные амебы – Мазей, Ембулаева, 2009; Чернышов, Мазей, 2010; жгутиконосцы – Тихоненков и др., 2013), моллюски (Стойко и др., 2009), нематоды и др. Дополняются сведения и по давно исследуемым группам. Активно изучается фауна и население жужелиц, пауков (Azarkina, Trilikauskas, 2012, 2013а, 2013б; Azarkina et al., 2018), с охватом новых территорий и новой проблематикой. Исследуется влияние изменений климата на сообщества почвенных животных (Беспалов и др., 2010, Мордкович и др., 2020). Появились возможности сопоставления данных, собранных в 1960-е – 1980-е гг., с современными. Такого рода исследования "прежде и теперь" ведутся в Центрально-Черноземном заповеднике (Гречаниченко, Гусева, 1999, 2000), в Казахстане и Южной Сибири (Мордкович и др., 2020).

Функционально-биологическое. С развитием новых инструментальных методов (например определения соотношений стабильных изотопов углерода и азота в беспозвоночных и элементах среды их обитания) появляются исследования трофических сетей, в которые включены почвенные беспозвоночные лесостепи (Любечанский и др., 2015, Samoylova, Tiunov, 2017; Iakovlev et al., 2017). Результаты этих работ позволили конкретизировать трофическую роль таких полифагов, как муравьи или личинки жуков-щелкунов; расширить представления о пищевых предпочтениях разных представителей такой разнообразной группы, как жужелицы.

Палеонтологическое. В лесостепных районах Западной Сибири и Урала расширяется исследование плейстоцен-голоценовых обстановок по палеоэнтомологическому материалу. Климатические реконструкции, сделанные на основе изученных тафоценозов, свидетельствуют о значительно более аридном и прохладном климате на территории нынешней лесостепной зоны Западной Сибири (Zinovyev et al., 2016; Gurina et al., 2019), а также о встрече видов жесткокрылых на этой территории, ныне характерных либо для тундр, либо для степей (феномен "разбегания" плейстоценовой фауны, хорошо известный для млекопитающих). Подобным же образом исследуются природные условия прошлого по ископаемым раковинным корненожкам в лесостепной зоне Европейской части России (Novenko et al., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Русская лесостепь – наиболее масштабный, полно и многопланово изученный геобиом Евразии, который послужил колыбелью и испытательным полигоном почвенной зоологии. На его

примере наработаны главные методы и ключевые результаты, послужившие моделью для аналогичных исследований в других регионах России.

Данные, опубликованные многочисленными авторами, показали, что лесостепной комплекс отличается феноменально высоким среди других широтных зон умеренного пояса Евразии уровнем родового и видового богатства. Общий уровень α -разнообразия членистоногих достигает здесь 3700 видов, что в 1,5–2 раза выше, чем в лесной и степной ландшафтных зонах. Большой вклад в этот результат вносят обитатели почвы. Важными показателями самобытности лесостепи можно также считать самую высокую в широтно-зональном ряду геобиомов плотность зооразнообразия – 0,82 вида/км² – и его мощную концентрацию – 70 % от общего уровня зооразнообразия Западно-Сибирской равнины.

Лесостепь – это не конгломерат лесных и степных видов, суммарная доля которых в лесостепной фауне не превышает 20 %, а оригинальный комплекс, ядро которого составляют виды педобионтов, отличительной особенностью которых служат стресс-толерантность, мезофилия, политофия.

Применение катенного подхода к анализу структуры сообществ и использование зонально-катенной стандартизированной матрицы местообитаний позволило конкретизировать и оптимизировать понятие биотопического ареала (внутреннее “кружево ареала”) и упорядочить типологию топических комплексов видов как элементов структуры сообществ, а также процедуру их сравнения между собой в пространстве и во времени.

В ответ на часто и быстро сменяющие друг друга тренды абиотических условий: аридизации, гумидизации или заболачивания, засоления или рассоления – экогенетические сукцессии в каждом конкретном сообществе происходят в ломаном ритме, начинаясь и не доходя до конца, затормаживаясь и разгоняясь, перебивая, ослабляя или усиливая друг друга. Несмотря на разный облик в конкретный момент времени, все сообщества катены, но в разном порядке и ритме проходят один и тот же набор состояний, пользуясь одним и тем же резервом изменчивости. Нет никаких оснований считать их независимыми – луговыми, лесными, болотными, солончаковыми или степными. Можно лишь говорить о луговом, болотном, степном состоянии одного и того же ценоза, оптимального в широтах, где при самых сильных колебаниях климата в среднем складываются наиболее комфортные условия обитания для биоты.

Одним из ярких и важных феноменов экосистем лесостепи является биотический круговорот, в структуре которого кроме процессов создания продукции и ее деструкции важнейшую роль играет процесс депонирования особой биокосной субстанции – гумуса. Ведущую роль в этом процессе играют почвообитающие беспозвоночные – гумификаторы и минерализаторы. О значимости этих педобионтов в процессах гумификации свидетельствует последовательное уменьшение численности их населения с запада на восток лесостепной зоны по мере увеличения суровости климата. Следствием исчезновения олигохет в зональных почвах западносибирской лесостепи оказывается уменьшение вдвое содержания гумуса в черноземах и серых лесных почвах. Важным становится вопрос о пересмотре дефиниции почвенного тела с трехфазного образования в четырехфазное, с учетом решающего вклада педобионтов-гумификаторов в процессы почвообразования. Это ставит под сомнение правомочность отнесения сибирских почв, лишенных важнейших групп эффективных гумификаторов, к черноземам.

В связи с острой проблемой исчезновения специфических местообитаний и появления новых экологических ниш, они могут заполняться только педобионтами со стресс-толерантной стратегией выживания. Главным их источником служит лесостепь.

С природоохранной позиций лесостепь проставляется мощнейшим, чрезвычайно мобильным и потенциально богатым резерватом биоразнообразия. Её потенциала хватает не только на самоё себя, но и на соседние геобиомы, что гарантирует их выживание в условиях резко меняющегося климата. Благодаря экологическому универсализму, зооэдафон лесостепи более устойчив и к антропогенному прессу, нежели сообщества беспозвоночных других широтных зон. При рекультивации лесостепного ландшафта с нуля, даже при самых благоприятных условиях зооэдафон выступает в качестве пионера заселения отвалов горнодобычи. Однако педозоологическая сукцессия, бурно развивающаяся на них, через 5–7 лет начинает буксовать и продолжается десятилетиями в рамках бесконечных флуктуаций.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-14-50185 (программа "Экспансия") и программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) государственных академий наук на 2013-2020 гг., проект № VI.51.1.7. (0311-2016-0007).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ажеганова Н.С. *Краткий определитель пауков (Aranei) лесной и лесостепной зон СССР*. Л. Наука. 1968. 149 с.
2. Алейникова М.М. *Почвенная фауна различных ландшафтов Среднего Поволжья // Почвенная фауна Среднего Поволжья*. М. Наука. 1964. С. 5-51.
3. Алейникова М.М., Утробина Н.М. *Фауна чернотелок (Tenebrionidae) и их размещение в Среднем Поволжье // Почвенная фауна Среднего Поволжья*. М. Наука. 1964. С. 52-67.
4. Алехин В.В. *Флора Центрально-Черноземного госзаповедника // Труды Центрально-Черноземного заповедника*. № 1. 1940. С. 8-144.
5. Арнольди К.В. О теории ареала в связи с экологией и происхождением видовых популяций // *Зоологический журнал*. 1957. Т. 36. № 11. С. 1609-1629.
6. Арнольди К.В. *Лесостепь Русской равнины и попытка ее зоогеографической и ценологической характеристики на основании изучения насекомых // Труды Центрально-Черноземного заповедника*. № 8. Изд-во Воронежского университета. Воронеж. 1965. С. 138-166.
7. Арнольди К.В., Шарова И.Х., Клюканова Г.Н., Бутрина Н.Н. *Жужелицы (Carabidae, Coleoptera) Стрелецкой степи под Курском и их сезонная динамика активности // Фауна и экология животных*. Изд-во МГПИ. 1972. С. 215-230.
8. Афанасьева Е.А. *Чернозем Среднерусской возвышенности*. М. Наука. 1966. 224 с.
9. Бабенко А.Б. Динамика почвенных микроартропод при зарастании техногенных отвалов // *Зоологический журнал*. 1982. Т. 61. № 12. С. 1815-1825.
10. Бабенко А.Б., Потапов М.Б., Стебаева С.К., Чернова Н.М. *Определитель коллембол фауны России и сопредельных стран. Семейство Hurogastruridae*. М. Наука. 1994. С. 1-336.
11. Берг Л.С. *Географические зоны Советского Союза*. Гос. изд-во географ. лит-ры. 1947. 401 с.
12. Берг Л.С. *Природа СССР*. М.: Гос. изд-во географ. лит-ры. 1955. 494 с.
13. Берзина О.Г. Коллемболы (Hexapoda, Collembola) на катенах соленых озер южной лесостепи Западной Сибири // *Евразийский экологический журнал*. 2006. Т. 5. № 3. С. 199-202.
14. Берзина О.Г. Пространственная структура сообществ коллембол (Hexapoda, Collembola) южной лесостепи Западной Сибири // *Евразийский энтомологический журнал*. 2008. Т. 7. № 3. С. 196-202.
15. Беспалов А.Н., Дудко Р.Ю., Любечанский И.И. Дополнения к фауне жужелиц (Coleoptera, Carabidae) Новосибирской области: южные виды расселяются к северу? // *Евразийский энтомологический журнал*. 2010. Т. 9. № 4. С. 625-628.
16. *Биогеографическое и ландшафтное изучение лесостепи*. Ред. Д.Л. Арманд. М. Наука. 1972. 197 с.
17. Бобринский Н.А. *Животный мир и природа СССР*. М. Изд-во МОИП. 1948. 251 с.
18. Богородская А.В., Краснощекова Е.Н., Трефилова О.В., Шишкин А.С. Сезонная динамика развития микробоценозов и комплексов беспозвоночных на отвалах вскрышных пород Бородинского бурогоугольного разреза (КАТЭК) // *География и природные ресурсы*. 2010. № 4. С. 36-45.
19. Буланова-Захваткина Е.М. *Панцирные клещи-орибатиды*. М. Высшая школа. 1967. 254 с.
20. Бызова Ю.Б. Зависимость потребления кислорода от образа жизни и размера тела на примере дождевого червя (Oligochaeta, Lumbricidae) // *Журнал общей биологии*. 1965. Т. 26. № 5. С. 555-561.
21. Бызова Ю.Б. *Дыхание почвенных беспозвоночных*. М., КМК. 2007. 336 с.
22. Быков Б.А. *Экологический словарь*. Алма-Ата. Наука. 1988. 248 с.
23. Вернадский В.И. *Философские мысли натуралиста*. М. Наука. 1988. 520 с.
24. Волковинцер В.В. *Экологическая структура мезогеобия // Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы*. Т. 1. Новосибирск. Наука. 1974. С. 267-279.
25. Волковинцер В.В. *Динамика состава животного населения почв // Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы*. Т. 2. Новосибирск. Наука. 1976. С. 416-428.
26. Всеволодова-Перель Т.С. *Дождевые черви фауны России. Кадастр и определитель*. М. Наука. 1997. 102 с.
27. Гатилова Ф.Г. *К фауне панцирных клещей (Oribatei) лесостепи Приволжской возвышенности // Почвенная фауна Среднего Поволжья*. М. Наука. 1964. С. 120-132.
28. Гельцер Ю.Г., Корганова Г.А., Алексеев Д.А. *Определитель почвообитающих раковинных амёб*. Изд-во МГУ. 1995. 87 с.
29. Герцык В.В. *Изменение лесостепного природного комплекса от леса к степи через опушку // Труды Центрально-Черноземного заповедника*. № 8. Изд-во Воронежского университета. Воронеж. 1965. С. 291-321.
30. Гиляров М.С. Соотношение размеров и численности почвенных беспозвоночных // *Доклады АН СССР*. 1944. Т. 43. № 6. С. 283-285.
31. Гиляров М.С. *Особенности почвы, как среды обитания и ее значение в эволюции насекомых*. М.-Л. Изд-во АН СССР. 1949. 181 с.

32. Гиляров М.С. Некоторые общие задачи эволюционной морфологии беспозвоночных // *Успехи современной биологии*. 1960а. Т. 49. № 2. С. 215-224.
33. Гиляров М.С. Почвенные беспозвоночные как показатели особенностей почвенного и растительного покрова лесостепи // *Труды Центрально-Черноземного заповедника*. № 6. 1960б. С. 283-318.
34. Гиляров М.С. Основные морфологические типы личинок жуков // *Определитель обитающих в почве личинок насекомых*. М. Наука. 1964. С. 61-63.
35. Гиляров М.С. *Закономерности приспособления членистоногих к жизни на суше*. М. Наука. 1970. 275 с.
36. Гиляров М.С. *Экологические принципы эволюции наземных животных*. *Избранные труды*. М. КМК. 2012. 594 с.
37. Гиляров М.С., Чернов Ю.И. Почвенные беспозвоночные в составе сообществ умеренного пояса // *Ред. Родин Л.Е., Смирнов Н.Н. Ресурсы биосферы (Итоги советских исследований по Международной биологической программе)*. Вып. 1. Л. Наука. 1975. С. 218-240.
38. Глазовская М.А., Геннадиев А.Н. *География почв с основами почвоведения*. М. Изд-во МГУ. 1995. 246 с.
39. Горышина Т.К., Ниценко А.А., Гребенщиков О.С. *Терминологический словарь по экологии, геоботанике и почвоведению*. Л. Изд-во ЛГУ. 1988. 248 с.
40. Гречаниченко Т.Э., Гусева И.А. Население жужелиц (Coleoptera, Carabidae) гетерогенных лесных биотопов Центральной лесостепи // *Зоологический журнал*. 2000. Т. 79. № 5. С. 548-555.
41. Гречаниченко Т.Э., Гусева Н.А. Структура и динамика населения жужелиц (Coleoptera, Carabidae) луговой степи // *Зоологический журнал*. 1999. Т. 78. № 4. С. 442-450.
42. Давыдова М.С., Никольский В.В. *Гамазовые клещи Западной Сибири*. Новосибирск, Наука. 1986. 126 с.
43. Дзюба Г.М. Типы почвенных климатов и микроклиматов Барабинской низменности // *Климат почв*. Л. 1971. С. 95-108.
44. Дмитриенко В.К. Динамика сообществ беспозвоночных в грунтах промышленных отвалов западной зоны КАТЭКа, используемых для лесовыращивания // *Современное состояние биоценозов западной зоны КАТЭКа*. Л. Гидрометеоиздат. 1990. С. 186-197.
45. Дмитриенко В.К., Шаймуратова Н.С. Структура комплексов педобионтов рекультивируемых земель западной зоны КАТЭКа // *География и природные ресурсы*. 1986. № 4. С. 81-85.
46. Догель В.А. Количественный анализ фауны лугов в Петергофе // *Русский зоологический журнал*. 1924. Т. 4. № 1-2. С. 117-154.
47. Докучаев В.В. *Учение о зонах природы*. М. Географгиз. 1948. 64 с.
48. Долин В.Г. *Определитель личинок щелкунов фауны СССР*. Киев. Урожай. 1978. 124 с.
49. Дудко Р.Ю., Любчанский И.И. Фауна и зоогеографическая характеристика жужелиц (Coleoptera, Carabidae) Новосибирской области // *Евразийский энтомологический журнал*. 2002. Т. 1. № 1. С. 30-45.
50. Залеская Н.Т. *Определитель многоножек-костянок СССР (Chilopoda, Lithobiomorpha)*. М. Наука. 1978. 212 с.
51. Захаров А.А., Чернова Н.М. Меркурий Сергеевич Гиляров. *Краткий очерк научно-организационной, педагогической и общественной деятельности* // *Библиография ученых СССР*. М. Наука. 1990. С. 11-28.
52. Злотин Р.И. Зональные особенности биомассы почвенных беспозвоночных животных в открытых ландшафтах Русской равнины // *Проблемы почвенной зоологии*. М. 1969. С. 75-77.
53. Злотин Р.И., Ходашова К.С. Роль животных в биологическом круговороте лесостепных экосистем. М. Наука. 1974. 220 с.
54. Зонн С.В. Почвы // *Средняя полоса Европейской части СССР*. М. Наука. 1967. С.181-190.
55. Исаков Ю.А., Панфилов Д.В. Зональные особенности ресурсов животного мира СССР // *ВИНИТИ. Итоги науки. География*. № 7. Ресурсы животного мира СССР (география запасов; использование, воспроизводство). М. 1969. С. 7-45.
56. *Кадастр сообществ почвообитающих беспозвоночных (мезофауна) естественных экосистем Республики Татарстан*. Казань. Казанский ун-т. 2014. 308 с.
57. Келейникова С.И. О личиночных типах чернотелок (Coleoptera, Tenebrionidae) Палеарктики // *Энтомологическое обозрение*. 1963. Т. 42. № 3. С. 539-549.
58. Кириков С.В. *Изменения животного мира в природных зонах СССР (XIII—XIX вв.): Степная зона и лесостепь*. М. Изд-во АН СССР. 1959. 175 с.
59. Козловская Л.С., Белоус А.П. Изменения органической части растительных остатков под влиянием олигохет // *Взаимоотношения леса и болота*. М. 1967. С.43-55.
60. Козловская Л.С., Жданникова Е.Н. *Взаимодействие дождевых червей и почвенной микрофлоры // Заболоченные леса и болота Сибири*. М., Изд. АН СССР. 1963. С. 183-217.
61. Козловская Л.С., Загуральская Л.М. *Энхитреиды и почвенная микрофлора // Микроорганизмы в борьбе с вредителями лесного хозяйства*. М. Наука. 1966. С. 29-41.
62. Криволицкий Д.А. Панцирные клещи (Oribatei) в почвах Стрелецкого участка Центрально-Черноземного заповедника им. проф. В. В. Алехина (Курская область) // *Pedobiologia*. 1962. Bd. 4. Hf. 1. P. 53-65.
63. Криволицкий Д.А. Морфо-экологические типы панцирных клещей (Acariformis, Oribatei) // *Зоологический журнал*. 1965. Т. 44. № 8. С. 1168-1181.
64. Криволицкий Д.А. Понятие "жизненная форма" в экологии животных // *Журнал общей биологии*. 1967. Т. 28. № 2. С.153-161.

65. Криволицкий Д.А. Некоторые закономерности зонального распределения панцирных клещей // *Oikos*. 1968. Т. 19. С. 339-344. DOI: 10.2307/3565019
66. Криволицкий Д.А. Роль панцирных клещей в биогеоценозах // *Зоологический журнал*. 1976. Т. 55. № 2. С. 226-236.
67. Криволицкий Д.А. Панцирные клещи как индикаторы почвенных условий // *Итоги науки и техники. Сер. Зоология беспозвоночных*. 1978. Т. 5. С. 70-134.
68. Криволицкий Д.А., Покаржевский А.Д., Сизова М.Г. *Почвенная фауна в кадастре животного мира*. Ростов-на-Дону. Изд-во Ростовского университета. 1985. 96 с.
69. Кривошеина Н.П. О некоторых морфо-экологических типах личинок двукрылых (Diptera) // *Журнал общей биологии*. 1959. Т. 20. № 5. С. 405-408.
70. Кривошеина Н.П. *Основные морфологические типы почвенных личинок двукрылых* // Определитель обитающих в почве личинок насекомых. М. Наука. 1964. С. 615-617.
71. Кузнецова Н.А. *Организация сообществ почвообитающих коллембол*. М. Прометей. 2005. 243 с.
72. Курчева Г.Ф. Степень участия беспозвоночных животных в процессе разложения дубового опада в лесу и зависимость их деятельности от погодных условий // *Труды Центрально-Черноземного заповедника*. № 8. Изд-во Воронежского университета. Воронеж. 1965. С. 167-192.
73. Курчева Г.Ф. Роль почвенных животных в разложении и гумификации растительных остатков. М. Наука. 1971. 156 с.
74. Лавренко Е.М. Вопрос о взаимоотношениях степи и леса на новом этапе // *Проблемы физической географии*. М.: Изд-во АН СССР. 1950. Т. 16. С. 124-132.
75. Лепинис А.К., Гельцер Ю.Г., Чибисова О.И., Гептнер В.А. *Определитель Protozoa почв Европейской части СССР*. Вильнюс. Изд-во Митас. 1973. 171 с.
76. Локшина И.Е. *Определитель двупарноногих многоножек (Diplopoda) равнинной части Европейской территории СССР*. М. Наука. 1969. 79 с.
77. Любечанский И.И. Население жуков-жужелиц (Coleoptera, Carabidae) типичных биотопов южной лесостепи Западной Сибири // *Евразийский энтомологический журнал*. 2009. Т. 8. № 3. С. 315-318.
78. Любечанский И.И., Дудко Р.Ю., Тиунов А.В., Мордкович В.Г. Трофическая структура сообщества герпетобионтных насекомых прибрежной экосистемы соленого озера в Южной Сибири по данным изотопного анализа // *Аридные экосистемы*. 2015. Т. 21. № 4 (65). С. 33-42.
79. Мазей Ю.А., Ембулаева Е.А. Изменение сообществ почвообитающих раковинных амёб вдоль лесостепного градиента в Среднем Поволжье // *Аридные экосистемы*. 2009. Т. 15. № 1 (37). С. 13-23.
80. Мартынова Е.Ф. *Отряд Podura (Collembola) — ногохвостки, или подуры* // Определитель насекомых Европейской части СССР. Т.1. Низшие, древнекрылые, с неполным превращением. Ред. Г.Я. Бей-Биенко. Л. Наука. 1964. С. 42-101.
81. *Методы почвенно-зоологических исследований*. / Ред. Гиляров М.С. М. Наука. 1975. 274 с.
82. Мильков Ф.Н. *Лесостепь Русской равнины. Опыт ландшафтной характеристики*. М. Изд-во АН СССР. 1950. 296 с.
83. Мильков Ф.Н. Лесостепной ландшафт и его зональное подразделение // *Известия АН СССР, серия географическая*. 1951. № 5. С. 3-14.
84. Мильков Ф.Н. Взаимоотношения леса и степи и проблема смещения ландшафтных зон на Русской равнине // *Известия Всесоюзного географического общества*. 1952. Т. 84. № 5. С. 431-447.
85. Мильков Ф.Н. Несколько слов в защиту лесостепной географической зоны. // *Изд. Всес. геогр. общ-ва*. 1957. Т. 89. № 6. С. 548-550.
86. Мильков Ф.Н. *Природные зоны СССР*. М. Мысль. 1964. 326 с.
87. Мордкович В.Г. Население герпетобионтных жуков (Coleoptera: Carabidae, Tenebrionidae, Silphidae) в микроландшафтах севера Барабинской лесостепи и его изменения под влиянием хозяйственной деятельности человека // *Зоологический журнал*. 1964. Т. 43. № 5. С. 680-694.
88. Мордкович В.Г. Порядок доминирования экологических групп мезогерпетобия в ходе сезонного развития сообществ Барабинской лесостепи // *Зоологический журнал*. 1973. Т. 52. № 10. С. 1490-1497.
89. Мордкович В.Г. *Состав сообществ мезогерпетобия и их классификация* // Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы. Т. 1. Новосибирск. Наука. 1974. С. 258-266.
90. Мордкович В.Г. *Динамика состава и численности мезогерпетобия как показатель сукцессионного процесса* // Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы. Т. 2. Новосибирск. Наука. 1976. С. 401-415.
91. Мордкович В.Г. *Зоологическая диагностика почв лесостепной и степной зон Сибири*. Новосибирск. Наука. 1977. 110 с.
92. Мордкович В.Г. *Степные экосистемы*. Москва. Наука. 1982. 206 с.
93. Мордкович В.Г. Зоологические сукцессии на молодых техногенных катенах и принцип пространственно-временных аналогов // *Известия РАН. Сер. биол.* 1994. № 3. С. 446-452.
94. Мордкович В.Г. Особенности структурной организации и биогеографический статус энтомокомплекса западно-сибирского лесостепья // *Евразийский энтомологический журнал*. 2006. Т. 5. № 3. С. 181-189.

95. Мордкович В.Г. Феномен лесостепи с энтомологических позиций // *Евразийский энтомологический журнал*. 2007. Т. 6. № 2. С. 123-128.
96. Мордкович В.Г., Баркалов А.В., Василенко С.В. и др. Видовое богатство членистоногих Западно-Сибирской равнины // *Евразийский энтомологический журнал*. 2002. Т. 1. № 1. С. 3-10.
97. Мордкович В.Г., Любечанский И.И. Зонально-катенный порядок экологической ординации населения жужелиц (Coleoptera, Carabidae) Западно-Сибирской равнины // *Успехи современной биологии*. 1998. Т. 118. № 2. С. 205-215.
98. Мордкович В.Г., Любечанский И.И. Экологические группы видов жуков-жуелиц (Coleoptera, Carabidae): сущность, принципы выделения, состав и востребованность // *Евразийский энтомологический журнал*. 2010. Т. 9. № 2. С. 195-202.
99. Мордкович В.Г., Любечанский И.И. Жуки-жуелицы (Coleoptera, Carabidae) и зоодиагностика экологической сукцессии на техногенных катенах бурогольных отвалов КАТЭКа (Красноярский край) // *Известия РАН. Сер. биол.* 2019а. № 5. С. 533-543. DOI: [10.1134/S0002332919050084](https://doi.org/10.1134/S0002332919050084)
100. Мордкович В.Г., Любечанский И.И. Зоологические аспекты экологической сукцессии на выровненном отвале Назаровского углераза КАТЭКа в Красноярском крае // *Сибирский экологический журнал*. 2019б. Т. 26. № 4. С. 428-444. DOI: [10.15372/SEJ20190406](https://doi.org/10.15372/SEJ20190406)
101. Мордкович В.Г., Любечанский И.И., Березина О.Г. и др. *Зооэдафон западно-сибирской северной тайги*. М. КМК. 2014. 168 с.
102. Мордкович В.Г., Худяев С.А., Дудко Р.Ю., Любечанский И.И. Зоодиагностика климатических изменений в степях Центрального Казахстана по сравнению с серединой XX в. на примере жуков-жуелиц и чернотелок // *Сибирский экологический журнал*. 2020. № 5. С. 539-567. DOI : [10.15372/SEJ20200501](https://doi.org/10.15372/SEJ20200501)
103. Мордкович В.Г., Шатохина Н.Г., Титлянова А.А. *Степные катены*. Новосибирск. Наука. 1985. 117 с.
104. Моторина Л.В. *Естественное восстановление биогеоценозов и рекультивация земель, нарушенных при открытой добыче полезных ископаемых* // Общие проблемы биогеоценологии. 1986. Т. 2. С. 44-46.
105. *Определитель коллембол фауны России и сопредельных стран. Сем. Hypogastruridae* / Н.М. Чернова (ред.) М. Наука. 1994. 336 с.
106. *Определитель коллембол фауны СССР* / Бабенко А.Б. (сост). Чернова Н.М., Стриганова Б.Р. (ред.) М. Наука. 1988. 214 с.
107. *Определитель обитающих в почве клещей: Sarcoptiformes* / Гиляров М.С., Криволицкий Д.А. (ред.). М., Наука, 1975. 491 с.
108. *Определитель обитающих в почве клещей: Trombidiformes* / Гиляров М.С. (ред.). М., Наука, 1977. 491 с.
109. *Определитель обитающих в почве клещей: Mesostigmata* / Гиляров М.С. (ред.). М., Наука, 1978. 491 с.
110. *Определитель обитающих в почве личинок насекомых* / Гиляров М.С. (ред.). М. Наука. 1964. 919 с.
111. Перель Т.С. *Распространение и закономерности распределения дождевых червей фауны СССР*. М. Наука. 1979. 272 с.
112. Покаржевский А.Д. *Участие почвенных сапрофагов в миграции зольных элементов в лесостепных биогеоценозах* // Биота основных геосистем Центральной лесостепи. М. ИГАН СССР. 1976. С. 96-108.
113. Покаржевский А.Д. О питании двупарноногих многоножек мертвыми корнями в луговой степи // *Доклады АН СССР*. 1981. Т. 256. № 6. С. 1510-1511.
114. Покаржевский А.Д., Гордиенко С.А. Почвенные животные в биогенной миграции фосфора в лесостепных экосистемах // *Экология*. 1984. № 3. С. 34-37.
115. Покаржевский А.Д., Криволицкий Д.А. Круговорот элементов и структура сообществ животных в лесостепи // *Экология*. 1981. № 4. С. 67-72.
116. Покаржевский А.Д., Татищева И.Г. *Динамика E. nordenskioldi в лугово-степных местообитаниях* // *Материалы III Всесоюз. совещания "Вид и его продуктивность в ареале"*. Вильнюс. 1980. Ч. 1. С. 35-38.
117. Потоцкая В.А. *Определитель личинок коротконадкрылых жуков (Staphylinidae) Европейской части СССР*. М. Наука. 1967. 119 с.
118. *Почвенная фауна Среднего Поволжья*. М. Наука. 1964. 174 с.
119. *Программа и методика биогеоценологических исследований*. М. Наука. 1966. 313 с.
120. Раунер Ю.Л. *Некоторые итоги климатологических исследований в лесостепи Средне-Русской возвышенности* // Биогеографическое и ландшафтное изучение лесостепи. М. Наука. 1972. С. 35-57.
121. Реймерс Н.Ф. *Основные биологические понятия и термины*. М. Просвещение. 1988. 319 с.
122. Реймерс Н.Ф., Яблоков А.В. *Словарь терминов и понятий, связанных с охраной живой природы*. М. Наука. 1982. 144 с.
123. Роде А.А. *Водный режим почв и его типы* // Почвоведение. 1956. № 4. С. 1-23.
124. Семенова Л.М. Особенности строения кутикулы почвенных насекомых в сравнении с водными и наземными как приспособление к условиям существования // *Журнал общей биологии*. 1960. Т. 21. С. 34-40.
125. Семенова Л.М. Зависимость строения кутикулы губоногих (Chilopoda) от условий существования // *Зоологический журнал*. 1961. Т. 40. № 5. С. 686-693.
126. Стамп Л.Д. *Словарь биогеографических терминов*. М. Прогресс. 1975. Т. 1. 407 с., Т. 2. 394 с.
127. Стебаев И.В., Волковинцев В.В. Животное население почв северной части Барабинской лесостепи и водный режим почв // *Зоологический журнал*. 1964. Т. 43. № 10. С. 1425-1439.

128. Стебаев И.В., Гукасян А.Б., Наплекова Н.Н. Саранчовые (Acrididae) и чернотелки (Tenebrionidae) как стимуляторы микробиологических процессов в почвах сухих степей Тувинской автономной республики // *Почвоведение*. 1964. № 9. С. 89-98.
129. Стебаев И.В., Колпаков В.Э. Роль экоморф в почвенно-зоологическом учении и первая попытка их классификации // *Зоологический журнал*. 2003. Т. 82. № 2. С. 224-228.
130. Стебаева С.К. Жизненные формы ногохвосток (Collembola) // *Зоологический журнал*. 1970. Т. 49. № 10. С. 1437-1454.
131. Стебаева С.К., Андриевский В.С. Ногохвостки (Collembola) и панцирные клещи (Oribatei) на бурогольных отвалах Сибири // *Зоологический журнал*. 1997. Т. 76. № 9. С. 1004-1015.
132. Стойко Т.Г., Булавкина О.В., Мазей Ю.А. Структура сообщества наземных раковинных моллюсков в лесостепной катене // *Зоологический журнал*. 2009. Т. 88. № 10. С. 1155-1162.
133. Стриганова Б.Р. *Закономерности строения органов питания личинок жесткокрылых*. М. Наука. 1966. 128 с.
134. Стриганова Б.Р. *Питание почвенных сапрофагов*. М. Наука. 1980. 242 с.
135. Стриганова Б.Р. Определение пищевого рациона у дождевых червей *Nicodriellus caliginosis* и *Eisenia nordenskioldi* (Lumbricidae, Oligochaeta) // *Доклады АН СССР*. 1982. Т. 226. С. 500-503.
136. Стриганова Б.Р., Кудряшева И.В., Туинов А.В. Пищевая активность дождевых червей *Eisenia nordenskioldi* (Eisen) (Oligochaeta, Lumbricidae) в лесостепных дубравах и их участие в деструкционных процессах // *Почвоведение*. 1987. № 1. С. 72-77.
137. *Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы Т. 1. Биогеоценозы и их компоненты* / Ковалев Р.В. (ред.) Новосибирск. Наука. 1974. 315 с.
138. *Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы. Т. 2. Биогеоценозические процессы* / Ковалев Р.В. (ред.) Новосибирск. Наука. 1976. 496 с.
139. *Сукцессии и биологический круговорот* / Курачев В.М. (ред.) Новосибирск. Наука. 1993. 157 с.
140. Тихомирова А.Л. *Морфо-экологические особенности и филогенез стафилинид (с каталогом фауны СССР)*. М. Наука. 1973. 191 с.
141. Тихоненков Д.В., Белякова О.И., Мазей Ю.А. Локальные и региональные факторы и пространственное распределение гетеротрофных жгутиконосцев наземных биотопов // *Зоологический журнал*. 2013. Т. 92. № 4. С. 379-388. DOI: [10.7868/S0004451341304017X](https://doi.org/10.7868/S0004451341304017X)
142. Утехин В.Д. *Растительный покров территории Курского стационара и его продуктивность* // Биогеографическое и ландшафтное изучение лесостепи. М. Наука. 1972. С. 143-179.
143. Утехин В.Д. *Первичная биологическая продуктивность лесостепных экосистем*. М. Наука. 1977. 144 с.
144. Утробина Н.М. *Обзор жуужелиц Среднего Поволжья* // Почвенная фауна Среднего Поволжья. М. Наука. 1964. С. 93-120.
145. Чернов Ю.И. *Некоторые особенности структуры животного населения европейской лесостепи на примере беспозвоночных* // Структура и функционально-биогеоценозическая роль животного населения суши. М. Изд-во МОИП. 1967. С. 7-10.
146. Чернов Ю.И., Ходашова К.С., Злотин Р.И. Наземная биомасса и некоторые закономерности ее зонального распределения // *Журнал общей биологии*. 1967. Т.28. №2. С.188-197.
147. Чернышов В.А., Мазей Ю.А. Сообщества почвообитающих раковинных амёб в биогеоценозах подгаежной зоны Западной Сибири и их изменения вдоль ландшафтных катен // *Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского*. 2010. № 21. С. 66-73.
148. Чеснова Л.В., Стриганова Б.Р. *Почвенная зоология — наука XX века*. М. Янус-К. 1999. 156 с.
149. Шарова И.Х. Морфо-экологические типы личинок жуужелиц (Carabidae) // *Зоологический журнал*. 1960. Т. 39. № 5. С. 691-708.
150. Шарова И.Х. *Жизненные формы жуужелиц (Coleoptera, Carabidae)*. М. Наука. 1981. 360 с.
151. Шарова И.Х., Лапшин Л.В. Биотопическое распределение и численность жуужелиц в Восточной Оренбургской лесостепи // *Ученые записки МГПИ*. 1971. Т. 46. С. 87-97.
152. *Arnoldi K.V., Ghilarov M.S. Die Wirbellosen in Boden und in der Streu als Indikatoren der Besonderheiten der Bodennund Phlanzenzendecke der Waldsteppenzone* // *Pedobiologia*. 1963. Bd.2. S.183-222.
153. *Azarkina G.N., Lyubechanskii I.I., Trilikauskas L.A., Dudko R.Yu., Bepalov A.N., Mordkovich V.G. A checklist and zoogeographic analysis of the spider fauna (Arachnida: Aranei) of Novosibirsk Region (West Siberia, Russia)* // *Arthropoda Selecta*. 2018. Vol. 27. № 1. P. 73-93. DOI: [10.15298/arthsel.27.1.11](https://doi.org/10.15298/arthsel.27.1.11)
154. *Azarkina G.N., Trilikauskas L.A. Spider Fauna (Aranei) Of The Russian Altai, Part I: Families Agelenidae, Araneidae, Clubionidae, Corinnidae, Dictynidae And Eresidae* // *Euroasian Entomological Journal*. 2012. Vol. 11. № 3. P. 199-208.
155. *Azarkina G.N., Trilikauskas L.A. Spider Fauna (Aranei) Of The Russian Altai, Part Ii: Families Gnaphosidae, Hahniidae, Linyphiidae, Liocranidae And Lycosidae* // *Euroasian Entomological Journal*. 2013a. Vol. 12. № 1. P. 51-67.
156. *Azarkina G.N., Trilikauskas L.A. New Data On Spider Fauna (Aranei) of The Russian Altai, Part III: Families Mimetidae, Miturgidae, Oxyopidae, Philodromidae, Pholcidae, Pisauridae, Salticidae, Sparassidae, Tetragnathidae,*

- Theridiidae, Thomisidae, Titanoecidae, Uloboridae And Zoridae // *Euroasian Entomological Journal*. 2013b. Vol. 12. № 3. P. 243-254.
157. Chernova N.M., Byzova Ju.B., Chernova A.I. Relationship of number, biomass and gaseous exchange rate indices in microarthropods in substrates with various organic matter contents // *Pedobiologia*. 1971. Bd. 11. P. 306-314.
158. Edwards C.A.T. *Relationship between weights, volumes and numbers of soil animals* // *Progress in Soil Biology*. Graff O. and Satchel J.E. (Eds.), Amsterdam: North-Holland Publishing Company. 1967. P. 585-596.
159. Forsslund K.H. Studien über die Tierwelt des nordschwedischen Waldbodens. // *Medd. St. Skogsforsoksanst. 1943 (1944)*. 34: 1-264.
160. France R. *Das Edaphon*. Stuttgart. 1921. 99 p.
161. Frenzel G. *Untersuchungen über die Tierwelt des Wiesenbodens*. G. Fischer. Jena. 1936. 130 p.
162. Gurina A.A., Dudko R.Y., Tshernyshev S.E., Legalov A.A., Zinovyev E.V. Late pleistocene insects from the Dubrovino site at Ob river (West Siberia, Russia) and their paleoenvironmental significance // *Palaeontologia Electronica*. 2019. V. 22. № 1. DOI: [10.26879/914](https://doi.org/10.26879/914)
163. Iakovlev I.K., Novgorodova T.A., Reznikova Z.I., Tiunov A.V. Trophic position and seasonal changes in the diet of the red wood ant *Formica aquilonia* as indicated by stable isotope analysis // *Ecological Entomology*. 2017. V. 42. № 3. P. 263-272. DOI: [10.1111/een.12384](https://doi.org/10.1111/een.12384)
164. Nielsen C.J. Respiratory metabolism of some populations enchytraeid worms and free living nematodes // *Oikos*. 1961. Vol. 12. No. 1. P. 17-35. DOI: [10.2307/3565169](https://doi.org/10.2307/3565169)
165. Novenko E.Y., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Tsyganov A.N., Payne R.J., Chernyshov V.A. et al. Vegetation dynamics and fire history at the southern boundary of the forest vegetation zone in European Russia during the middle and late Holocene // *The Holocene*. 2018. V. 28. № 2. P. 308-322. DOI: [10.1177/0959683617721331](https://doi.org/10.1177/0959683617721331)
166. Samoylova E.S., Tiunov A.V. Flexible trophic position of polyphagous wireworms (Coleoptera, Elateridae): a stable isotope study in the steppe belt of Russia // *Applied Soil Ecology*. 2017.V. 121. P. 74-81. DOI: [10.1016/j.apsoil.2017.09.026](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.026)
167. Zinovyev E.V., Dudko R.Y., Gurina A.A., Tsepelev K.A., Tshernyshev S.E., Kostyunin A.E. et al. First records of sub-fossil insects from quaternary deposits in the southeastern part of West Siberia, Russia // *Quaternary International*. 2016. V. 420. P. 221-232. DOI: [10.1016/j.quaint.2015.09.023](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.023)

Поступила в редакцию 05.03.2021; принята 22.03.2021; опубликована 10.04.2021

Сведения об авторах:

Мордкович Вячеслав Генрихович – д.б.н., проф., г.н.с. лаборатории экологии беспозвоночных животных Института систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск, Россия; mordkovichvg@rambler.ru

Любечанский Илья Игоревич – к.б.н., с.н.с. лаборатории экологии беспозвоночных животных Института систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск, Россия; lubech@gmail.com

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 INVERTEBRATES OF THE RUSSIAN FOREST-STEPPE (REVIEW OF THE 20-21 CENTURY PUBLICATIONS AND REVISION OF THE RESULTS)

© 2021 V. G. Mordkovich, I.I. Lyubechanskii 

Address: Institute of Systematics and Ecology of Animals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: lubech@gmail.com

The review describes the main stages of the formation and development of soil zoology as a science at the intersection of zoology, ecology and soil science, approximately over a century, i.e. from the beginning of the 1920s until now. The analysis of soil-zoological work carried out in the forest-steppe zone, the subject of which was the fauna and population of soil protozoa, worms, molluscs, microarthropods and larger arthropods, collectively referred to as mesofauna. The forest-steppe was chosen as the topic of the review because it is well-studied and because most of the work on this biome was published in Russian, and little is known abroad (which is not surprising, since more than 80% of the forest-steppe territory is located in Russia). The authors reviewed about 170 the most significant works inventoring soil fauna, analyzing its ecological structure and the functional role of its various components, as well as the studies of the anthropogenic impact on soil animal populations. The works are presented on a territorial basis: the west of

the European part of the USSR (Russia), the Volga region and West Siberia. The high species richness and originality of the soil fauna in the forest-steppe, its high resistance to natural and anthropogenic influences were shown. At the end, the review indicates some promising directions for soil fauna research in the Russian forest-steppe.

Key words: soil zoology; ecology; history of science; fauna; community structure; functional role

How to cite: Mordkovich V.G., Lyubchanskii I.I. Soil invertebrates of the Russian forest-steppes (review of XX-XXI century publications and the revision of the results) // *The Journal of Soils and Environment*. 2020. 3(4). e131. doi: [10.31251/pos.v3i4.131](https://doi.org/10.31251/pos.v3i4.131) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Azheganova N.S. *Brief manual for the identification of spiders (Aranei) of the forest- and forest-steppe zones of the USSR*. Leningrad: Nauka Publ., 1968, 149 p. (in Russian)
2. Aleinikova M.M. *Soil fauna of the different landscapes of the Middle Volga region* In book: Soil fauna of the Middle Volga region. Moscow: Nauka Publ., 1964, p. 5-51. (in Russian)
3. Aleinikova M.M., Utrobina N.M. *Fauna of Tenebrionidae and their distribution in the Middle Volga region* In book: Soil fauna of the Middle Volga region. Moscow: Nauka Publ., 1964, p. 52-67. (in Russian)
4. Alekhin V.V. *Flora of the Central Chernozem state nature reserve* In book: Works of the Central Chernozem state nature reserve, No 1, 1940, p. 8-144. (in Russian)
5. Arnoldi K.V. On the theory of the areal in connection with the ecology and origin of populations, *Zoologicheskii Zhurnal* 1957, Vol. 36, No11, p. 1609-1629. (in Russian)
6. Arnoldi K.V. *Forest-steppe of the Russian Plain and an attempt at its zoogeographic and cenological characteristics based on the study of insects* In book: Transactions of the Central Chernozem state nature reserve. No 8. Voronezh, 1965, p.138-166. (in Russian)
7. Arnoldi K.V., Sharova I.Kh., Klyukanova G.N., Butrina N.N. *Ground beetles (Carabidae, Coleoptera) of the Streletskaya steppe near Kursk and their seasonal dynamics of activity* In bok: Fauna and ecology of animals. Moscow: MGPI Publ., 1972, p. 215-230. (in Russian)
8. Afanasyeva E.A. *Chernozem of the Central Russian Plain*. Moscow: Nauka Publ. 1966. 224 p. (in Russian)
9. Babenko A.B. Dynamics of soil microarthropods during overgrowing of technogenic dumps, *Zoologicheskii Zhurnal*, 1982, Vol. 61. No 12, p. 1815-1825. (in Russian)
10. Babenko A.B., Potapov M.B., Stebaeva R.K., Chernova N.M. *Keys to collembolans of the fauna of Russia and neighboring countries. Family Hypogastruridae*. Moscow: Nauka Publ., 1994, p. 1-336. (in Russian)
11. Berg L.P. *Geographic zones of the Soviet Union*. Moscow: Geographgiz, 1947, 401 p. (in Russian)
12. Berg L.P. *The nature of the USSR*. Moscow: Geographgiz, 1955, 494 p. (in Russian)
13. Berezina O.G. The springtails (Hexapoda, Collembola) on the salty lake catenas of the southern forest-steppe of West Siberia на катенах соленых озер южной лесостепи Западной Сибири // *Euroasian Entomological Journal*. 2006. V. 5. No 3. P. 199-202. (in Russian)
14. Berezina O.G. The spatial structure of springtails community (Hexapoda, Collembola) of the southern forest-steppe of Western Siberia, *Euroasian Entomological Journal*, 2008, Vol. 7, No 3, p. 196-202. (in Russian)
15. Bepalov A.N., Dudko R.Yu., Lyubchanskii I.I. Additions to the ground beetle fauna (Coleoptera, Carabidae) of the Novosibirsk Oblast: do the southern species spread to the north? // *Euroasian Entomological Journal*, 2010, Vol. 9, No 4, p. 625–628. (in Russian)
16. *Biogeographic and landscape study of the forest-steppe*. Ed. D.L. Armand. Moscow: Nauka Publ., 1972, 197 p. (in Russian)
17. Bobrinsky N.A. *Fauna and nature of the USSR*. Moscow: MOIP Publ., 1948, 251 p. (in Russian)
18. Bogorodskaya A.V., Krasnoshchekova E.N., Trefilova O.V., Shishikin A.P. Seasonal dynamics of the development of microbocenoses and invertebrate complexes on overburden dumps of the Borodinsky lignite open-pit mine (KATEK) // *Geography and natural resources*. 2010. No. 4. P. 36-45. (in Russian)
19. Bulanova-Zakhvatkina E.M. *Oribatid mites*. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1967, 254 p. (in Russian)
20. Byzova Yu.B. Dependence of oxygen consumption on lifestyle and body size by the example of an earthworm (Oligochaeta, Lumbricidae) // *Journal of General Biology*, 1965, Vol. 26, No. 5, p. 555-561.
21. Byzova Y.B. *Respiration of soil invertebrates*. Moscow: KMK Publ., 2007, 336 p. (in Russian)
22. Bykov B.A. *Ecological Dictionary*. Alma-Ata. Nauka Publ., 1988, 248 p. (in Russian)
23. Vernadsky V.I. *Philosophical thoughts of a naturalist*. Moscow: Nauka Publ., 1988, 520 p. (in Russian)
24. Volkovintser V.V. *Ecological structure of mesogeobia* In book: Structure, functioning and evolution of the system of biogeocenoses in Baraba. Vol. 1. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974, p. 267-279. (in Russian)
25. Volkovintser V.V. *Dynamics of the composition of the animal population of soils* In book: Structure, functioning and evolution of the system of biogeocenoses in Baraba. Vol. 2. Novosibirsk: Nauka Publ., 1976, p. 416-428. (in Russian)
26. Vsevolodova-Perel V.P. *Earthworms of the fauna of Russia. Cadastre and identification keys*. Moscow: Nauka Publ., 1997, 102 p. (in Russian)

27. Gatilova F.G. *To the fauna of oribatid mites (Oribatei) of the forest-steppe of the Volga Upland* In book: Soil fauna of the Middle Volga region. Moscow: Nauka Publ., 1964, p. 120-132. (in Russian)
28. Geltser Yu.G., Korganova G.A., Alekseev D.A. *Identification keys to soil-living shell amoebas*. Moscow: Moscow State University Publ., 1995, 87 p. (in Russian)
29. Gertsyk V. V. *Change of the forest-steppe natural complex from forest to steppe across the edge* // Transactions of the Central Chernozem Reserve. No 8. Voronezh: Publishing House of Voronezh University, 1965, p. 291-321. (in Russian)
30. Gilyarov M.S. The ratio of the size and number of soil invertebrates, *Reports of the Academy of Sciences of the USSR, 1944, Vol. 43, No. 6, p. 283-285*. (in Russian)
31. Gilyarov M.S. *Features of soil as a habitat and its importance in the evolution of insects* Moscow-Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1949, 181 p. (in Russian)
32. Gilyarov M.S. Some general problems of the evolutionary morphology of invertebrates, *Advances in modern biology, 1960a, Vol. 49, No. 2, p. 215-224*. (in Russian)
33. Gilyarov M.S. *Soil invertebrates as indicators of the characteristics of the soil and vegetation cover of the forest-steppe* In book: Transactions of the Central Chernozem Reserve, No. 6, 1960b, p. 283-318. (in Russian)
34. Gilyarov M.S. *The main morphological types of beetle larvae* In book: Keys to insect larvae inhabiting the soil. Moscow: Nauka Publ., 1964, p. 61-63. (in Russian)
35. Gilyarov M.S. *Principles of arthropods adaptation to life in the terrestrial environment*. Moscow: Nauka Publ., 1970, 275 p. (in Russian)
36. Gilyarov M.S. *Ecological principles of the evolution of terrestrial animals. Selected works*. Moscow: KMK Publ., 2012, 594 p. (in Russian)
37. Gilyarov M.S., Chernov Yu.I. *Soil invertebrates in the communities of the temperate zone* In book: Biosphere resources (Results of Soviet research under the International Biological Program). Ed. Rodin L.E., Smirnov N.N. Issue 1. Leningrad: Nauka, 1975, p. 218-240. (in Russian)
38. Glazovskaya M.A., Gennadiev A.N. *Geography of soils with the basics of soil science*. Moscow: Moscow State University Publ., 1995, 246 p. (in Russian)
39. Goryshina V.K., Nitsenko A.A., Grebenshchikov O.P. *Terminological Dictionary of Ecology, Geobotany and Soil Science. Leningrad*: Leningrad State University, 1988, 248 p. (in Russian)
40. Grechanichenko T.E., Guseva N.A. Specific features of carabid populations (Coleoptera, Carabidae) in forest biotopes of Central forest-steppe // *Zoologicheskii Zhurnal, 2000, Vol. 79, No 5, p. 548-555*. (in Russian)
41. Grechanichenko T.E., Guseva N.A. Structure and dynamics of carabid community (Coleoptera, Carabidae) in meadow steppe, *Zoologicheskii Zhurnal, 1999, Vol. 78, No 4, p. 442-450*. (in Russian)
42. Davydova M.S., Nikolsky V.V. *Gamasid mites of Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ: 1986, 126 p. (in Russian)
43. Dzyuba G.M. *Types of soil climates and microclimates of the Baraba lowland* In book: Soil climate. Leningrad, 1971, p. 95-108. (in Russian)
44. Dmitrienko V.K. *Dynamics of invertebrate communities in the soils of industrial dumps in the western zone of KATEK, used for forest growing* In book: Current state of biocenoses in the western zone of KATEK. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1990 p. 186-197. (in Russian)
45. Dmitrienko V.K., Shaimuratova N.P. The structure of pedobiont complexes of the reclaimed lands of the western zone of KATEK // *Geography and natural resources, 1986, No. 4, p. 81-85*. 49. (in Russian)
46. Dogel V.A. Quantitative studies of terrestrial fauna/ An essay of quantitative analysis of the fauna of meadows, *Revue Zoologique Russe, 1924, Vol. 4, No 1-2, p. 117-154*. (in Russian)
47. Dokuchaev V. V. *The doctrine of zones of nature*. Moscow: Geografiz Publ., 1948, 64 p. (in Russian)
48. Dolin V.G. *Keys to the larvae of click-beetles (Elateridae) of the fauna of the USSR*. Kiev: Urozhai Publ., 1978, 124 p.
49. Dudko R. Ju., Lyubchanskii I.I. Faunal and zoogeographic analysis of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) of Novosibirsk Oblast', *Euroasian Entomological Journal, 2002, Vol. 1, No 1, p. 30-45*. (in Russian)
50. Zaleskaya N.V. *Key to the centipedes of the USSR (Chilopoda, Lithobiomorpha)*. Moscow: Nauka Publ., 1978, 212 p. (in Russian)
51. Zakharov A.A., Chernova N.M. *Mercury Sergeevich Gilyarov. A brief outline of scientific-organizational, pedagogical and social activities* In book: Bibliography of scientists of the USSR. Moscow: Nauka Publ., 1990, p. 11-28. (in Russian)
52. Zlotin R.I., Khodashova K.P. *The role of animals in the biological cycle of forest-steppe ecosystems*. Moscow: Nauka Publ., 1974, 220 p. (in Russian)
53. Zlotin R.I. *Zonal features of the biomass of soil invertebrates in the open landscapes of the Russian Plain* In book: Problems of soil zoology, Moscow: Nauka Publ., 1969, p. 75-77. (in Russian)
54. Zonn P.V. *Soils* In book: Middle zone of the European part of the USSR. Moscow: Nauka Publ., 1967, p. 181-190. (in Russian)
55. Isakov Yu.A., Panfilov D.V. *Zonal features of the resources of the animal world of the USSR* In book: VINITI. Results of science. Geography. No 7. Resources of the animal world of the USSR (geography of reserves; use, reproduction). Moscow, 1969, p. 7-45. (in Russian)

56. *Inventory of communities of soil-inhabiting invertebrates (mesofauna) of natural ecosystems of the Republic of Tatarstan*. Kazan University, 2014, 308 p. (in Russian)
57. Keleinikova R.I. About larval types of darkling beetles (Coleoptera, Tenebrionidae) of the Palearctic, *Entomological Review*, 1963, Vol. 42, No. 3, p. 539-549. (in Russian)
58. Kirikov P.V. *Changes in the fauna in natural zones of the USSR (XIII-XIX centuries): Steppe zone and forest-steppe*. Moscow: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1959, 175 p. (in Russian)
59. Kozlovskaya L.P., Belous A.P. *Changes in the organic part of plant residues under the influence of oligochaetes* In book: Relationships between forest and bog. Moscow, 1967, p.43-55. (in Russian)
60. Kozlovskaya L.P., Zhdannikova E.N. *Interaction of earthworms and soil microflora* In book: Moist forests and bogs of Siberia. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, 1963, p. 183-217. (in Russian)
61. Kozlovskaya L.P., Zagurskaya L.M. *Enchitreids and soil microflora* In book: Microorganisms in the fight against forest pests. Moscow: Nauka Publ., 1966, p. 29-41. (in Russian)
62. Krivolutsky D.A. Soil mites (Oribatei) in the soils of the Streletsky area of the Central Chernozem Reserve (Kursk region) // *Pedobiologia*, 1962, Bd. 4, Hf. 1, p. 53-65. (in Russian)
63. Krivolutsky D.A. Morpho-ecological types of mites (Acariformis, Oribatei), *Zoologicheskii Zhurnal*, 1965, Vol. 44, No. 8, p. 1168-1181. DOI: [10.2307/3565019](https://doi.org/10.2307/3565019) (in Russian)
64. Krivolutsky D.A. The concept of "life form" in animal ecology, *Journal of General Biology*, 1967, Vol. 28, No.2. P.153-161. (in Russian)
65. Krivolutskiy D.A. Some patterns of zonal distribution of oribatid mites, *Oikos*, 1968, Vol. 19, p. 339-344. DOI: [10.2307/3565019](https://doi.org/10.2307/3565019) (in Russian)
66. Krivolutskiy D.A. The role of oribatid mites in biogeocenoses // *Zoologicheskii Zhurnal* 1976. V. 55. No. 2. P. 226-236. (in Russian)
67. Krivolutsky D.A. Oribatid mites as indicators of soil conditions, *Results of Science and Technology. Ser. Zoology of invertebrates*, 1978, Vol. 5, p. 70-134. (in Russian)
68. Krivolutsky D.A., Pokarzhevsky A.D., Sizova M.G. *Soil fauna in the cadastre of the animal world*. Rostov University Publ., 1985, 96 p. (in Russian)
69. Krivosheina N.P. On some morpho-ecological types of Diptera larvae, *Journal of General Biology*, 1959, Vol. 20, No. 5, p. 405-408. (in Russian)
70. Krivosheina N.P. *The main morphological types of soil dipteran larvae* In book: Keys to insect larvae inhabiting soil, Moscow: Nauka Publ., 1964, p. 615-617.
71. Kuznetsova N.A. *Organization of communities of soil-living collembolans*. Moscow: Prometheus Publ., 2005, 243 p. (in Russian)
72. Kurcheva G.F. *The degree of participation of invertebrates in the process of decomposition of oak litter in the forest and the dependence of their activity on weather conditions* In book: Transactions of the Central Chernozem Reserve. No 8. Voronezh: Voronezh University, 1965, p. 167-192. (in Russian)
73. Kurcheva G.F. *The role of soil animals in the decomposition and humification of plant residues*. Moscow: Nauka Publ., 1971, 156 p. (in Russian)
74. Lavrenko E.M. *The question of the relationship between the steppe and the forest at a new stage* In book: Problems of physical geography. Moscow: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1950, Vol. 16, p. 124-132. (in Russian)
75. Lepinis A.K., Geltser Yu.G., Chibisova O.I., Geptner V.A. *Keys to Protozoa of soils in the European part of the USSR*. Vilnius: Mitar Publ., 1973, 171 p. (in Russian)
76. Lokshina I.E. *Keys to centipedes (Diplopoda) of the plain part of the European territory of the USSR*. Moscow: Nauka Publ., 1969, 79 p. (in Russian)
77. Lyubechanskii I.I. Carabid beetles community of the typical habitats in southern forest-steppe (West Siberia), *Euroasian Entomological Journal*, 2009, Vol. 8, No 3, p. 315-318. (in Russian)
78. Lyubechanskii I.I., Dudko R.Ju., Tiunov A.V., Mordkovich V.G. Trophic structure of ground-dwelling insects in the coastal zone of a salt lake in Southern Siberia based on the data of isotopic analysis, *Arid Ecosystems*, Vol. 5., No. 4, p. 222-229. (in Russian)
79. Mazei Yu.A., Embulaeva E.A. Changes of soil-inhabited testate amoebae communities along forest-steppe gradient in the Middle Volga region, *Arid Ecosystems*, 2009, Vol. 15, No 1 (37), p. 13-23. (in Russian)
80. Martynova E.F. *Order Podura (Collembola) – springtails, or podura* In book: Keys to insects of the European part of the USSR. Vol.1. Ed. G.Ya. Bey-Bienko. Leningrad: Nauka Publ., 1964, p. 42-101. (in Russian)
81. *Methods of soil-zoological research.* / Ed. Gilyarov M.P. Moscow: Nauka Publ., 1975, 274 p. (in Russian)
82. Milkov F.N. *Forest-steppe of the Russian Plain. Experience in landscape characterization*. Moscow, Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1950, 296 p. (in Russian)
83. Milkov F.N. Forest-steppe landscape and its zonal subdivision, *Izvestiya AN SSSR, Geographic Series*, 1951, No. 5, p. 3-14. (in Russian)
84. Milkov F.N. The relationship between forest and steppe and the problem of displacement of landscape zones on the Russian Plain, *News of the Soviet Geographical Society*, 1952, Vol. 84, No. 5, p. 431-447. (in Russian)
85. Milkov F.N. *A few words in defense of the forest-steppe geographical zone* In book: Soviet. Geogr. Society. 1957, V. 89, No. 6, p. 548-550. (in Russian)

86. Milkov F.N. *Natural zones of the USSR*. Moscow: Mysl Publ., 1964, 326 p. (in Russian)
87. Mordkovich V.G. The population of herpetobiont beetles (Coleoptera: Carabidae, Tenebrionidae, Silphidae) in the microlandscapes of the north of the Baraba forest-steppe and its changes under the influence of human economic activity, *Zoologicheskii Zhurnal*, 1964, Vol. 43, No. 5, p. 680-694. (in Russian)
88. Mordkovich V.G. The order of predominance of the mesoherpetobium ecological groups in the process of seasonal development of communities in the Baraba forest-steppe, *Zool.Zh.*, 1973, Vol. 52, No 10, p. 1490-1497. (in Russian)
89. Mordkovich V.G. *Composition of mesoherpetobial communities and their classification* In book: Structure, functioning and evolution of the Baraba biogeocenoses. Vol. 1. Novosibirsk: Nauka Publ., 1974, p. 258-266. (in Russian)
90. Mordkovich V.G. *Dynamics of the composition and abundance of mesoherpetobium as an indicator of the successional process* In book: Structure, functioning and evolution of the Baraba biogeocenoses. Vol. 2. Novosibirsk: Nauka Publ., 1976, p. 401-415. (in Russian)
91. Mordkovich V.G. *Zoological diagnostics of soils in the forest-steppe and steppe zones of Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1977. 110 p. (in Russian)
92. Mordkovich V.G. *Steppe ecosystems*. Moscow. Nauka Publ., 1982. 206 p. (in Russian)
93. Mordkovich V.G. Zoological successions on young technogenic catenas and the principle of space-time analogs, *Izvestiya RAN. Ser. Biol.*, 1994, No. 3, p. 446-452. (in Russian)
94. Mordkovich V.G. Features of structural organization and biogeographical status of insect complexes in the West Siberian forest-steppe, *Euroasian Entomological Journal*, 2006, Vol. 5, No. 3, p. 181-189. (in Russian)
95. Mordkovich V.G. Phenomenon of forest-steppe from an entomological point of view, *Euroasian Entomological Journal*, 2007, Vol. 6, No. 2, p. 123-128. (in Russian)
96. Mordkovich V.G., Barkalov A.V., Vasilenko S.V., Grishina L.G., Dubatolov V.V., Dudko R.Yu., Zinchenko V.K., Zolotareno G.S., Legalov A.A., Marchenko I.I., Chernyshev S.E. Species richness of arthropods in West-Siberian Plane, *Euroasian Entomological Journal*, 2002, Vol. 1, No. 1, p. 3-10. (in Russian)
97. Mordkovich V.G., Lyubchanskii I.I. Zonal-catenal order of ecological ordination in carabids (Coleoptera, Carabidae) from the West Siberian Plain, *Uspekhi sovremennoi biologii*, 1998, Vol. 118, No. 2, P.205-215. (in Russian)
98. Mordkovich V.G., Lyubchanskii I.I. Ecological groups of ground beetle species (Coleoptera, Carabidae): characteristics, principles of isolation, composition and demand for environmental research, *Euroasian Entomological Journal*, 2010, Vol. 9, No. 2, p. 195-202. (in Russian)
99. Mordkovich V.G., Lyubchanskii I.I. Ground Beetles (Coleoptera, Carabidae) and Zoodiagnostics of Ecological Succession on Technogenic Catenas of Brown Coal Dumps in the KAFEC area (Krasnoyarsk Krai), *Biology Bulletin*, 2019, Vol. 46, No. 5, p. 500–509. (in Russian) DOI: [10.1134/S106235901905008X](https://doi.org/10.1134/S106235901905008X)
100. Mordkovich V.G., Lyubchanskii I.I. Zoological Aspects of Ecological Succession on the Graded-Flat Dump of the Nazarovo Lignite Open-Cast Mine in Krasnoyarsk Krai, *Contemporary Problems of Ecology*. 2019, Vol. 12, No. 4, p. 346–359. (in Russian) DOI: [10.1134/S1995425519040073](https://doi.org/10.1134/S1995425519040073)
101. Mordkovich V.G., Lyubchanskii I.I., Berezina O.G., Marchenko I.I., Andrievsky V.S. *Zooedaphon of the western Siberian northern taiga*. Moscow: KMK Publ., 2014, 168 p. (in Russian)
102. Mordkovich V.G., Khudyaev R.A., Dudko R.Yu., Lyubchanskii I.I. Zoological Indication of Climate Change in the Central Kazakh Steppe Compared to the Middle of the 20th Century Using the Example of Carabid and Tenebrionid Beetles, *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, Vol. 13, No. 5, p. 443–468. DOI: [10.1134/S1995425520050078](https://doi.org/10.1134/S1995425520050078)
103. Mordkovich V.G., Shatokhina N.G., Titlyanova A.A. *Steppe catenas*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985, 117 p.
104. Motorina L.V. *Natural restoration of biogeocenoses and reclamation of lands disturbed by open mining* In book: General problems of biogeocenology, 1986, Vol. 2, p. 44–46. (in Russian)
105. *Keys to collembolans of the fauna of Russia and neighboring countries. Family Hypogastruridae* / N.M. Chernova (ed.). Moscow: Nauka Publ., 1994, 336 p. (in Russian)
106. *Keys to collembolans of the fauna of the USSR* / Babenko A.B. (comp). Chernova N.M., Striganova B.R. (ed.) Moscow: Nauka Publ., 1988, 214 p. (in Russian)
107. *Identification keys to the mites inhabiting the soil: Mesostigmata* / Gilyarov M.S. (ed.). Moscow: Nauka Publ., 1978, 491 p. (in Russian)
108. *Identification keys to the mites inhabiting the soil: Sarcoptiformes* / Gilyarov M.S., Krivolutskiy D.A. (ed.). Moscow: Nauka Publ., 1975, 491 p. (in Russian)
109. *Identification keys to the mites inhabiting the soil: Trombidiformes* / Gilyarov M.S. (ed.). Moscow: Nauka Publ., 1977, 491 p. (in Russian)
110. *Keys to insect larvae inhabiting soil* / Gilyarov M.S. (ed.). Moscow: Nauka Publ., 1964, 919 p.
111. Perel V.P. *Distribution and patterns of dispersal of earthworms of the fauna of the USSR*. Moscow: Nauka Publ., 1979, 272 p. (in Russian)
112. Pokarzhevsky A.D. *Participation of soil saprophages in the migration of ash elements in forest-steppe biogeocenoses* In book: Biota of the main geosystems of the Central forest-steppe. Moscow: IGAN USSR Publ., 1976, p. 96-108. (in Russian)

113. Pokarzhevsky A. D. On the nutrition of diplopods on dead roots in the meadow steppe, *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1981, Vol. 256, No. 6, p. 1510-1511. (in Russian)
114. Pokarzhevsky A.D., Gordienko R.A. Soil animals in biogenic migration of phosphorus in forest-steppe ecosystems, *Ecology*, 1984, No. 3, p. 34-37. (in Russian)
115. Pokarzhevsky A.D., Krivolutsky D.A. The cycle of elements and the structure of animal communities in the forest-steppe, *Ecology*, 1981, No. 4, p. 67-72. (in Russian)
116. Pokarzhevsky A.D., Tatishcheva I.G. *Dynamics of E. nordenskioldi in meadow-steppe habitats* In book: Proceedings of the III USSR meeting "Species and its productivity in the area". Vilnius, 1980, Part 1, p. 35-38.
117. Pototskaya V.A. *Keys to larvae of rove beetles (Staphylinidae) of the European part of the USSR*. Moscow: Nauka Publ., 1967, 119 p. (in Russian)
118. *Soil fauna of the Middle Volga region*. Moscow: Nauka Publ., 1964, 174 p. (in Russian)
119. *Program and methodology of biogeocenological research*. Moscow: Nauka Publ., 1966, 313 p. (in Russian)
120. Rauner Yu.L. *Some results of climatological studies in the forest-steppe of the Central Russian Plain* In book: Biogeographic and landscape study of the forest-steppe. Moscow: Nauka Publ., 1972, p. 35-57. (in Russian)
121. Reimers N.F. *Basic biological concepts and terms*. Moscow: Prosvescshenie Publ., 1988, 319 p. (in Russian)
122. Reimers N.F., Yablokov A.V. *Glossary of terms and concepts related to the protection of wildlife*. Moscow: Nauka Publ., 1982, 144 p. (in Russian)
123. Rode A.A. Water regime of soils and its types, *Pochvovedenie*, 1956, No. 4, p. 1-23. (in Russian)
124. Semenova L.M. Features of the structure of the cuticle of soil insects in comparison with aquatic and terrestrial ones as an adaptation to living conditions, *Journal of General Biology*, 1960, Vol. 21, p. 34-40. (in Russian)
125. Semenova L.M. The dependence of the structure of the cuticle of the millipeds (Chilopoda) on the conditions of their existence, *Zool. Zh.*, 1961, Vol. 40, No. 5, p. 686-693. (in Russian)
126. Stump L.D. *Dictionary of biogeographic terms*. Moscow: Progress Publ., 1975, Vol. 1. 407 p., Vol. 2. 394 p. (in Russian)
127. Stebaev I.VOL., Volkovintser V. Animal population of soils in the northern part of the Baraba forest-steppe and the water regime of soils, *Zoologicheskii Zhurnal*, 1964, Vol. 43, No. 10, p. 1425-1439. (in Russian)
128. Stebaev I.V., Gukasyan A.B., Naplekova N.N. Locusts (Acrididae) and darkling beetles (Tenebrionidae) as stimulators of microbiological processes in the soils of dry steppes of the Tuva Autonomous Republic, *Pochvovedenie*, 1964, No. 9, p. 89-98. (in Russian)
129. Stebaev I.V., Kolpakov V.E. The role of ecomorphs in the theory of soil zoology and the first attempt of their classification, *Zoologicheskii Zhurnal*, 2003, Vol. 82, No. 2, p. 224-228. (in Russian)
130. Stebaeva S.K. Life forms of springtails (Collembola), *Zoologicheskii Zhurnal*, 1970, Vol. 49, No. 10, p. 1437-1454. (in Russian)
131. Stebaeva S.K., Andrievsky V.S. Collembola and Oribatei on brown coal dumps in Siberia, *Zoologicheskii Zhurnal*, 1997, Vol. 76, No. 9, p. 1004-1015. (in Russian)
132. Stoiko T. G., Bulavkina O. V., Mazei Yu. A. The structure of terrestrial shell-bearing mollusk community on forest-steppe catena, *Zoologicheskii Zhurnal*, 2009, Vol. 88, No. 10, p. 1155-1162. (in Russian)
133. Striganova B.R. *Principles of the feeding organs structure of coleopteran larvae*. Moscow: Nauka Publ., 1966, 128 p.
134. Striganova B.R. *Nutrition of soil saprophages*. Moscow: Nauka Publ., 1980, 242 p. (in Russian)
135. Striganova B.R. Determination of the diet of the earthworms *Nicodriellus caliginosis* and *Eisenia nordenskioldi* (Lumbricidae, Oligochaeta), *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1982, Vol. 226, p. 500-503. (in Russian)
136. Striganova B.R., Kudryasheva I.V., Tiunov A.V. Food activity of earthworms *Eisenia nordenskioldi* (Eisen) (Oligochaeta, Lumbricidae) in forest-steppe oak forests and their participation in destruction processes, *Pochvovedenie*. 1987. No. 1. p. 72-77. (in Russian)
- Structure, functioning and evolution of the Baraba biogeocenoses*. Vol. 1. Biogeocenoses and their components / Kovalev R.V. (ed.). Novosibirsk: Nauka Publ., 1974, 315 p. (in Russian)
137. *Structure, functioning and evolution of the Baraba biogeocenoses*. Vol. 2. Biogeocenotic processes Kovalev R.V. (ed.). Novosibirsk: Nauka Publ., 1976. 496 p. (in Russian)
138. *Successions and biological turnover* / Kurachev V.M. (ed.) Novosibirsk: Nauka Publ., 1993, 157 p. (in Russian)
139. Tikhomirova A.L. *Morpho-ecological features and phylogeny of rove beetles (with the catalog of the fauna of the USSR)*. Moscow: Nauka Publ., 1973, 191 p. (in Russian)
140. Tikhonenkov D. V., Belyakova O. I., Mazei Yu. A. Local and regional factors in spatial distribution of heterotrophic flagellates in terrestrial biotopes, *Zoologicheskii Zhurnal*, 2013, V. 92, No. 4, p. 379-388. (in Russian)
DOI: [10.7868/S004451341304017X](https://doi.org/10.7868/S004451341304017X)
141. Utekhin V.D. *Vegetation cover of the territory of the Kursk station and its productivity* // Biogeographic and landscape study of the forest-steppe. Moscow: Nauka Publ., 1972, p. 143-179. (in Russian)
142. Utekhin V.D. *Primary biological productivity of forest-steppe ecosystems*. Moscow: Nauka Publ., 1977, 144 p.
143. Utrobina N.M. *Review of ground beetles of the Middle Volga region* In book: Soil fauna of the Middle Volga region, Moscow: Nauka Publ., 1964, p. 93-120. (in Russian)

144. Chernov Yu.I. *Some features of the structure of the animal population of the European forest-steppe on the example of invertebrates*. In book: Structure and functional biogeocenotic role of the animal population of the terrestrial ecosystems. Moscow: MOIP Publ., 1967, p. 7-10. (in Russian)
145. Chernov Yu.I., Khodashova K.P., Zlotin R.I. Ground biomass and some patterns of its zonal distribution, *Journal of General Biology*, 1967, Vol.28, No. 2, p.188-197. (in Russian)
146. Chernyshov V.A., Mazei Yu.A. Communities of soil-dwelling shell amoebae in biogeocenoses of the subtaiga zone of Western Siberia and their changes along landscape catenas, *Izvestiya of the V.G. Belinsky Penza State Pedagogical University*, 2010, Vol. I, No. 21. p. 66-73. (in Russian)
147. Chesnova L.V., Striganova B.R. *Soil zoology is a science of the 20th century*. Moscow: Janus-K. Publ., 1999, 156 p. (in Russian)
148. Sharova I.Kh. Morpho-ecological types of ground beetle larvae (Carabidae), *Zoologicheskii Zhurnal*, 1960, Vol. 39, No. 5, p. 691-708. (in Russian)
149. Sharova I.Kh. *Life forms of ground beetles (Coleoptera, Carabidae)*. Moscow: Nauka Publ., 1981, 360 p. (in Russian)
150. Sharova I.Kh., Lapshin L.V. Biotopic distribution and number of ground beetles in the Eastern Orenburg forest-steppe, *Uchenye zapiski MGPI*, 1971, Vol. 46, p. 87-97. (in Russian)
151. Arnoldi K.V., Ghilarov M.S. Die Wirbelosen in Boden und in der Streu als Indikatoren der Besonderheiten der Bodenund Phlanzendecke der Waldsteppenzone, *Pedobiologia*, 1963, Bd.2, p.183–222.
152. Azarkina G.N., Lyubchanskii I.I., Trilikauskas L.A., Dudko R.Yu., Bepalov A.N., Mordkovich V.G. A checklist and zoogeographic analysis of the spider fauna (Arachnida: Aranei) of Novosibirsk Region (West Siberia, Russia), *Arthropoda Selecta*, 2018. Vol. 27, No 1, p. 73–93. DOI: [10.15298/arthsel.27.1.11](https://doi.org/10.15298/arthsel.27.1.11)
153. Azarkina G.N., Trilikauskas L.A. Spider Fauna (Aranei) Of The Russian Altai, Part I: Families Agelenidae, Araneidae, Clubionidae, Corinnidae, Dictynidae And Eresidae, *Euroasian Entomological Journal*, 2012, Vol. 11, No 3. p. 199-208.
154. Azarkina G.N., Trilikauskas L.A. Spider Fauna (Aranei) Of The Russian Altai, Part II: Families Gnaphosidae, Hahniidae, Linyphiidae, Liocranidae And Lycosidae, *Euroasian Entomological Journal*, 2013a, Vol. 12, No 1, p. 51-67.
155. Azarkina G.N., Trilikauskas L.A. New Data On Spider Fauna (Aranei) Of The Russian Altai, Part III: Families Mimetidae, Miturgidae, Oxyopidae, Philodromidae, Pholcidae, Pisauridae, Salticidae, Sparassidae, Tetragnathidae, Theridiidae, Thomisidae, Titanocidae, Uloboridae And Zoridae, *Euroasian Entomological Journal*, 2013b, Vol. 12, No 3, p. 243-254.
156. Chernova N.M., Byzova Ju.B., Chernova A.I. Relationship of number, biomass and gaseous exchange rate indices in microarthropods in substrates with various organic matter contents, *Pedobiologia*, 1971, Bd. 11, p. 306-314.
157. Edwards C.A.T. *Relationship between weights, volumes and numbers of soil animals* // In: Graff O. and Satchel J.E. (Eds.) "Progress in Soil Biology". North-Holland Publishing Company, Amsterdam: 1967. P. 585-596.
158. Forsslund K.H. Studien über die Tierwelt des nordschwedischen Waldbodens, *Medd. St. Skogsforsoksanst. 1943 (1944)*, 34: 1–264.
159. France R. *Das Edaphon*. Stuttgart. 1921. 99 p.
160. Frenzel G. *Untersuchungen über die Tierwelt des Wiesenbodens*. G. Fischer. Jena., 1936, 130 p.
161. Gurina A.A., Dudko R.Y., Tshernyshev S.E., Legalov A.A., Zinovyev E.V. Late pleistocene insects from the Dubrovino site at Ob river (West Siberia, Russia) and their paleoenvironmental significance, *Palaeontologia Electronica*, 2019, Vol. 22, No 1. DOI: [10.26879/914](https://doi.org/10.26879/914)
162. Iakovlev I.K., Novgorodova T.A., Reznikova Z.I., Tiunov A.V. Trophic position and seasonal changes in the diet of the red wood ant *Formica aquilonia* as indicated by stable isotope analysis, *Ecological Entomology*, 2017, Vol. 42, No 3, p. 263-272. DOI: [10.1111/een.12384](https://doi.org/10.1111/een.12384)
163. Nielsen C.J. Respiratory metabolism of some populations enchytraeid worms and free living nematodes, *Oikos*. 1961, Vol. 12, No. 1, p. 17-35. DOI: [10.2307/3565169](https://doi.org/10.2307/3565169)
164. Novenko E.Y., Mazei N.G., Kupriyanov D.A., Tsyganov A.N., Payne R.J., Chernyshov V.A. et al. Vegetation dynamics and fire history at the southern boundary of the forest vegetation zone in European Russia during the middle and late Holocene, *The Holocene*, 2018, Vol. 28, No 2, p. 308-322. DOI: [10.1177/0959683617721331](https://doi.org/10.1177/0959683617721331)
165. Samoylova E.S., Tiunov A.V. Flexible trophic position of polyphagous wireworms (Coleoptera, Elateridae): a stable isotope study in the steppe belt of Russia, *Applied Soil Ecology*, 2017, Vol. 121, p. 74-81. DOI: [10.1016/j.apsoil.2017.09.026](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.026)
166. Zinovyev E.V., Dudko R.Y., Gurina A.A., Tsepelev K.A., Tshernyshev S.E., Kostyunin A.E. et al. First records of sub-fossil insects from quaternary deposits in the southeastern part of West Siberia, Russia, *Quaternary International*, 2016, V. 420, p. 221-232. DOI: [10.1016/j.quaint.2015.09.023](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.023)

Received 05 March 2021;

Accepted 22 March 2021

Published 10 April 2021

About the authors:

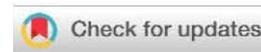
Mordkovich Vyacheslav H. – Doctor of Biological Sciences, Professor, Principal Researcher in the Laboratory of Invertebrate Ecology, Institute of Systematics and Ecology of Animals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; mordkovichvg@rambler.ru

Lyubechanskii Ilya I. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Invertebrate Ecology, Institute of Systematics and Ecology of Animals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; lubech@gmail.com

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/)



ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОПАДА БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ (*BETULA PENDULA*) ПРИ РАЗЛОЖЕНИИ НА ФОНЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ И ЗАСОЛЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

© 2020 Т.В. Нечаева ¹, Н.В. Смирнова ¹, С.А. Худяев ¹, И.И. Любечанский ²

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

²ФГБУН Институт систематики и экологии животных СО РАН, ул. Фрунзе, 11, г. Новосибирск, 630091, Россия. E-mail: lubech@gmail.com

Цель исследования: оценить изменение элементного химического состава опада березы при разложении на фоне выщелачивания и засоления в лабораторном эксперименте.

Место и время проведения. Свежеопавшие листья березы повислой (*Betula pendula*) были отобраны в лесостепной зоне Приобского плато в 40 км восточнее г. Новосибирска в октябре 2016 г. Эксперимент по изучению изменения химического состава опада березы в условиях инкубирования при 24 °С и продолжительностью 105 суток (с 24.05.2017 по 06.09.2017) проведен в лаборатории агрохимии ИПА СО РАН.

Методы. К 2 г воздушно-сухого опада березы, помещенного в пластиковые емкости на 100 мл, приливали по 50 мл дистиллированной воды ($H_2O_{дист.}$), либо такой же объем растворов солей натрия ($NaCl$, Na_2SO_4) или железа ($FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$) с концентрацией 0,3, 0,5, 0,7 и 1%. После 24-часового замачивания избыток воды или растворов солей отдельно сливали и фильтровали, а опад березы просушивали при комнатной температуре. Далее в одну часть емкостей с опадом добавили по 5 мл почвенной водной суспензии (ПВС), в другую – по 5 мл $H_2O_{дист.}$. В эксперимент также был включен вариант без замачивания, обозначенный как «сухой опад березы». Емкости с опадом герметично закрывали и инкубировали в термостате при 24 °С с периодическим проветриванием в течение нескольких минут. После 105 суток инкубирования опад просушивали при комнатной температуре и взвешивали с точностью до 0,01 г. Потери массы при разложении опада березы рассчитывали, как разницу между массой образцов в начале и в конце эксперимента и выражали в процентах. В воде, 0,3-1%-ных растворах солей (до и после замачивания в них опада), а также в опаде березы определили содержание Na, Fe, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Ni методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Всего в эксперименте было задействовано 150 емкостей с опадом березы.

Указывая «на фоне выщелачивания», мы имеем в виду потери химических элементов (ХЭ) из опада березы после замачивания в воде, «на фоне засоления» – насыщение опада Na или Fe после замачивания в 0,3-1%-ных растворах этих солей. Потери массы опада березы представили в расчете на воздушно-сухое вещество (табл. 1), общее содержание ХЭ в опаде и зольность – на абсолютно сухое вещество (табл. 2-10).

Основные результаты. Установлено, что на фоне выщелачивания происходит увеличение концентрации ХЭ в водной вытяжке (особенно K, Ca, Mg) и снижение содержания ХЭ в опаде березы в следующем ряду: Na (в среднем в 3,6 раза) > K (в 2,4 раза) > Ni (в 1,9 раза) > Mg (в 1,4 раза) > Zn и Cu (в 1,3 раза в обоих случаях). Обработка опада березы 0,3-1%-ными растворами солей натрия или железа, в сравнении с водой, приводила к более интенсивному выщелачиванию и, соответственно, более низкому содержанию в растительных остатках K (в среднем в 1,3 раза), Ca (в 1,2-1,5 раза) и Mg (в 1,5-2,2 раза). Наибольшая концентрация примесей была обнаружена в хлориде железа (III). Исходные растворы этой соли были обогащены Ca, Mg, Zn, Cu и, особенно, Ni. Самые высокие показатели потерь массы и зольности отмечены в сухом опаде березы (без замачивания). На фоне выщелачивания потери массы и зольность опада снизились в среднем в 1,4 раза. На фоне засоления самые низкие показатели потерь массы и зольности выявлены после замачивания опада в 0,3-1%-ных растворах $FeCl_3$. Разница в потере массы между вариантами с добавлением к опад ПВС и воды не установлена, однако зольность опада с добавлением ПВС была выше в 1,1-1,3 раза.

Заключение. Замачивание опада березы в воде, 0,3-1%-ных растворах солей натрия или железа (III) приводит к изменению элементного химического состава растительных остатков: с одной стороны, к частичному выщелачиванию из опада ХЭ (особенно K, Ca, Mg), с другой – насыщению Na, Fe и рядом других ХЭ (в зависимости от соли). Это способствует снижению темпов разложения опада березы с учетом потерь массы, что в естественных условиях на юге Западной Сибири может происходить в результате временного переувлажнения лесной подстилки (например, в осенний и весенний холодные периоды года) и на участках с засоленными почвами.

Ключевые слова: листья березы; растительные остатки; хлорид и сульфат натрия; хлорид и сульфат железа (III); выщелачивание; насыщение; химические элементы (Na, Fe, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Ni); сырая зола; потери массы; темпы разложения

Цитирование: Нечаева Т.В., Смирнова Н.В., Худяев С.А., Любечанский И.И. Изменение элементного химического состава опада березы повислой (*Betula pendula*) при разложении на фоне выщелачивания и засоления в лабораторном эксперименте // Почвы и окружающая среда. 2020. Том 3. №4. е130. doi: 10.31251/pos.v3i4.130

ВВЕДЕНИЕ

Разложение растительных остатков (опада) относится к одному из важнейших аспектов биогеохимических циклов наземных экосистем, определяющих эмиссию углекислого газа, формирование подстилки и поступление биофильных элементов в почву (Карпачевский, 1981; Базилевич, Титлянова, 2008; Berg, McLaugherty, 2014). Среди множества факторов, влияющих на темпы разложения опада, можно выделить следующие: условия среды (климат, почвы, местоположение в рельефе), структура и химический состав (качество) опада и зоомикробный комплекс почвенных деструкторов (Почикалов, Карелин, 2014; Менько и др., 2018; Zhang et al., 2008; Berg, 2014; Bradford et al., 2016).

Химический состав опада весьма разнообразен и зависит от доминирующих видов растений. Так, опад лиственных деревьев, в сравнении с хвойным, отличается большей начальной концентрацией питательных элементов и меньшим содержанием лигнина и полифенолов, что в свою очередь способствует большей стартовой скорости разложения листьев, чем хвои (Bani et al., 2018; Prescott, 2010). Наличие в ветвях и коре значительного количества устойчивых химических веществ (лигнина, липидов, фенолов и смол) затрудняет деятельность зоомикробного комплекса деструкторов, тогда как листья и травянистые растения создают более благоприятный субстрат для почвенной биоты (Osipov, 2016). Поэтому наиболее интенсивно разлагается так называемая активная фракция древесного опада (листья, хвоя, семена) по сравнению с неактивной (ветви, кора, шишки) (Карпачевский, 1981; Бобкова, Осипов, 2012). Вследствие различий в содержании зольных элементов и органических компонентов опад разных видов растений минерализуется с различной скоростью. Например, листовая опад двудольных растений разлагается в среднем в 4 раза быстрее, чем мохообразных; в 3 раза, чем папоротниковидных; в 1,8 раза, чем голосеменных; в 1,6 раза, чем однодольных растений (Cornwell et al., 2008).

Влияние химических свойств элементов питания на процесс их возврата с растительными остатками проявляется косвенно – через их концентрацию в опаде, которая зависит как от концентрации в фитомассе, так и от процессов выщелачивания и транслокации, понижающих содержание элементов в листе и хвое. Опад всегда обеднен N и K по сравнению с фотосинтезирующими органами и чаще всего обогащен Si и Mg; концентрация Ca и P в опаде может быть как выше, так и ниже, чем в зеленой фитомассе (Базилевич, Титлянова, 2008). Также отмечено, что на начальных стадиях разложения растительных остатков доминирует высвобождение (в основном за счет вымывания) Ca, K и Mg, в то время как для N, P и S может наблюдаться временное увеличение их содержания. Такие различия в динамике биофильных элементов объясняются микробной иммобилизацией. Элементы, лимитирующие микробный рост (прежде всего N и P), аккумулируются в опаде, а те элементы, которые только частично являются структурными компонентами, вымываются в первую очередь. Промежуточные продукты распада являются питательным субстратом для микроорганизмов, формирующих разнообразие сообществ почвенной микробиоты (Berg, McLaugherty, 2014).

По мере изменения химического состава растительных остатков происходит сукцессия сообществ почвенных деструкторов. В первую очередь развиваются микроорганизмы, использующие простые водорастворимые соединения – неспорозоносные бактерии и «сахарные» грибы; вслед за ними формируется сообщество спорозоносных бактерий, разрушающих клетчатку, и только затем – деструкторов лигнина и гумуса (Мишустин, 1975). Через микробную биомассу проходит до 95% углерода, поступившего с опадом (Berg, McLaugherty, 2014). В целом же можно сказать, что все представители почвенной биоты (бактерии, археи, грибы, микроартроподы и крупные беспозвоночные) вносят определенный вклад в разложение и минерализацию растительных остатков (Стриганова, 1980; Anderson, 2000; Bezkorovainaya, 2011; Rakhleeva et al., 2011).

Известно, что потери массы опада могут происходить не только за счет собственно разложения, но и в результате выщелачивания элементов питания и фрагментации растительных остатков в холодный период года, например, во время осеннего промерзания, зимних оттепелей

или весеннего снеготаяния (Parker et al., 1984). Одни авторы (Hobbie, Chapin, 1996) полагают, что основной причиной потерь массы опада в тундре служат именно циклы замораживания/оттаивания (оттепели), способствующие выщелачиванию и/или частичной потере органического вещества во время бурного весеннего снеготаяния. К сожалению, данные рассуждения не были подкреплены фактическим материалом. Другие исследователи (Bokhorst et al., 2010), напротив, утверждают, что зимние циклы замораживания и оттаивания (в лаборатории), и имитация зимних оттепелей в полевых условиях не оказывают влияния на потерю массы опада. В этой же работе авторы выдвинули гипотезу об осеннем выщелачивании, как важном факторе потерь массы в холодный сезон. Она подтвердилась лабораторными исследованиями, показавшими, что около 61% наблюдаемых «зимних» потерь массы происходят в течение первых двух недель выдерживания опада в воде. Однако в полевых условиях подобных доказательств исследователями получить не удалось.

Засоление почв (природное и антропогенное) было и остается актуальной проблемой (Панкова и др., 2006). С точки зрения экологии микроорганизмов, засоление – один из важнейших факторов, определяющих структуру микробного сообщества (Fierer, Jackson, 2006; Lozupone, Knight, 2007; Rousk et al., 2010). В засоленных почвах установлено снижение общей численности микроорганизмов, но индексы биоразнообразия остаются довольно высокими (Hollister et al., 2010); выявлено увеличение численности архей (Rothschild, Mancinelli, 2001; Walsh et al., 2005; Caton et al., 2009), показано снижение индексов «здоровья» микробосообщества в направлении от незасоленных почв к солончакам (Котенко, Зубкова, 2008; Handelsman, 2004). Отмечено, что засоленность почв не влияет на общий уровень разнообразия микробных популяций, но оказывает воздействие на таксономический состав микроорганизмов (Andronov et al., 2012). Изучение же темпов разложения и элементного химического состава растительных остатков с учетом степени засоления почв представлены фрагментарно при решении других задач.

В научной литературе достаточно подробно изучен биотический круговорот основных биофильных элементов (N, P, K), однако мало данных о том, как доступность таких элементов питания, как Na и Fe, влияет на состав и активность почвенного сообщества и темпы разложения опада. Были предоставлены экспериментальные доказательства того, что недостаток Na в тропических лесах Амазонки замедляет углеродный цикл, а дополнительное внесение NaCl увеличивает темпы разложения растительных остатков, а также численность почвенных деструкторов и их хищников (Kasparia et al., 2009).

Таким образом, несмотря на большое количество работ, посвященных изучению разложения опада разных видов растений в лабораторных и полевых условиях, все еще недостаточно данных о влиянии выщелачивания и засоления (в том числе соединениями Na и Fe) на элементный химический состав и темпы разложения растительных остатков, их «привлекательность» для зоомикробного комплекса почвенных деструкторов.

Цель работы – оценить изменение элементного химического состава опада березы при разложении на фоне выщелачивания и засоления в лабораторном эксперименте.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Сравнить элементный химический состав опада березы до начала эксперимента и после его завершения во всех вариантах с учетом добавления к опаду почвенной водной суспензии или воды.
2. Сопоставить элементный химический состав воды, 0,3–1%-ных растворов минеральных солей натрия и железа до и после 24-часового замачивания в них опада березы.
3. Изучить изменения массы и зольности опада березы во всех вариантах эксперимента; из используемых солей натрия и железа установить соединение с наибольшим влиянием на данные параметры.

В качестве объекта исследований нами выбраны листья березы, так как, с одной стороны, среди лесных формаций лесостепной зоны Западной Сибири березовые леса занимают около 62% земель лесного фонда (Штоль, 2016), с другой стороны, листья березы относятся к интенсивно разлагаемой активной фракции опада (Ильин и др., 1970; Бобкова, Осипов, 2012; Ларионова и др., 2017), что удобно при проведении краткосрочных лабораторных экспериментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Свежеопавшие листья березы повислой (*Betula pendula*) (далее опад березы) отобрали в лесостепной зоне Приобского плато в 40 км восточнее г. Новосибирска в октябре 2016 г. Опад березы был высушен при комнатной температуре (23-25 °С) до воздушно-сухого состояния и до начала эксперимента хранился в сухом виде.

Для проведения эксперимента к 2 г воздушно-сухого опада березы (цельные листья без измельчения), помещенного в пластиковые емкости на 100 мл, приливали по 50 мл дистиллированной воды ($H_2O_{\text{дист}}$) или такой же объем растворов минеральных солей с концентрацией 0,3, 0,5, 0,7 и 1% (рис. 1 А, Б). Использовали четыре вида соли: хлорид натрия ($NaCl$, хч), сульфат натрия (Na_2SO_4 , хч), хлорид железа (III) ($FeCl_3$, ч), сульфат железа (III) ($Fe_2(SO_4)_3$, чда). Выбор концентраций растворов солей проведен нами исходя из следующей градации по степени засоления почв: 0,3% – слабая (в пределах 0,2-0,4%); 0,5% – средняя (0,4-0,6%); 0,7% – сильная (0,6-0,8%); 1% – солончак (Классификация..., 1977).



Рисунок 1. Постановка лабораторного эксперимента: А – общий вид эксперимента с опадом березы; Б – крупный план емкостей с опадом; В – просушивание опада, после удаления водных или солевых вытяжек; Г – добавление к опадку почвенной водной суспензии.

Емкости с опадом, замоченным в воде или растворах солей, оставляли на 24 часа. В эксперимент был включен также вариант без замачивания, обозначенный как «сухой опад березы». Воду и растворы солей сливали отдельно по каждому варианту и фильтровали через обеззоленный фильтр «Синяя лента», а емкости с опадом березы переворачивали вверх дном на фильтровальную бумагу для просушивания при комнатной температуре в течение суток (рис. 1 В).

После просушивания в большую часть емкостей с опадом березы (в 5 повторностей из 7) для всех вариантов (сухой опад, на фоне выщелачивания и засоления) добавили по 5 мл почвенной водной суспензии (ПВС) с целью «оживления» микробоценоза (рис. 1 Г), в оставшиеся 2 повторности – по 5 мл $H_2O_{\text{дист}}$. Для получения ПВС был взят верхний слой (0-20 см) чернозема выщелоченного на залежном участке в Новосибирской области и приготовлена суспензия при соотношении почва : $H_2O_{\text{дист}}$ равным 1 : 2,5. Далее емкости с опадом березы герметично закрывали и инкубировали в термостате при 24 °С в течение 105 суток (с 24.05.2017 по 06.09.2017) с периодическим проветриванием на несколько минут.

После инкубирования опад березы просушили при комнатной температуре в течение 6 суток (рис. 2 А, Б) и взвесили с точностью до 0,01 г. Потери массы при разложении опада рассчитали, как разницу между массой образцов в начале и по окончании эксперимента и выразили в процентах. Затем пять повторностей с добавлением к опадку ПВС объединили в одну общую пробу для получения достаточной навески для озоления. Эту же процедуру провели для двух повторностей с добавлением к опадку воды. Всего в эксперименте было задействовано 150 емкостей с опадом березы.



Рисунок 2. Просушивание опада березы по завершении эксперимента: А – общий вид; Б – крупный план.

В воде, растворах солей и опаде березы определили общее содержание ряда химических элементов (ХЭ) методом атомно-абсорбционной спектрометрии (AAAnalyst 400, Perkin Elmer Inc., США). Содержание в опаде березы сырой золы (далее зольность) определили в соответствии с ГОСТ 32933-2014, ХЭ – в озолоте, полученном после растворения сухой золы в смеси азотной кислоты и перекиси водорода в соответствии с ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011. В исходном опаде березы определили также общее содержание углерода и азота методом сухого озоления на элементном анализаторе CHNS/O (Analyzer 2400, Perkin Elmer precisely Serie II, США).

Под элементным химическим составом опада березы мы подразумеваем совокупность ХЭ, обнаруженных в фитомассе и характеризующихся количественно. Далее при обсуждении ХЭ в воде и растворах солей (до и после замачивания в них опада) приведена концентрация ХЭ (мг/л), а непосредственно в опаде березы – содержание ХЭ (мг/кг или мг/г, в зависимости от полученных результатов и удобства их восприятия). Указывая «на фоне выщелачивания», мы имеем в виду потери ХЭ из опада после замачивания в воде, «на фоне засоления» – насыщение опада Na или Fe после замачивания в 0,3-1%-ных растворах солей натрия или железа соответственно. Потери массы опада березы представили в расчете на воздушно-сухое вещество (табл. 1), общее содержание ХЭ в опаде и его зольность – на абсолютно сухое вещество (табл. 2-10).

Статистическую обработку данных провели в пакетах Microsoft Office Excel 2010 и SNEDECOR V. 5.80 (Сорокин, 2012). Анализ различия факторных средних выполнили методом многофакторного дисперсионного анализа. Оценку значимости различий между изученными параметрами провели с использованием t-критерия Стьюдента. В таблицах привели такие статистические параметры, как среднее арифметическое значение (M), стандартное отклонение (s) и наименьшая существенная разница (НСР) на уровне значимости 1 и 5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходный опад березы (до постановки эксперимента) имел следующие показатели ($M \pm s$): общее содержание углерода – $51,7 \pm 0,14$, азота – $1,06 \pm 0,01\%$, соотношение C : N (молярное) – 56,8, зольность – $7,6 \pm 0,14\%$. Наши результаты вполне согласуются с литературными данными (Буянтуева и др., 2010; Иванова и др., 2019; Osipov, 2016), на основании которых можно утверждать, что листья березы относятся к быстро разлагающимся растительным остаткам.

Потери массы сухого опада березы (без замачивания) после 105 суток инкубирования с добавлением воды составили в среднем 40,9%, с ПВС – 37,4%. После замачивания опада в воде темпы разложения снизились; потери массы с добавлением к опадку воды составили в среднем 29,7%, с ПВС – 28,1%. Между замачиванием опада в воде и 0,3-1%-ных растворах Na_2SO_4 различий в потере массы не установлено (см. табл. 1). Однако при использовании трех других солей потери массы опада уменьшились, что указывает на дальнейшее снижение темпов разложения растительных остатков. Статистически значимых различий в потере массы между вариантами с добавлением к опадку ПВС и воды не выявлено.

Таблица 1

Потери массы опада березы по окончанию эксперимента

Концентрация растворов ¹ , %	Потери массы с учетом добавления к опадку H_2O или ПВС ² , %		Анализ действия факторов, влияние по Снедекору	
	+ H_2O	+ПВС ¹	НСР по фактору А	Выводы
Вариант: NaCl				
0 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$)	$32,2 \pm 0,50^*$	$28,6 \pm 2,38$	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 5%
0,3	$25,8 \pm 3,23$	$26,8 \pm 1,26$	5,90 (1%) 3,56 (5%)	
0,5	$28,9 \pm 1,75$	$26,0 \pm 2,53$		
0,7	$24,8 \pm 0,99$	$24,0 \pm 3,00$		
1	$21,7 \pm 2,85$	$20,4 \pm 1,62$		
НСР по фактору В, выводы	Контроль	3,73 (1%) 2,25 (5%)	Различия средних фактора В недостоверны	
Вариант: Na_2SO_4				
0 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$)	$28,3 \pm 3,75$	$22,5 \pm 1,93$	Контроль	Различия средних фактора А недостоверны
0,3	$28,6 \pm 2,15$	$24,0 \pm 1,97$	11,52 (1%) 6,95 (5%)	
0,5	$27,7 \pm 0,10$	$26,3 \pm 2,59$		
0,7	$24,4 \pm 3,28$	$25,8 \pm 3,26$		
1	$29,1 \pm 0,64$	$21,7 \pm 3,14$		
НСР по фактору В, выводы	Контроль	7,29 (1%) 4,40 (5%)	Различия средних фактора В не доказаны на уровне 5%	
Вариант: FeCl_3				
0 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$)	$28,5 \pm 2,23$	$30,4 \pm 2,77$	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 5%
0,3	$21,7 \pm 0,88$	$18,3 \pm 1,14$	9,29 (1%) 5,60 (5%)	
0,5	$18,6 \pm 0,98$	$21,7 \pm 2,03$		
0,7	$24,6 \pm 1,85$	$22,4 \pm 3,10$		
1	$26,0 \pm 1,47$	$23,9 \pm 2,15$		
НСР по фактору В, выводы	Контроль	5,88 (1%) 3,54 (5%)	Различия средних фактора В недостоверны	
Вариант: $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$				
0 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$)	$30,0 \pm 1,11$	$30,8 \pm 1,24$	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	$23,3 \pm 0,50$	$21,3 \pm 3,01$	4,50 (1%) 2,71 (5%)	
0,5	$23,6 \pm 1,62$	$24,1 \pm 2,01$		
0,7	$27,2 \pm 0,26$	$25,6 \pm 1,71$		
1	$26,3 \pm 0,13$	$27,1 \pm 1,98$		
НСР по фактору В, выводы	Контроль	2,85 (1%) 1,72 (5%)	Различия средних фактора В недостоверны	

Примечание (здесь и далее в табл. 2-10).

1 – В эксперименте предусмотрены варианты с замачиванием опада березы в $\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$, 0,3–1% растворах солей натрия или железа (фактор А). 2 – После замачивания и просушивания к опадку березы добавлена вода (+ H_2O) или почвенная водная суспензия (+ПВС) (фактор В). * – Представлены среднее арифметическое значение и стандартное отклонение ($M \pm s$).

Таким образом, результаты потерь массы опада березы свидетельствуют о снижении темпов разложения растительных остатков после их замачивания в воде. Обработка опада 0,3–1%-ными растворами солей (за исключением Na_2SO_4) способствовало дальнейшему снижению потерь массы и, соответственно, темпов разложения растительных остатков.

Согласно литературным данным (Аристовская, 1980; Иванова и др., 2019; Berg, McClaugherty, 2014), потери массы на начальных стадиях разложения опада происходят в основном за счет выщелачивания и вымывания водорастворимых веществ, а наиболее благоприятные условия для процесса микробиологического разложения создаются при высоком содержании в растительных остатках белка и зольных элементов. Последние, являясь дополнительным источником питания микроорганизмов, способствуют более быстрой трансформации опада (Буянтуева и др., 2010).

В воде, 0,3–1%-ных растворах солей (до и после замачивания в них опада), а также непосредственно в опаде березы определили не только содержание Na и Fe, входящих в состав солей для насыщения растительных остатков, но и ряд других ХЭ (K, Ca, Mg, Zn, Cu, Ni). По окончании эксперимента содержание Na и Fe в опаде березы определили в соответствии с замачиванием растительных остатков в 0,3–1%-ных растворах солей натрия или железа (см. табл. 2–3), содержание же других ХЭ привели во всех четырех вариантах с солями (см. табл. 4–9). Остановимся более подробно на рассмотрении каждого ХЭ.

Натрий. После замачивания опада березы в воде концентрация Na в водной вытяжке увеличилась в 4,4 раза (см. табл. 2), что указывает на выщелачивание данного элемента. В солевых вытяжках, напротив, концентрация Na уменьшилась в среднем в 1,1 раза после замачивания опада березы в 0,3–1%-ных растворах солей натрия (NaCl или Na_2SO_4).

Содержание Na в исходном опаде березы (до постановки эксперимента) составило $0,13 \pm 0,02$ мг/г. По окончании эксперимента содержание Na в сухом опаде (без замачивания) с добавлением к растительным остаткам воды или ПВС не различалось и составило в среднем 1,0 мг/г. Увеличение содержания Na в сухом опаде березы, в сравнении с исходным, связано, на наш взгляд, с минерализацией и потерей органических веществ в процессе разложения растительных остатков, что в свою очередь приводит к потере массы и, как следствие, повышению содержания в опаде зольных элементов.

На фоне выщелачивания содержание Na в опаде снизилось в среднем в 4,7 раза (см. табл. 2), между вариантами на фоне выщелачивания и засоления выявлены статистически значимые различия ($p < 0,01$). Насыщение растительных остатков Na увеличивалось с повышением концентрации NaCl или Na_2SO_4 , наибольшее содержание Na в опаде березы отмечено при замачивании в 1%-ных солевых растворах. Наши результаты подтвердили имеющиеся данные о том, что при высокой концентрации Na в грунтах и водах этот элемент может накапливаться в растениях в значительных количествах – до 15–20% от сухой массы (Базилевич, Титлянова, 2008).

С добавлением к опаду березы ПВС (с концентрацией Na 5,7 мг/л) установлено такое же (вариант Na_2SO_4) или более низкое (вариант NaCl) содержание Na в растительных остатках, чем с добавлением воды (см. табл. 2).

Железо. Как до, так и после замачивания опада березы в воде концентрация Fe в водной вытяжке была ниже предела обнаружений метода (см. табл. 3). После насыщения опада 0,3–1%-ными растворами солей железа концентрация Fe в солевых вытяжках уменьшилась в 1,1–1,5 раза.

Содержание Fe в исходном опаде березы составило $0,16 \pm 0,01$ мг/г. По окончании эксперимента содержание Fe в сухом опаде (без замачивания) с добавлением воды или ПВС не различалось и составило в среднем 0,13 мг/г. На фоне выщелачивания содержание Fe в опаде варьировало в довольно широком диапазоне (0,16–0,34 мг/г), но существенных различий по сравнению с сухим опадом березы не обнаружено. Статистически значимые различия ($p < 0,01$) по содержанию Fe в опаде выявлены между вариантами на фоне выщелачивания и засоления. Насыщение опада железом постепенно увеличивалось с повышением концентрации солей FeCl_3 или $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ от 0,3 до 1%.

С добавлением к опаду березы ПВС (с концентрацией Fe 1,6 мг/л) установлено такое же (вариант $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) или более высокое (вариант FeCl_3) содержание Fe в растительных остатках, чем с добавлением воды (см. табл. 3).

Таблица 2

Натрий: концентрация в растворах и содержание в опаде березы по окончанию эксперимента

Концентрация растворов ¹ , %	Концентрация Na в растворах до и после замачивания опада, мг/л		Содержание Na в опаде с учетом добавления воды или ПВС ² , мг/г		Анализ действия факторов по содержанию Na в опаде, влияние по Снедекору	
	ДО	ПОСЛЕ	+H ₂ O	+ПВС	НСР по фактору А	Выводы
Вариант: NaCl						
0 (H ₂ O _{дист})	0,27	1,20	0,16	0,21	Контроль 3,65 (1%) 2,20 (5%)	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	1287	1102	12,4	11,0		
0,5	1742	1650	19,4	18,1		
0,7	2244	2112	24,1	21,8		
1	2752	2640	32,5	29,6		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	2,31 (1%) 1,39 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 5%	
Вариант: Na ₂ SO ₄						
0 (H ₂ O _{дист})	0,27	1,20	0,17	0,31	Контроль 5,62 (1%) 3,39 (5%)	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	1016	924	11,9	12,3		
0,5	1557	1558	18,1	17,6		
0,7	1980	2013	22,9	23,7		
1	2475	2383	32,5	29,0		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	3,55 (1%) 2,14 (5%)	Различия средних фактора В недостоверны	

Примечание. 1–2 – См. табл. 1. Расчеты по содержанию ХЭ в опаде березы (здесь и далее в табл. 3–9) представлены на абсолютно сухое вещество.

Таблица 3

Железо: концентрация в растворах и содержание в опаде березы по окончанию эксперимента

Концентрация растворов ¹ , %	Концентрация Fe в растворах до и после замачивания опада, мг/л		Содержание Fe в опаде с учетом добавления воды или ПВС ² , мг/г		Анализ действия факторов по содержанию Fe в опаде, влияние по Снедекору	
	ДО	ПОСЛЕ	+H ₂ O	+ПВС	НСР по фактору А	Выводы
Вариант: FeCl ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,01*	<0,01	0,16	0,34	Контроль 3,83 (1%) 2,31 (5%)	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	845	568	2,8	5,5		
0,5	1432	1241	4,7	6,7		
0,7	2020	1683	6,6	9,9		
1	2680	2277	8,6	10,9		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	2,42 (1%) 1,46 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 5%	
Вариант: Fe ₂ (SO ₄) ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,01	<0,01	0,23	0,31	Контроль 5,25 (1%) 3,16 (5%)	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	785	528	4,3	5,9		
0,5	1432	1241	6,6	5,9		
0,7	2020	1822	7,3	10,6		
1	2746	2614	12,1	14,3		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	3,32 (1%) 2,00 (5%)	Различия средних фактора «В» недостоверны	

Примечание. 1–2 – См. табл. 1. * – Значения, ниже предела обнаружений метода.

Калий. Известно, что калий легко выщелачивается из кроны и стволов деревьев, а также из разлагающихся растительных остатков (Базилевич, Титлянова, 2008). Концентрация К в исходной воде, 0,3-1%-ных растворах солей натрия и железа была незначительной (не более 0,46 мг/л). После замачивания опада березы в воде, солях натрия или железа отмечено многократное увеличение концентрации К как в водных, так и в солевых вытяжках (см. табл. 4). Статистически значимых различий в концентрации К между водными и соевыми вытяжками не установлено.

Таблица 4

Калий: концентрация в растворах и содержание в опаде березы по окончанию эксперимента

Концентрация раствора ¹ , %	Концентрация К в растворах до и после замачивания опада, мг/л		Содержание К в опаде с учетом добавления H ₂ O или ПВС ² , мг/г		Анализ действия факторов по содержанию К в опаде, влияние по Снедекору	
	ДО	ПОСЛЕ	+H ₂ O	+ПВС	НСР по фактору А	Выводы
Вариант: NaCl						
0 (H ₂ O _{дист})	0,20	238	7,7	5,0	Контроль	Различия средних фактора А не достоверны
0,3	<0,2*	304	6,0	4,5	2,25 (1%) 1,36 (5%)	
0,5	0,20	330	5,8	3,6		
0,7	0,46	330	5,9	4,3		
1	<0,2	356	6,5	3,4		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	1,42 (1%) 0,86 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 1%	
Вариант: Na ₂ SO ₄						
0 (H ₂ O _{дист})	0,20	238	7,4	6,6	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 5%
0,3	<0,2	304	6,2	4,5	1,39 (1%) 0,84 (5%)	
0,5	<0,2	297	6,3	4,4		
0,7	<0,2	343	5,8	4,5		
1	<0,2	304	6,0	4,4		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	0,88 (1%) 0,53 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 1%	
Вариант: FeCl ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	0,20	251	7,4	4,8	Контроль	Различия средних фактора А не достоверны
0,3	<0,2	271	5,5	4,6	3,00 (1%) 1,81 (5%)	
0,5	<0,2	271	4,8	4,6		
0,7	0,22	198	5,1	4,4		
1	0,39	211	5,2	4,5		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	1,90 (1%) 1,14 (5%)	Различия средних фактора В не доказаны на уровне 5%	
Вариант: Fe ₂ (SO ₄) ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	0,20	251	7,2	5,6	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 5%
0,3	<0,2	297	5,6	5,4	1,86 (1%) 1,12 (5%)	
0,5	<0,2	284	5,0	4,5		
0,7	0,37	297	5,1	4,8		
1	0,46	284	5,1	4,2		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	1,17 (1%) 0,71 (5%)	Различия средних фактора В не доказаны на уровне 5%	

Примечание. 1–2 – См. табл. 1. * – Значения, ниже предела обнаружений метода.

Содержание К в исходном опаде березы составило 8,0±0,15 мг/г. По окончанию эксперимента содержание К в сухом опаде (без замачивания) с добавлением воды или ПВС не различалось и составило в среднем 15,7 мг/г. Как и в случае с Na, увеличение содержания К в сухом опаде связано с потерей массы в процессе разложения. На фоне выщелачивания содержание К в опаде снизилось в среднем в 2,4 раза. На фоне засоления содержание К в опаде было ниже в среднем в 1,3 раза, чем после замачивания в воде (см. табл. 4), то есть происходило более интенсивное выщелачивание калия из растительных остатков.

С добавлением к опаду березы ПВС (с концентрацией К 1,7 мг/л) установлено такое же (варианты FeCl₃ и Fe₂(SO₄)₃) или более низкое (варианты NaCl и Na₂SO₄) содержание К в опаде, чем с добавлением воды.

Кальций. Согласно литературным данным (Базилевич, Титлянова, 2008), кальций не подвергается ретранслокации и возвращается в почву в основном с опадом и отпадом деревьев. Концентрация Са в исходной воде и растворах солей была незначительной. Исключение составил FeCl_3 , где присутствовали примеси кальция (см. табл. 5). После замачивания опада березы в воде или в растворах солей концентрация Са в вытяжках значительно увеличилась. Использование солей железа (особенно $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) способствовало более интенсивному переходу кальция из опада в раствор, чем солей натрия или воды.

Таблица 5

Кальций: концентрация в растворах и содержание в опаде березы по окончанию эксперимента

Концентрация растворов ¹ , %	Концентрация Са в растворах до и после замачивания опада, мг/л		Содержание Са в опаде с учетом добавления H_2O или ПВС ² , мг/г		Анализ действия факторов по содержанию Са в опаде, влияние по Снедекору	
	ДО	ПОСЛЕ	+ H_2O	+ПВС	НСР по фактору А	Выводы
Вариант: NaCl						
0 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$)	<0,4*	37	21,6	24,5	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 5%
0,3	<0,4	59	20,8	21,0	3,83 (1%) 2,31 (5%)	
0,5	<0,4	73	19,7	21,0		
0,7	<0,4	80	18,8	21,0		
1	<0,4	91	15,8	18,8		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	2,42 (1%) 1,46 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 5%	
Вариант: Na_2SO_4						
0 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$)	<0,4	37	23,7	23,2	Контроль	Различия средних фактора А недостоверны
0,3	<0,4	73	19,9	20,8	8,92 (1%) 5,38 (5%)	
0,5	<0,4	80	23,3	20,1		
0,7	<0,4	99	15,5	19,9		
1	0,46	110	18,8	19,2		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	5,64 (1%) 3,40 (5%)	Различия средних фактора В недостоверны	
Вариант: FeCl_3						
0 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$)	<0,4	34	23,8	24,7	Контроль	Различия средних фактора А недостоверны
0,3	3,7	121	16,1	25,9	13,92 (1%) 8,39 (5%)	
0,5	5,0	141	19,2	18,2		
0,7	7,2	146	15,0	19,1		
1	10,8	184	16,9	17,6		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	8,80 (1%) 5,31(5%)	Различия средних фактора В недостоверны	
Вариант: $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$						
0 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{дист}}$)	<0,4	34	23,1	22,7	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	<0,4	152	17,5	17,2	5,79 (1%) 3,49 (5%)	
0,5	<0,4	172	13,6	15,2		
0,7	<0,4	210	15,1	17,6		
1	<0,4	256	9,8	13,5		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	3,66 (1%) 2,21 (5%)	Различия средних фактора В недостоверны	

Примечание. 1–2 – См. табл. 1. * – Значения, ниже предела обнаружений метода.

Содержание Са в исходном опаде березы составило $16,2 \pm 0,04$ мг/г. По окончанию эксперимента содержание Са в сухом опаде (без замачивания) с добавлением воды составило 23,3 мг/г, с ПВС – 28,1 мг/г. На фоне выщелачивания содержание Са в опаде снизилось незначительно (в среднем в 1,1 раза). После насыщения 0,3-1%-ными растворами солей содержание Са в опаде стало ниже в 1,2–1,5 раза, чем после замачивания в воде (см. табл. 5). Следовательно, на фоне засоления переход не только К, но и Са из опада в солевые растворы усиливается.

С добавлением к опаду березы ПВС (с концентрацией Са 10,8 мг/л) установлено такое же (варианты Na_2SO_4 , FeCl_3 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) или более высокое (вариант NaCl) содержание Са в растительных остатках, чем с добавлением воды.

Магний. Не только Na, K и Ca, но и Mg выщелачивается из надземных органов растений. В стареющих органах концентрация Mg снижается, но в отдельных случаях он может в них накапливаться (Базилевич, Титлянова, 2008). Концентрация Mg в воде и солевых растворах натрия была ниже предела обнаружений метода. Соли железа имели небольшое количество примесей магния (см. табл. 6). Замачивание опада березы в воде, растворах солей натрия или железа привело к многократному увеличению концентрации Mg в водных и солевых вытяжках.

Таблица 6

Магний: концентрация в растворах и содержание в опаде березы по окончании эксперимента

Концентрация растворов ¹ , %	Концентрация Mg в растворах до и после замачивания опада, мг/л		Содержание Mg в опаде с учетом добавления H ₂ O или ПВС ² , мг/г		Анализ действия факторов по содержанию Mg в опаде, влияние по Снедекору	
	ДО	ПОСЛЕ	+H ₂ O	+ПВС	НСР по фактору А	Выводы
Вариант: NaCl						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,1*	37	3,4	3,8	Контроль 1,60 (1%) 0,97 (5%)	Различия средних фактора А достоверны на уровне 5%
0,3	<0,1	68	2,7	2,8		
0,5	<0,1	74	1,5	2,5		
0,7	<0,1	77	1,0	2,3		
1	<0,1	81	1,7	2,1		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	1,02 (1%) 0,61(5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 5%	
Вариант: Na ₂ SO ₄						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,1	37	3,4	3,7	Контроль 0,83 (1%) 0,50 (5%)	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	<0,1	68	2,4	2,7		
0,5	<0,1	74	2,4	2,4		
0,7	<0,1	74	1,6	2,3		
1	<0,1	81	1,9	2,1		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	0,53 (1%) 0,32 (5%)	Различия средних фактора В не доказаны на уровне 5%	
Вариант: FeCl ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,1	51	3,2	3,8	Контроль 0,87 (1%) 0,53 (5%)	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	0,84	67	2,3	2,3		
0,5	1,20	65	1,9	1,9		
0,7	1,74	71	2,0	2,0		
1	2,46	76	2,0	2,0		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	0,55 (1%) 0,33 (5%)	Различия средних фактора В недостоверны	
Вариант: Fe ₂ (SO ₄) ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,1	51	3,7	3,6	Контроль 0,75 (1%) 0,45 (5%)	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	0,60	62	1,9	1,9		
0,5	0,84	60	1,7	1,8		
0,7	1,02	62	1,2	1,6		
1	1,86	65	3,7	3,6		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	0,47 (1%) 0,29 (5%)	Различия средних фактора В недостоверны	

Примечание. 1–2 – См. табл. 1. * – Значения, ниже предела обнаружений метода.

Содержание Mg в исходном опаде березы составило 3,7±0,22 мг/г. По окончании эксперимента содержание Mg в сухом опаде (без замачивания) с добавлением воды или ПВС не различалось и составило в среднем 5,0 мг/г. На фоне выщелачивания содержание Mg в опаде снизилось в среднем в 1,4 раза, на фоне засоления – стало еще ниже, чем после замачивания в воде, особенно при использовании Fe₂(SO₄)₃. Так, содержание Mg в опаде после замачивания в 0,3–1%-ных растворах Fe₂(SO₄)₃ по сравнению с водой снизилось в среднем в 2,2 раза, в растворах других солей – в 1,5–1,7 раза (см. табл. 6).

С добавлением к опаду березы ПВС (с концентрацией Mg 5,0 мг/л) установлено такое же (варианты Na₂SO₄, FeCl₃, Fe₂(SO₄)₃) или более высокое (вариант NaCl) содержание Mg в растительных остатках, чем с добавлением воды.

Цинк. В составе солей железа были обнаружены примеси цинка (см. табл. 7). Замачивание опада березы в воде, 0,3-1%-ных растворах солей натрия или железа привело к увеличению концентрации Zn в водных и солевых вытяжках. С повышением концентрации солей железа постепенно увеличивалась и концентрация Zn в растворах как до, так и после замачивания в них опада березы.

Таблица 7

Цинк: концентрация в растворах и содержание в опаде березы по окончанию эксперимента

Концентрация растворов ¹ , %	Концентрация Zn в растворах до и после замачивания опада, мг/л		Содержание Zn в опаде с учетом добавления H ₂ O или ПВС ² , мг/кг		Анализ действия факторов по содержанию Zn в опаде, влияние по Снедекору	
	ДО	ПОСЛЕ	+H ₂ O	+ПВС	НСР по фактору А	Выводы
Вариант: NaCl						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,005*	0,27	57	54	Контроль	Различия средних фактора А недостоверны
0,3	<0,005	0,33	50	50	18,13 (1%) 10,93 (5%)	
0,5	<0,005	0,27	46	51		
0,7	<0,005	0,27	44	51		
1	<0,005	0,27	39	50		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	11,46 (1%) 6,91 (5%)	Различия средних фактора В недостоверны	
Вариант: Na ₂ SO ₄						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,005	0,27	50	55	Контроль	Различия средних фактора А недостоверны
0,3	<0,005	0,32	53	54	23,75 (1%) 14,32 (5%)	
0,5	<0,005	0,30	57	52		
0,7	<0,005	0,33	42	57		
1	<0,005	0,33	51	54		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	15,02 (1%) 9,06 (5%)	Различия средних фактора В недостоверны	
Вариант: FeCl ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,005	0,26	40	48	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	0,24	1,05	33	36	7,06 (1%) 4,26 (5%)	
0,5	0,43	1,41	31	35		
0,7	0,63	1,89	28	35		
1	0,92	2,32	27	34		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	4,46 (1%) 2,69 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 1%	
Вариант: Fe ₂ (SO ₄) ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,005	0,26	48,0	52,0	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	0,13	1,02	32,8	36,2	7,93 (1%) 4,79 (5%)	
0,5	0,20	1,21	31,3	30,0		
0,7	0,29	1,55	26,4	29,8		
1	0,43	2,09	23,3	28,3		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	5,02 (1%) 3,03 (5%)	Различия средних фактора В не доказаны на уровне 5%	

Примечание. 1–2 – См. табл. 1. * – Значения, ниже предела обнаружений метода.

Содержание Zn в исходном опаде березы составило 38,6±1,12 мг/кг. По окончанию эксперимента содержание Zn в сухом опаде (без замачивания) с добавлением воды составило в среднем 62,0 мг/кг, с ПВС – 69,4 мг/кг. Как и в случае с макроэлементами, увеличение содержания Zn в сухом опаде связано с потерей массы в процессе разложения. На фоне выщелачивания содержание Zn в опаде снизилось в среднем в 1,3 раза. На фоне засоления с использованием солей железа содержание Zn в опаде было статистически значимо (p<0,01) ниже, чем после замачивания в воде (см. табл. 7). Это указывает на более интенсивное выщелачивание Zn из растительных остатков при насыщении солями железа.

С добавлением к опаду березы ПВС (с концентрацией Zn 0,053 мг/л) установлено такое же (варианты NaCl, Na₂SO₄, Fe₂(SO₄)₃) или более высокое (FeCl₃) содержание Zn в растительных остатках, чем с добавлением воды.

Медь. Концентрация Cu в воде и солевых растворах натрия была ниже предела обнаружений метода (см. табл. 8). Замачивание опада березы в воде, 0,3–1%-ных растворах солей натрия или железа привело к увеличению концентрации Cu в водных и солевых вытяжках. Исключение составил FeCl₃, в исходных растворах которого уже были достаточно высокие примеси меди.

Таблица 8

Медь: концентрация в растворах и содержание в опаде березы по окончанию эксперимента

Концентрация растворов ¹ , %	Концентрация Cu в растворах до и после замачивания опада, мг/л		Содержание Cu в опаде с учетом добавления H ₂ O или ПВС ² , мг/кг		Анализ действия факторов по содержанию Cu в опаде, влияние по Снедекору	
	ДО	ПОСЛЕ	+H ₂ O	+ПВС	НСР по фактору А	Выводы
Вариант: NaCl						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,001*	0,026	5,6	7,0	Контроль	Различия средних фактора А недостоверны
0,3	<0,001	0,027	5,7	6,8	2,90 (1%) 1,75 (5%)	
0,5	<0,001	0,027	5,8	6,6		
0,7	<0,001	0,022	3,7	6,8		
1	<0,001	0,022	5,1	6,7		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	1,84 (1%) 1,11 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 5%	
Вариант: Na ₂ SO ₄						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,001	0,026	5,5	6,2	Контроль	Различия средних фактора А недостоверны
0,3	<0,001	0,028	5,8	6,8	1,78 (1%) 1,07 (5%)	
0,5	<0,001	0,023	6,1	7,3		
0,7	<0,001	0,028	4,9	6,7		
1	<0,001	0,025	5,0	7,0		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	1,12 (1%) 0,68 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 1%	
Вариант: FeCl ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,001	0,02	4,6	6,8	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	2,64	2,41	23,7	31,3	9,83 (1%) 5,93 (5%)	
0,5	4,47	4,38	34,0	42,9		
0,7	6,41	6,29	50,8	53,7		
1	9,15	8,92	63,4	66,9		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	6,22 (1%) 3,75 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 5%	
Вариант: Fe ₂ (SO ₄) ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,001	0,02	5,7	6,7	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 5%
0,3	0,03	0,07	5,5	7,2	0,90 (1%) 0,54 (5%)	
0,5	0,05	0,10	4,4	6,0		
0,7	0,08	0,14	5,6	6,9		
1	0,12	0,19	5,4	6,7		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	0,57 (1%) 0,34 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 1%	

Примечание. 1–2 – См. табл. 1. * – Значения, ниже предела обнаружений метода.

Содержание Cu в исходном опаде березы составило 5,1±0,36 мг/кг. По окончанию эксперимента содержание Cu в сухом опаде (без замачивания) с добавлением воды составило в среднем 6,8 мг/кг, с ПВС – 9,0 мг/кг. На фоне выщелачивания содержание Cu в опаде снизилось в среднем в 1,3 раза. На фоне засоления с использованием 0,3–1%-ных растворов FeCl₃ (с изначально высокой концентрацией Cu) произошло насыщение опада березы медью, где её содержание увеличилось в среднем в 8,0 раз, чем после замачивания в воде (см. табл. 8). В остальных вариантах с солями (NaCl, Na₂SO₄, Fe₂(SO₄)₃) содержанием Cu в растительных остатках было таким же или несколько снизилось по сравнению с замачиванием в воде.

При добавлении к опаду березы ПВС (с концентрацией Cu 0,013 мг/л) во всех вариантах с солями содержание Cu в растительных остатках было выше в среднем в 1,3 раза, чем в вариантах с добавлением воды.

Никель. Соли железа содержали примеси никеля, особенно высокая его концентрация обнаружена в растворах FeCl_3 (см. табл. 9). Замачивание опада березы в воде, 0,3–1%-ных растворах солей натрия или железа привело к увеличению концентрации Ni в водных и солевых вытяжках. Исключение составил FeCl_3 , где данный показатель оставался примерно одинаковым как до, так и после замачивания опада березы.

Таблица 9

Никель: концентрация в растворах и содержание в опаде березы по окончанию эксперимента

Концентрация растворов ¹ , %	Концентрация Ni в растворах до и после замачивания опада, мг/л		Содержание Ni в опаде с учетом добавления H ₂ O или ПВС ² , мг/кг		Анализ действия факторов по содержанию Ni в опаде, влияние по Снедекору	
	ДО	ПОСЛЕ	+H ₂ O	+ПВС	НСР по фактору А	Выводы
Вариант: NaCl						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,01*	0,068	4,2	4,2	Контроль	Различия средних фактора А недостоверны
0,3	<0,01	0,088	3,3	4,6	1,68 (1%) 1,01 (5%)	
0,5	<0,01	0,083	3,6	4,2		
0,7	<0,01	0,076	3,8	4,9		
1	<0,01	0,070	3,5	4,5		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	1,06 (1%) 0,64 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 5%	
Вариант: Na ₂ SO ₄						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,01	0,068	4,0	4,8	Контроль	Различия средних фактора А недостоверны
0,3	<0,01	0,075	3,6	4,6	1,46 (1%) 0,88 (5%)	
0,5	<0,01	0,064	3,5	5,1		
0,7	<0,01	0,061	3,4	5,2		
1	<0,01	0,054	3,9	4,8		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	0,93 (1%) 0,56 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 1%	
Вариант: FeCl ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,01	0,07	3,9	5,2	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	13,4	12,7	67,1	71,1	27,79 (1%) 16,76 (5%)	
0,5	20,6	22,5	93,0	110,9		
0,7	28,6	28,7	128,8	148,1		
1	41,2	38,6	171,8	188,8		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	17,58 (1%) 10,60 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 5%	
Вариант: Fe ₂ (SO ₄) ₃						
0 (H ₂ O _{дист})	<0,01	0,07	4,0	4,6	Контроль	Различия средних фактора «А» достоверны на уровне 1%
0,3	0,58	0,67	7,8	10,1	3,14 (1%) 1,90 (5%)	
0,5	0,97	1,11	9,4	10,1		
0,7	1,32	1,51	9,4	12,1		
1	1,84	2,11	12,5	14,6		
НСР по фактору В, выводы			Контроль	1,99 (1%) 1,20 (5%)	Различия средних фактора «В» достоверны на уровне 5%	

Примечание. 1-2 – См. табл. 1. * – Значения, ниже предела обнаружений метода.

Содержание Ni в исходном опаде березы составило 4,8±0,01 мг/кг. По окончанию эксперимента содержание Ni в сухом опаде (без замачивания) с добавлением воды составило в среднем 7,4 мг/кг, с ПВС – 9,0 мг/кг. На фоне выщелачивания содержание Ni в опаде снизилось в среднем в 1,9 раза. После насыщения растительных остатков солями натрия различий по содержанию Ni в опаде березы по сравнению с водой не выявлено. Однако в вариантах с использованием 0,3-1%-ных растворов Fe₂(SO₄)₃ и FeCl₃ содержание Ni в опаде существенно увеличилось (см. табл. 9).

При добавлении к опаду березы ПВС (где концентрация Ni была ниже предела обнаружений метода) во всех четырех вариантах с солями содержание Ni в растительных остатках было выше в среднем в 1,2 раза, чем с добавлением воды.

Зольность опада березы. Зольность сухого опада березы (без замачивания) по окончании эксперимента с добавлением воды составила 13,3%, с ПВС – 14,5%. По сравнению с исходным опадом (до начала эксперимента) зольность сухого опада увеличилась в 1,7-1,9 раза. Это, как уже было сказано ранее, связано с минерализацией и потерей органических веществ в процессе разложения опада, что в свою очередь приводит к снижению массы и, как следствие, повышению содержания зольных элементов в растительных остатках. Об этом также свидетельствует увеличение содержания в сухом опаде по завершении эксперимента ряда ХЭ, а именно: Na – в среднем с добавлением воды или ПВС в 7,5 раз; K – в 2,0; Zn и Ni – в 1,7; Ca – в 1,6; Cu – в 1,5; Mg – в 1,3 раза.

После замачивания опада березы в воде и выщелачивания ХЭ зольность растительных остатков снизилась в среднем в 1,4 раза по сравнению с сухим опадом. На фоне засоления в 0,3–1%-ных растворах солей натрия (варианты NaCl и Na₂SO₄) отмечено увеличение зольности опада в среднем в 1,3 раза вследствие интенсивного насыщения Na (см. табл. 10). При использовании солей железа зольность опада была ниже (в среднем в 1,1 раза в варианте FeCl₃) или оставалась примерно такой же (вариант Fe₂(SO₄)₃), как и после замачивания в воде.

С добавлением к опадку березы ПВС во всех вариантах эксперимента зольность растительных остатков была выше в 1,1-1,3 раза, чем с добавлением воды, что вероятно связано с дополнительным привнесом в опад ряда ХЭ, содержащихся в почвенной водной суспензии.

Таблица 10

Зольность опада березы по окончании эксперимента

Концентрация растворов ¹ , %	Содержание сырой золы с учетом добавления к опадку H ₂ O или ПВС ² , %		Анализ действия факторов, влияние по Снедекору	
	+H ₂ O	+ПВС ¹	НСР по фактору А	Выводы
Вариант: NaCl				
0 (H ₂ O _{дист})	9,2	10,6	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	10,2	11,3	1,35 (1%) 0,82 (5%)	
0,5	11,5	12,6		
0,7	11,0	13,1		
1	12,8	14,4		
НСР по фактору В, выводы	Контроль	0,85 (1%) 0,52 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 1%	
Вариант: Na ₂ SO ₄				
0 (H ₂ O _{дист})	9,4	10,9	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 5%
0,3	10,3	11,8	4,38 (1%) 2,64 (5%)	
0,5	12,0	13,1		
0,7	10,7	15,1		
1	14,4	16,0		
НСР по фактору В, комментарии	Контроль	2,77 (1%) 1,67 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 5%	
Вариант: FeCl ₃				
0 (H ₂ O _{дист})	9,1	11,3	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 1%
0,3	7,6	10,1	0,51 (1%) 0,31 (5%)	
0,5	8,0	10,3		
0,7	8,0	10,4		
1	8,5	10,6		
НСР по фактору В, комментарии	Контроль	0,33 (1%) 0,20 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 1%	
Вариант: Fe ₂ (SO ₄) ₃				
0 (H ₂ O _{дист})	9,3	10,9	Контроль	Различия средних фактора А достоверны на уровне 5%
0,3	8,6	10,7	1,36 (1%) 0,82 (5%)	
0,5	8,2	10,3		
0,7	9,4	11,0		
1	10,0	12,6		
НСР по фактору В, комментарии	Контроль	0,86 (1%) 0,52 (5%)	Различия средних фактора В достоверны на уровне 1%	

Примечание. 1–2 – см. табл. 1.

Обобщая полученные результаты по потере массы опада березы и изменению его элементного химического состава на фоне выщелачивания и засоления можно отметить следующие закономерности. Замачивание опада в воде привело к потере рассмотренных макро- (K, Na, Ca, Mg) и микроэлементов (Zn, Cu, Ni) в связи с их освобождением из разлагающихся растительных остатков и дальнейшим выщелачиванием, что в свою очередь снижает темпы разложения опада с учетом потерь массы. Больше всего в водной вытяжке увеличилась концентрация K, Ca и Mg, а в опаде березы, наоборот, уменьшилось содержание в первую очередь Na и K, а также Ni, Mg, Zn и Cu. По содержанию Ca в опаде на фоне выщелачивания отмечена тенденция к снижению, по Fe – статистически значимых различий с сухим опадом березы (без замачивания) не выявлено.

Разница в потере ХЭ из растительных остатков связана с химическими свойствами элементов, формой их нахождения в клетке и прочностью связи с органическим веществом (Ильин, 1985; Битюцкий, 2014). Известно, что Na и K находятся в клетке в ионной форме и не связаны с органическим веществом, эти элементы легко вымываются из листьев и поэтому снижение их концентрации в опаде – максимальное. Доля других макро- и микроэлементов (Ca, Mg, Fe, Mn, Ni, Zn, Cu) в ионной форме в растительной клетке невелика. Они участвуют в образовании клеточных стенок и органелл, мембран, а также входят в состав белков, органических кислот и минеральных соединений. Поэтому по сравнению с Na и K выщелачивание других ХЭ из растительных остатков после их замачивания в воде без разрушения структуры опада происходит менее интенсивно.

Полученные нами данные по снижению содержания ХЭ в результате их освобождения из разлагающегося опада и дальнейшего выщелачивания согласуются с литературными данными. Так, например, при изучении биотического круговорота азота и зольных элементов на пяти континентах (Базилевич, Титлянова, 2008) установлено, что K, Ca, Mg и Na выщелачиваются из надземных органов растений во всех природных наземных экосистемах. K – активный водный мигрант, вымывается из растительных остатков в форме водорастворимых соединений, тогда как Ca и Fe фиксируются в форме органических соединений (Иванова и др., 2019).

Использование для замачивания опада березы 0,3-1%-ных растворов солей Na или Fe (III) способствовало более интенсивному переходу K, Ca и Mg из растительных остатков в солевые вытяжки по сравнению с водными (см. табл. 4-6). На потери ХЭ из опада березы на фоне засоления указывают результаты с более низким содержанием в растительных остатках K, Ca и Mg, чем после замачивания опада в воде. Также отмечено снижение содержания Zn в опаде после насыщения солями железа: в вариантах с 0,3-1%-ными растворами FeCl₃ и Fe₂(SO₄)₃ в среднем в 1,4 и 1,7 раза соответственно. Наиболее значительные потери Ca, Mg и Zn из опада выявлены после замачивания в растворах Fe₂(SO₄)₃ (см. табл. 5-7).

Наибольшее содержание примесей обнаружено в хлориде железа (III), в исходных растворах которого была выше всего концентрация Ca, Mg, Zn, Cu и, особенно, Ni (см. табл. 5-9). На фоне засоления с использованием 0,3-1%-ных растворов FeCl₃ по сравнению с замачиванием в воде в опаде березы многократно увеличилось не только содержание Fe, но также произошло насыщение растительных остатков Cu и Ni (см. табл. 3, 8-9). При использовании FeCl₃ были получены самые низкие показатели потерь массы и зольности опада по сравнению с водой и другими солями (см. табл. 1, 10).

Из всего выше сказанного можно предположить, что в естественных условиях временное переувлажнение лесной подстилки (например, в осенний и весенний холодные периоды года) будет способствовать выщелачиванию ХЭ и изменению элементного химического состава опада березы. Это, в свою очередь, может повлиять на обилие и состав зоомикробного комплекса почвенных деструкторов за счет избирательного подавления или стимуляции отдельных видов или функциональных групп и, соответственно, на темпы разложения растительных остатков. Нельзя также исключить, что в период замачивания опада в воде складываются менее благоприятные условия для аэробных микроорганизмов. Снижение потерь массы опада березы на фоне выщелачивания по сравнению с сухим опадом (без замачивания) в среднем в 1,4 раза (см. табл. 1) подтверждают данное предположение. На фоне засоления опад березы должен стать еще менее «привлекательным» для почвенных деструкторов, чем после замачивания в воде из-за более значительных потерь K, Ca и Mg, особенно с использованием FeCl₃. С другой стороны, насыщение опада березы Na или Fe (в зависимости от соли), а также Cu и Ni (в случае использования FeCl₃) будет в свою очередь оказывать влияние на состав и активность почвенного сообщества.

В литературе имеются следующие результаты по влиянию ХЭ и качества растительных остатков на активность и «здоровье» почвенного сообщества и темпы разложения опада. Так, в опытах В.Б. Ильина с соавторами (1970) было показано, что низкие концентрации микроэлементов в большинстве случаев усиливали деятельность целлюлозоразрушающих микроорганизмов. Стимулирующее влияние В, Мо, Си и Мп на интенсивность разложения целлюлозы было неодинаковым: сильно реагировали на их внесение грибы, слабее – актиномицеты. В природных условиях почвенные ассоциации микроорганизмов также заметно усиливали процесс разложения целлюлозы при внесении микроэлементов. Е.А. Иванова с соавторами (2019) пришли к выводу, что качество растительных остатков влияет на темпы их разложения: низкие концентрации элементов питания и повышенное содержание тяжелых металлов замедляют разложение опада в условиях воздушного загрязнения на Кольском полуострове. Например, в лесах, подверженных воздушному загрязнению, по сравнению с фоном, при разложении растительных остатков возрастали потери Са, Мп, К и Mg, в тоже время более интенсивно накапливались в опаде лигнин, Al, Fe, Ni и Си. Изучение «здоровья» микробного сообщества (оцениваемое через интегральный показатель «G» – витальность микробценоза методом мультисубстратного тестирования) на засоленных почвах Дагестана (Котенко, Зубкова, 2008) показало, что микроскопические концентрации ионов (до 1 ммоль-экв на 100 г почвы) потенциально токсичных легкорастворимых солей (таких как хлор, натрий, сульфаты) влияли положительно на витальность микробного сообщества, причем, чем выше их концентрация, тем выше G. Однако высокие концентрации солей (40-400 ммоль-экв на 100 г почвы), характерные для солончаков, сводили на нет активность микробов.

Таким образом, на основе собственных и литературных данных мы предполагаем, что засоление опада березы по сравнению с его замачиванием в воде будет оказывать такое же или еще более угнетающее влияние на темпы разложения растительных остатков в зависимости от элементного химического состава и концентрации используемых солей.

В проведенных ранее исследованиях (Semenov et al., 2019) отмечено, что при инкубации различных видов растительных остатков с почвой получаются в целом такие же характеристики процесса разложения, что и при смешивании с вермикулитом, инокулированным почвенной суспензией. В нашем эксперименте, для выяснения вопроса по влиянию инокулирования опада березы почвенной суспензией на темпы разложения растительных остатков, в одну часть образцов всех вариантов (сухой опад, на фоне выщелачивания и засоления) добавили ПВС, в другую – воду ($H_2O_{\text{дист}}$). Разницы в темпах разложения опада с учетом потерь массы между добавлением к растительным остаткам ПВС и воды не установлено (см. табл. 1). Зольность опада березы во всех вариантах эксперимента с добавлением ПВС была выше в 1,1-1,3 раза, чем с добавлением воды (см. табл. 10). Однако какой-либо определенной закономерности в изменении элементного химического состава опада березы с добавлением ПВС выявить не удалось, так как содержание ХЭ в растительных остатках могло снижаться, увеличиваться или оставаться таким же, как и с добавлением к опадку воды (см. табл. 2-9).

ВЫВОДЫ

1. На фоне выщелачивания (после 24-часового замачивания опада в воде) происходит увеличение концентрации ХЭ в водной вытяжке (особенно К, Са и Mg) и снижение содержания ХЭ в опаде березы в следующем ряду: Na (в среднем в 3,6 раза) > К (в 2,4 раза) > Ni (в 1,9 раза) > Mg (в 1,4 раза) > Zn и Си (в 1,3 раза в обоих случаях). Для содержания Са в опаде после замачивания в воде отмечена тенденция к снижению (в среднем в 1,1 раза), для Fe – варьирование в довольно широком диапазоне; существенных различий с содержанием этих элементов в сухом опаде березы (без замачивания) не выявлено.

2. На фоне засоления (после 24-часового замачивания опада в 0,3–1%-ных растворах NaCl, Na_2SO_4 , $FeCl_3$ или $Fe_2(SO_4)_3$) происходит насыщение опада березы Na или Fe (в зависимости от соли). Использование солевых растворов по сравнению с водой способствовало более интенсивному выщелачиванию и, соответственно, более низкому содержанию в опаде березы К (в среднем в 1,3 раза), Са (в 1,2–1,5 раза) и Mg (в 1,5–2,2 раза). Наиболее интенсивное выщелачивание Са, Mg и Zn из опада березы выявлено на фоне засоления с использованием 0,3–1%-ных растворов $Fe_2(SO_4)_3$.

3. Наибольшее содержание примесей было обнаружено в хлориде железа (III), в исходных растворах которого была выше всего концентрация Са, Mg, Zn, Си и, особенно, Ni. Поэтому на

фоне засоления с использованием 0,3–1%-ных растворов FeCl_3 по сравнению с водой произошло насыщение опада березы не только Fe, но также Cu и Ni.

4. Наиболее высокие показатели потерь массы и зольности установлены в сухом опаде березы (без замачивания). На фоне выщелачивания потери массы и зольность опада снизились в среднем в 1,4 раза (в обоих случаях). На фоне засоления самые низкие показатели потерь массы и зольности выявлены после замачивания опада березы в 0,3–1%-ных растворах FeCl_3 в сравнении с водой и другими солями.

5. При добавлении к опаду березы почвенной водной суспензии (ПВС) его зольность была выше в 1,1–1,3 раза, чем в вариантах с водой. Разница в потере массы опада между вариантами с добавлением к растительным остаткам ПВС и воды не установлена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Замачивание опада березы в воде, 0,3-1%-ных растворах солей натрия или железа приводит к частичному выщелачиванию ХЭ (особенно К, Са и Mg), что отражается на элементном химическом составе водных и солевых вытяжек, опада березы, а также зольности и темпах разложения растительных остатков. В естественных условиях на юге Западной Сибири подобные процессы могут происходить в результате временного переувлажнения лесной подстилки (например, в осенний и весенний холодные периоды года) и на участках с засоленными почвами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны сотрудникам ИПА СО РАН за помощь в выполнении химико-аналитических работ: научному сотруднику лаб. агрохимии, к.б.н. Савенкову О.А., ведущим инженерам лаб. биогеохимии – Кривчун А.Ю., Михальченко Т.П., Осиповой А.В. Авторы также признательны рецензентам и сотрудникам редакции журнала «Почвы и окружающая среда» за работу с материалом рукописи и указание на ряд замечаний, что позволило нам выявить недочеты и улучшить качество работы.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Статья подготовлена по государственному заданию ИПА СО РАН (№ проекта 121031700309-1) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, большая часть химико-аналитических исследований проведены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-04-01369 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аристовская Т.В. *Микробиологические процессы почвоведения*. Л.: Наука, 1980. 187 с.
2. Базилевич Н.И., Титлянова А.А. *Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах* / Отв. ред. А.А. Тишков. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. 381 с.
3. Битюцкий Н.П. *Минеральное питание растений*: учебник. СПб.: Издательство С.-Петерб. университета, 2014. 540 с.
4. Бобкова К.С., Осипов А.Ф. Круговорот углерода в системе фитоценоз-почва в чернично-сфагновых сосняках средней тайги Республики Коми // *Лесоведение*. 2012. №2. С.11-18.
5. Буянтуева Л.Б., Жапова Д.Н., Намсараев Б.Б. Годичная динамика деструкции листового опада в лесных экосистемах пригородной зоны г. Улан-Удэ // *Вестник Бурятского государственного университета. Сер. Биология, география*. 2010. №4. С.85-87.
6. ГОСТ 32933-2014 (ISO 5984:2002, MOD) Корма, комбикорма. Метод определения содержания сырой золы. М.: Стандартинформ, 2015.
7. Иванова Е.А., Лукина Н.В., Данилова М.А., Артемкина Н.А., Смирнов В.Э., Ершов В.В., Исаева Л.Г. Влияние аэротехногенного загрязнения на скорость разложения растительных остатков в сосновых лесах на северном пределе распространения // *Лесоведение*. 2019. №6. С.533-546. DOI: [10.1134/S0024114819060044](https://doi.org/10.1134/S0024114819060044)
8. Ильин В.Б. *Элементный химический состав растений*. Новосибирск: Наука, 1985. 129 с.
9. Ильин В.Б., Наплекова Н.Н., Степанова М.Д. О влиянии микроорганизмов и темпах освобождения В, Мо, Си и Мп из растительных остатков // *Известия СО АН СССР. Сер. биологические науки*. 1970. Вып.1. №5-1. С.45-51.
10. Карпачевский Л.О. *Лес и лесные почвы*. М.: Лесная промышленность, 1981. 264 с.
11. *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.
12. Котенко М.Е., Зубкова Т.А. Влияние засоленных почв на состояние микробного сообщества // *Вестник Казанского ГАУ*. 2008. Т.7. №1(7). С.138-141.

13. Ларионова А.А., Квиткина А.К., Быховец С.С., Лопес-де-Гереню В.О., Колягин Ю.Г., Каганов В.В. Влияние азота на минерализацию и гумификацию лесных опавов в модельном эксперименте // *Лесоведение*. 2017. №2. С.128-139.
14. Менько Е.В., Тихонова Е.Н., Уланова Р.В., Сухачева М.В., Кузнецова Т.В., Удальцов С.Н., Кравченко И.К. Температурная чувствительность процессов начального этапа микробной деструкции древесного опада в лесной почве // *Биофизика*. 2018. Т.63. №5. С. 963-974. DOI: [10.1134/S0006302918050150](https://doi.org/10.1134/S0006302918050150)
15. Мишустин Е. Н. *Ассоциации почвенных микроорганизмов*. М.: Наука, 1975. 114 с.
16. Панкова Е.И., Воробьева Л.А., Гаджиев И.М., Горохова И.Н., Елизарова Т.Н., Королук Т.В., Лопатовская О.Г., Новикова А.Ф., Решетов Г.Г., Скрипникова М.И., Славный С., Черноусенко Г.И., Ямнова И.А. *Засоленные почвы России*. М.: ИКЦ Академкнига, 2006. 854 с.
17. ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011 Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. М.: Стандартинформ, 2011.
18. Почикалов А.В., Карелин Д.В. Окологодичные наблюдения за разложением опада тундровых растений через потерю массы и эмиссию CO₂: роль биотических и абиотических факторов, сезонов года, биотопа и пространственно-временного масштаба // *Журнал общей биологии*. 2014. Т.75. №3. С.163-181.
19. Сорокин О.Д. *Прикладная статистика на компьютере*. 2-е изд. Новосибирск, 2012. 282 с.
20. Стриганова Б.Р. *Питание почвенных сапрофагов*. М.: Наука, 1980. 243 с.
21. Штоль В.А. Особенности вегетативного возобновления березняков лесостепи Западной Сибири // *Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование*. 2016. Т.2. №1. С.92-103. DOI: [10.21684/2411-7927-2016-2-1-92-103](https://doi.org/10.21684/2411-7927-2016-2-1-92-103)
22. Anderson J.M. *Food web functioning and ecosystems processes: problems and perception of scaling / Invertebrates as Webmasters in Ecosystems*. CABI Publishing, 2000. P. 3-24. DOI: [10.1079/9780851993942.0003](https://doi.org/10.1079/9780851993942.0003)
23. Andronov E.E., Pinaev A.G., Pershina E.V., Petrova S.N., Rakhimgalieva S.Z., Akhmedenov K.M., Sergaliev N.K., Gorobets A.V. Analysis of the structure of microbial community in soils with different degrees of salinization using T-RFLP and real-time PCR techniques // *Eurasian Soil Science*. 2012. Vol.45. No2. P.147-156. DOI: [10.1134/S1064229312020044](https://doi.org/10.1134/S1064229312020044)
24. Bani A., Pioli S., Ventura M., Panzacchi P., Borruso L., Tognetti R., Tonon G., Brusetti L. The role of microbial community in the decomposition of leaf litter and Deadwood // *Applied Soil Ecology*. 2018. Vol.126. P.75-84. DOI: [10.1016/j.apsoil.2018.02.017](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.017)
25. Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors // *Soil Biology & Biochemistry*. 2014. Vol.78. P.222-232. DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.08.005](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005)
26. Berg B., McClaugherty C. *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Third Edition. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 315 p. DOI: [10.1007/978-3-642-38821-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38821-7)
27. Bezkorovainaya I.N. Participation of soil invertebrates in the organic matter decomposition in forest ecosystems of Central Siberia // *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol.44. No2. P.186-193. DOI: [10.1134/S1064229311020025](https://doi.org/10.1134/S1064229311020025)
28. Bokhorst S., Bjerke J.W., Melillo J., Callaghan T.V., Phoenix G.K. Impacts of extreme winter warming events on litter decomposition in a sub-Arctic heath community // *Soil Biology & Biochemistry*. 2010. Vol.42. P.611-617. DOI: [10.1016/j.soilbio.2009.12.011](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.12.011)
29. Bradford M.A., Berg B., Maynard D.S., Wieder W.R., Wood S.A. Understanding the dominant controls on litter decomposition // *J. Ecology*. 2016. Vol.104. P.229-238. DOI: [10.1111/1365-2745.12507](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12507)
30. Caton T.M., Caton I.R., Witte L.R., Schneegurt M.A. Archaeal diversity at the Great salt plains of Oklahoma described by cultivation and molecular analyses // *Microbial Ecology*. 2009. Vol.58. No3. P.519-528. DOI: [10.1007/s00248-009-9507-y](https://doi.org/10.1007/s00248-009-9507-y)
31. Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C., Amatangelo K. et al. Plant species traits are the dominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide // *Ecology letters*. 2008. Vol.10. P.1065-1071. DOI: [10.1111/j.1461-0248.2008.01219.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01219.x)
32. Fierer N., Jackson R.B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities // *PNAS*. 2006. Vol.103. No3. P.626-631. DOI: [10.1073/pnas.0507535103](https://doi.org/10.1073/pnas.0507535103)
33. Handelsman J. Metagenomics: application of genomics to uncultured microorganisms // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2004. Vol.68. No4. P.669-685. DOI: [10.1128/MMBR.68.4.669-685.2004](https://doi.org/10.1128/MMBR.68.4.669-685.2004)
34. Hobbie S.E., Chapin F.S. Winter regulation of tundra litter carbon and nitrogen dynamics // *Biogeochemistry*. 1996. Vol.35. P.327-338. DOI: [10.1007/BF02179958](https://doi.org/10.1007/BF02179958)
35. Hollister E.B., Engledow A.S., Hammett A.J.M., Provin T.L., Wilkinson H.H., Gentry T.J. Shifts in microbial community structure along an ecological gradient of hypersaline soils and sediments // *The ISME J*. 2010. No4. P.829-838. DOI: [10.1038/ismej.2010.3](https://doi.org/10.1038/ismej.2010.3)
36. Kasparia M., Stephen P., Yanoviak R. D., May Y., Claya N.A. Sodium shortage as a constraint on the carbon cycle in an inland tropical rainforest // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2009. Vol.106. No46. P.19405-19409. DOI: [10.1073/pnas.0906448106](https://doi.org/10.1073/pnas.0906448106)
37. Lozupone C.A., Knight R. Global patterns in bacterial diversity // *PNAS*. 2007. Vol.104. No27. P.11436-11440. DOI: [10.1073/pnas.0611525104](https://doi.org/10.1073/pnas.0611525104)

38. *Osipov A.F.* Carbon emission from the soil surface in a mature blueberry pine forest of the middle taiga (Republic of Komi) // *Eurasian Soil Science*. 2016. Vol.49 No8. P.926-933. DOI: [10.1134/S1064229316080093](https://doi.org/10.1134/S1064229316080093)
39. *Parker L.W., Santos P.F., Phillips J., Whitford W.G.* Carbon and nitrogen dynamics during the decomposition of litter and roots of a Chihuahuan desert annual, *Lepidium lasiocarpum* // *Ecological Monographs*. 1984. Vol.54. P.339-360. DOI: [10.2307/1942501](https://doi.org/10.2307/1942501)
40. *Prescott C.* Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils // *Biogeochemistry*. 2010. Vol.101. P.133-149. DOI: [10.1007/s10533-010-9439-0](https://doi.org/10.1007/s10533-010-9439-0)
41. *Rakhleeva A.A., Semenova T.A., Striganova B.R., Terekhova V.A.* Dynamics of zoomicrobial complexes upon decomposition of plant litter in spruce forests of the southern taiga // *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol.44. No1. P.38-48. DOI: [10.1134/S1064229310071026](https://doi.org/10.1134/S1064229310071026)
42. *Rothschild L.J., Mancinelli R.L.* Life in extreme environments // *Nature*. 2001. No409. P.1092-1101. DOI: [10.1038/35059215](https://doi.org/10.1038/35059215)
43. *Rousk J., Beeth E., Brookes Ph.C., LauberCh.L., Lozupone C., Caporaso J.G., Knight R., Fierer N.* Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil // *The ISME J*. 2010. No4. P.1340-1351. DOI: [10.1038/ismej.2010.58](https://doi.org/10.1038/ismej.2010.58)
44. *Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Khromyckina D.P., Semenova N.A., Lopes de Gerenyu V.O.* Plant residues decomposition and formation of active organic matter in the soil of the incubation experiments // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol.52. №10. P.1183-1194. DOI: [10.1134/S0032180X19100113](https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113)
45. *Walsh D.A., Papke R.T., Doolittle F.W.* Archaeal diversity along a soil salinity gradient prone to disturbance // *Environmental Microbiology*. 2005. Vol.7. No10. P.1655-1666. DOI: [10.1111/j.1462-2920.2005.00864.x](https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2005.00864.x)
46. *Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G.* Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors // *Journal of Plant Ecology*. 2008. Vol.1. P.85-93. DOI: [10.1093/jpe/rtn002](https://doi.org/10.1093/jpe/rtn002)

Поступила в редакцию 26.02.2021

Принята 23.04.2021

Опубликована 24.04.2021

Сведения об авторах:

Нечаева Таисия Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); nechaeva@issa-siberia.ru

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

Худяев Сергей Анатольевич – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биогеохимии ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); khudayev@issa-siberia.ru

Любечанский Илья Игоревич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии беспозвоночных животных ФГБУН Института систематики и экологии животных СО РАН (г. Новосибирск, Россия); lubech@gmail.com

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

CHANGES IN CHEMICAL ELEMENT COMPOSITION OF *BETULA PENDULA* LITTER DURING DECOMPOSITION IN A LABORATORY EXPERIMENT SIMULATING LEACHING AND SALINIZATION

© 2020 T.V. Nechaeva ¹, N.V. Smirnova ¹, S.A. Khudayev ¹, I.I. Lyubchanskii ²

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

²Institute of Systematics and Ecology of Animals of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. E-mail: lubech@gmail.com

The aim of the study was to estimate changes in chemical composition of the white birch litter during decomposition in a laboratory experiment simulating leaching and salinization.

Location and time of the study. Fresh litter of *Betula pendula* leaves were collected in the forest-steppe zone of Priobskoe plateau (40 km to the east of Novosibirsk, Russia) in October 2016. The incubation experiment was carried out in the laboratory of Agrochemistry of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia) during 105 days (24.05.2017–06.09.2017) at 24 °C).

Methodology. Distilled water (50 ml) or the same volume of NaCl, Na₂SO₄, FeCl₃, Fe₂(SO₄)₃ solutions with concentrations of 0.3, 0.5, 0.7 and 1% were added to 2 g of air-dried birch litter (leaves). The litter was placed into 100 ml plastic cups. The salt concentration in solutions was chosen according to the soil salinity gradation, i.e. 0.3% as weak (0.2–0.4%), 0.5% as medium (0.4–0.6%), 0.7% as strong (0.6–0.8%), and 1% as solonchak (Classification..., 1977). After 24 hours surplus water or salt solutions were decanted and filtered, and the birch litter was air-dried. After that 5 ml soil-water suspension (soil:distilled water 1: 2.5 m/v) was added into half of the cups with litter, whereas another half of cups with litter received 5 ml of distilled water. The variant with litter and no water was also included, designated as “dry birch litter”. The cups with litter were closed up and incubated during 105 days in the thermostat (+24 °C) with periodic ventilation. After incubation the litter was air-dried and weighed. The litter mass loss after decomposition was calculated as a difference between a sample mass at the beginning and at the end of the experiment and expressed as percentage. Concentrations of Na, Fe, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Ni were determined by atomic-absorption spectrophotometry (AAnalyst 400, Perkin Elmer Inc., USA) in water samples, 0.3–1% salt solutions and birch litter. The total number of cups with litter in the experiment was 150.

The term «under leaching» refers to the decrease in chemical element concentration in the litter after incubation with water. The term «under salinization» refers to the increase of Na or Fe concentrations in the litter after incubation with salt solutions. The litter mass loss presented as air-dry mass, concentration of chemical elements in the litter and ash content are expressed on the oven-dry mass basis.

Results. Under leaching the concentration of chemical elements was increased in water extracts (especially K, Ca, Mg) and decreased in birch litter in the row: Na (3.6 times) → K (2.4 times) → Ni (1.9 times) → Mg (1.4 times) → Zn and Cu (1.3 times). In comparison with water, the interaction between litter and Na and Fe salt solutions (concentrations 0.3–1%) led to intensive leaching and, correspondingly, to the 1.3 times lower litter K content, as well as 1.2–1.5 times and 1.5–2.2 times lower Ca and Mg content, respectively. The highest concentration of Ca, Mg, Zn, Cu, Ni was detected in FeCl₃ solutions at the start of the experiment. The maximal mass and ash content losses were detected in the dry birch litter. On average, leaching was found to decrease 1.4 times mass loss and ash content in the litter. The minimal mass and ash content losses under salinization were found after litter incubation with FeCl₃ (0.3–1%) solutions. The difference in mass loss between variants litter-water and litter-soil water suspension was not detected, although litter ash content after addition of soil water suspension was 1.1–1.3 times higher.

Conclusions. The interaction birch litter with water and Na and Fe salt solutions (0.3–1%) led to modification of elemental chemical composition of plant litter as a result of leaching of chemical elements (especially K, Ca, Mg) from litter and increased concentrations of Na, Fe and some other elements (depending on the salt used). It led to the decrease in plant litter decomposition rate, which under the natural conditions in the south of West Siberia can take place as a result of temporary overwetting of the forest litter (for instance, in autumn or spring) as well as in areas occupied by saline soils.

Key words: birch leaves; plant residues; sodium chloride; sodium sulphate; ferric chloride (III); ferric sulphate (III); leaching; enrichment; chemical elements (Na, Fe, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Ni); ash; mass loss; decomposition rate

How to cite: Nechaeva T.V., Smirnova N.V., Khudayev S.A., Lyubchanskii I.I. Changes in chemical element composition of *Betula pendula* litter during decomposition in a laboratory experiment simulating leaching and

salinization // *The Journal of Soils and Environment*. 2020. 3(4). e130. doi: [10.31251/pos.v3i4.130](https://doi.org/10.31251/pos.v3i4.130) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Aristovskaya T.V. *Microbiological features of soil formation processes*. Leningrad: Nauka Publ., 1980. 187 p. (in Russian)
2. Bazilevich N.I., Titlyanova A.A. *Biotic turnover of five continents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2008. 381 p. (in Russian)
3. Bityutsky N.P. *Plant mineral nutrition: textbook*. Sankt-Peterburg: Publishing House of Sankt-Petersburg University, 2014. 540 p. (in Russian)
4. Bobkova K.S., Osipov A.F. Carbon cycling in system phytocenosis-soil in bilberry-sphagnum pine forests of the middle taiga (Republic of Komi), *Russian Journal of Forest Science*, 2012, No2, p.11-18. (in Russian)
5. Buyantueva L.B., Zhapova D.N., Namsaraev B.B. A year dynamics of microbial destruction of leaf litter in forest ecosystems of the suburb of Ulan-Ude, *BSU bulletin. Biology, geography*, 2010, No4, p.85-87. (in Russian)
6. GOST 32933-2014 (ISO 5984:2002, MOD) Feeds, compound feeds. Method for determination of crude ash. Moscow: Standardinform, 2015.
7. Ivanova E.A., Lukina N.V., Danilova M.A., Artemkina N.A., Smirnov V.E., Ershov V.V., Isaeva L.G. The effect of air pollution on the rate of decomposition of plant litter at the northern limit of pine forests, *Lesovedenie*, 2019, No6, p.533-546. (in Russian) DOI: [10.1134/S0024114819060044](https://doi.org/10.1134/S0024114819060044)
8. Ilyin V.B. *Plants chemical composition*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985. 129 p. (in Russian)
9. Ilyin V.B., Naplekova N.N., Stepanova M.D. Impact of trace elements on cellulose destructors and rate of release of B, Mo, Cu и Mn from plant litter, *Izvestiya SB AS USSR, Ser. Biological Sciences, Iss.1. No5*, p.45-51. (in Russian)
10. Karpachevsky L.O. *Forest and forest soils*. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1981, 264 p. (in Russian)
11. *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)
12. Kotenko M.E., Zubkova T.A. Impact of saline soils on microbial associations, *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*, 2008, Vol.7, No1(7), p.138-141. (in Russian)
13. Larionova A.A., Kvitkina A.K., Bykhovets S.S., Lopes-de-Gerenyu V.O., Yu.G. Kolyagin, Kaganov V.V. The contribution of nitrogen to mineralization and humification of forest litter in simulation study, *Russian Journal of Forest Science*, 2017, No2, p.128-139. (in Russian)
14. Menko E.V., Tikhonova E.N., Ulanova R.V., Sukhacheva M.V., Kuznetsova T.V., Udaltsov S.N., Kravchenko I.K. Temperature sensitivity of the initial stage of microbial woody litter decomposition in forest soil, *Biofizika*, 2018, Vol.63, No5, p.963-974. (in Russian) DOI: [10.1134/S0006302918050150](https://doi.org/10.1134/S0006302918050150)
15. Mishustin E.N. *Associations of soil microorganisms*. Moscow: Nauka Publ., 1975. 114 p. (in Russian)
16. Pankova E.I., Vorobeva L.A., Gadzhiev I.M., Gorokhova I.N., Elizarova T.N., Korolyuk T.V., Lopatovskaya O.G., Novikova A.F., Reshetov G.G., Skripnikova M.I., Slavnyi Yu.A., Chernousenko G.I., Yamnova I.A. *Saline soils of Russia*. Moscow: IKTS Akademkniga, 2006. 854 p. (in Russian)
17. PND F 16.2.2:2.3.71-2011 Method of measurement of metals content in waste water sediments, bed silt and plant samples by spectral methods Moscow: Standardinform, 2011. (in Russian)
18. Pochikalov A.V., Karelin D.V. A field study of tundra plant litter decomposition rate via mass loss and carbon dioxide emission: The role of biotic and abiotic controls, biotope, season of year, and spatial-temporal scale, *Journal of General Biology*, 2014, Vol.75, No3, p.163-181. (in Russian)
19. Sorokin O.D. *Applied statistics*. Novosibirsk, 2012. 282 p. (in Russian)
20. Striganova B.R. *Soils saprophage nutrition*. Moscow: Nauka Publ., 1980. 243 p. (in Russian)
21. Shtol V.A. The Features of Birch Forest Vegetative Reproduction in Western Siberia, *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 2016, Vol.2, No1, p.92-103. (in Russian) DOI: [10.21684/2411-7927-2016-2-1-92-103](https://doi.org/10.21684/2411-7927-2016-2-1-92-103)
22. Anderson J.M. *Food web functioning and ecosystems processes: problems and perception of scaling*. Invertebrates as Webmasters in Ecosystems. CABI Publishing, 2000. p. 3-24. DOI: [10.1079/9780851993942.0003](https://doi.org/10.1079/9780851993942.0003)
23. Andronov E.E., Pinaev A.G., Pershina E.V., Petrova S.N., Rakhimgalieva S.Z., Akhmedenov K.M., Sergaliev N.K., Gorobets A.V. Analysis of the structure of microbial community in soils with different degrees of salinization using T-RFLP and real-time PCR techniques, *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol.45, No2, p.147-156. DOI: [10.1134/S1064229312020044](https://doi.org/10.1134/S1064229312020044)
24. Bani A., Pioli S., Ventura M., Panzacchi P., Borruso L., Tognetti R., Tonon G., Brusetti L. The role of microbial community in the decomposition of leaf litter and Deadwood, *Applied Soil Ecology*, 2018, Vol.126, p.75-84. DOI: [10.1016/j.apsoil.2018.02.017](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.017)
25. Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors, *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, Vol.78, p. 222-232. DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.08.005](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.005)
26. Berg B., McLaugherty C. *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Third Edition. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 315 p. DOI: [10.1007/978-3-642-38821-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-38821-7)

27. *Bezkorovainaya I.N.* Participation of soil invertebrates in the organic matter decomposition in forest ecosystems of Central Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol.44, No2, p.186-193. DOI: [10.1134/S1064229311020025](https://doi.org/10.1134/S1064229311020025)
28. *Bokhorst S., Bjerke J.W., Melillo J., Callaghan T.V., Phoenix G.K.* Impacts of extreme winter warming events on litter decomposition in a sub-Arctic heath community, *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, Vol.42, p.611-617. DOI: [10.1016/j.soilbio.2009.12.011](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.12.011)
29. *Bradford M.A., Berg B., Maynard D.S., Wieder W.R., Wood S.A.* Understanding the dominant controls on litter decomposition, *J. Ecology*, 2016, Vol.104, p.229-238. DOI: [10.1111/1365-2745.12507](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12507)
30. *Caton T.M., Caton I.R., Witte L.R., Schneegurt M.A.* Archaeal diversity at the Great salt plains of Oklahoma described by cultivation and molecular analyses, *Microbial Ecology*, 2009, Vol.58, No3, p.519-528. DOI: [10.1007/s00248-009-9507-y](https://doi.org/10.1007/s00248-009-9507-y)
31. *Cornwell W.K., Cornellisen J.H.C., Amatangelo K. et al.* Plant species traits are the dominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide, *Ecology letters*, 2008, Vol.10, p.1065-1071. DOI: [10.1111/j.1461-0248.2008.01219.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01219.x)
32. *Fierer N., Jackson R.B.* The diversity and biogeography of soil bacterial communities, *PNAS*, 2006, Vol.103, №3, p.626-631. DOI: [10.1073/pnas.0507535103](https://doi.org/10.1073/pnas.0507535103)
33. *Handelsman J.* Metagenomics: Application of Genomics to Uncultured Microorganisms, *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2004, Vol.68, No4, p.669-685. DOI: [10.1128/MMBR.68.4.669-685.2004](https://doi.org/10.1128/MMBR.68.4.669-685.2004)
34. *Hobbie S.E., Chapin F.St.* Winter regulation of tundra litter carbon and nitrogen dynamics, *Biogeochemistry*, 1996, Vol.35, p.327-338. DOI: [10.1007/BF02179958](https://doi.org/10.1007/BF02179958)
35. *Hollister E.B., Engledow A.S., Hammett A.J.M., Provin T.L., Wilkinson H.H., Gentry T.J.* Shifts in microbial community structure along an ecological gradient of hypersaline soils and sediments, *The ISME J.*, 2010, №4, p.829-838. DOI: [10.1038/ismej.2010.3](https://doi.org/10.1038/ismej.2010.3)
36. *Kasparia M., Stephen P., Yanoviak, R. D., May Y., Claya N.A.* Sodium shortage as a constraint on the carbon cycle in an inland tropical rainforest, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2009, Vol.106, No46, p.19405-19409. DOI: [10.1073/pnas.0906448106](https://doi.org/10.1073/pnas.0906448106)
37. *Lozupone C.A., Knight R.* Global patterns in bacterial diversity, *PNAS*, 2007, Vol.104, No27, p.11436-11440. DOI: [10.1073/pnas.0611525104](https://doi.org/10.1073/pnas.0611525104)
38. *Osipov A.F.* Carbon emission from the soil surface in a mature blueberry pine forest of the middle taiga (Republic of Komi), *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol.49, No8, p.926-933. DOI: [10.1134/S1064229316080093](https://doi.org/10.1134/S1064229316080093)
39. *Parker L.W., Santos P.F., Phillips J., Whitford W.G.* Carbon and nitrogen dynamics during the decomposition of litter and roots of a Chihuahuan desert annual, *Lepidium lasiocarpum*, *Ecological Monographs*, 1984, Vol.54, p.339-360. DOI: [10.2307/1942501](https://doi.org/10.2307/1942501)
40. *Prescott C.* Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils, *Biogeochemistry*, 2010, Vol.101, p.133-149. DOI: [10.1007/s10533-010-9439-0](https://doi.org/10.1007/s10533-010-9439-0)
41. *Rakhleeva A.A., Semenova T.A., Striganova B.R., Terekhova V.A.* Dynamics of zoomicrobial complexes upon decomposition of plant litter in spruce forests of the southern taiga, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol.44, No1, p.38-48. DOI: [10.1134/S1064229310071026](https://doi.org/10.1134/S1064229310071026)
47. *Rothschild L.J., Mancinelli R.L.* Life in extreme environments, *Nature*, 2001, No409, p.1092-1101. DOI: [10.1038/35059215](https://doi.org/10.1038/35059215)
42. *Rousk J., Beeth E., Brookes Ph.C., Lauber Ch.L., Lozupone C., Caporaso J.G., Knight R., Fierer N.* Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil, *The ISME J.*, 2010, No4, p.1340-1351. DOI: [10.1038/ismej.2010.58](https://doi.org/10.1038/ismej.2010.58)
43. *Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Khromyckina D.P., Semenova N.A., Lopes de Gerenyu V.O.* Plant residues decomposition and formation of active organic matter in the soil of the incubation experiments, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol.52, No10, p.1183-1194. DOI: [10.1134/S0032180X19100113](https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113)
44. *Walsh D.A., Papke R.T., Doolittle F.W.* Archaeal diversity along a soil salinity gradient prone to disturbance, *Environmental Microbiology*, 2005, Vol.7, No10, p.1655-1666. DOI: [10.1111/j.1462-2920.2005.00864.x](https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2005.00864.x)
45. *Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G.* Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors, *Journal of Plant Ecology*, 2008, Vol.1, p.85-93. DOI: [10.1093/jpe/rtn002](https://doi.org/10.1093/jpe/rtn002)

Received 26 February 2021

Accepted 23 April 2021

Published 24 April 2021

About the authors:

Nechaeva Taisia V. – Candidate of Biological Sciences, 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); nechaeva@issa-siberia.ru

Smirnova Natalya V. – Candidate of Biological Sciences, 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); smirnova@issa-siberia.ru

Khudayev Sergey A. – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of biogeochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); khudayev@issa-siberia.ru

Lyubechanskii Ilya I. – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Invertebrate Ecology in the Institute of Systematics and Ecology of Animals of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); lubech@gmail.com

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/)



РЕСУРСЫ И СПЕЦИФИКА РЕКУЛЬТИВАЦИИ ОТВАЛОВ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ХАКАСИИ

© 2020 Е.А. Гуркова ¹, В.А. Андроханов ¹, А.Т. Лавриненко ²

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

²ФГБУН НИИ аграрных проблем Хакасии СО РАН, улица Садовая 5, с. Зеленое, Республика Хакасия, 655132, Россия. E-mail: aleks233@yandex.ru

В статье приведен анализ природных условий Хакасии с целью оценки их ресурсов и вклада в эффективность рекультивации на отвалах угледобывающей промышленности. Обеспеченность ресурсов потенциально плодородных пород оценивали по мощности залежей четвертичных суглинистых и глинистых пород с учетом их объема, необходимого для проведения рекультивации. Оценка обеспеченности ресурсами плодородного слоя почв проводили по мощности и плотности гумусового горизонта наиболее плодородных почв региона с учетом регламента проведения оптимальных схем рекультивации, в соответствии с нормативными документами и методическими рекомендациями. Обеспеченность гидротермическими ресурсами оценивали по величине суммы активных температур и гидротермическому коэффициенту. Показана сильная неравномерность распределения рекультивационных ресурсов по территории региона. Для южной части Хакасии с наибольшими площадями техногенных ландшафтов ресурсы оценены как дефицитные, недостаточные для реализации оптимальных схем рекультивации. Дефицитность ресурсов подтверждается преобладанием площади самозарастающих отвалов угольных разрезов. В статье приведены примеры успешного учета специфики природных условий для снижения остроты дефицита ресурсов и повышения эффективности самовосстановления техногенных ландшафтов.

Ключевые слова: ресурсы рекультивации; потенциально плодородная порода; плодородный слой почвы; техногенный ландшафт; техногенные почвы; угледобывающая промышленность; Хакасия

Цитирование: Гуркова Е.А., Андроханов, В.А., Лавриненко А.Т. Ресурсы и специфика рекультивации отвалов угледобывающей промышленности Хакасии // Почвы и окружающая среда. 2020. Том 3. № 4. e127. doi: 10.31251/pos.v3i4.127

ВВЕДЕНИЕ

Проведение рекультивации на нарушенных землях подразумевает восстановление их утраченного качественного состояния, достаточного для целевого использования (ГОСТ, 2017). С ландшафтно-экологической точки зрения основной задачей рекультивации является восстановление почвенного покрова, способного выполнять функции, характерные для естественных почв ненарушенного ландшафта (Гаджиев и др., 2001). Поскольку новообразованные почвы техногенного ландшафта формируются и развиваются под совокупным воздействием тех же факторов среды, что и естественные, то очевидно, что для выбора оптимального направления рекультивации важен как анализ собственно природных факторов, так и анализ специфики техногенного ландшафта. Актуальность подобных исследований вызвана необходимостью повышать эффективность восстановительных мероприятий на нарушенных территориях.

С точки зрения развития горнодобывающей промышленности Хакасия – один из перспективных районов Сибирского федерального округа. Наибольший вклад в добычу полезных ископаемых дают угледобывающие предприятия: восемь разрезов на трех месторождениях открытым способом добывают 22,6 млн. тонн каменного угля (Государственный доклад..., 2018; Лысенко и др., 2019). Площадь земель, нарушаемых в ходе такой масштабной добычи, существенна, и по некоторым оценкам достигает 5–8 тыс. га, а ежегодное увеличение составляет до 260 га (Зеньков и др., 2017; Рекультивация..., 2017). Учитывая прогнозы темпа роста добычи угля в регионе (Плаkitкина, 2016), следует ожидать и масштабное увеличение нарушенных территорий. Темпы рекультивации уже сейчас существенно ниже, а в перспективе соотношение нарушенных и восстановленных земель ожидается гораздо шире, чем в настоящее время. Отмечается и низкая эффективность восстановительных мероприятий (Рекультивация..., 2016). Наряду с экономическими причинами значительное влияние оказывают и природные условия Хакасии. В настоящей статье представлен их

анализ и оценка как ресурсов рекультивации, в том числе с точки зрения специфики техногенного ландшафтогенеза и почвообразования на отвалах угольных разрезов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретической и методической основой настоящей статьи выступили работы Андроханова и др. (2004), Андроханова и Курачева (2010), Гаджиева и др. (2001). Анализ природных факторов выполнен для лесостепных и степных районов Минусинской котловины в границах Республики Хакасия (левобережье р. Енисей) с применением сравнительно-географического, сравнительно-экологического, ландшафтно-картографического методов и подходов. Ресурсы рекультивации оценивали с точки зрения их использования при проведении восстановительных мероприятий на отвалах пород угледобывающих разрезов республики по методике, описанной в работе Андроханова и Курачева (2010). К ресурсам отнесены биоклиматические параметры, запасы потенциально плодородных пород (ППП) и плодородного слоя почвы (ПСП). Запасы ППП и ПСП необходимы для формирования насыпных плодородных слоев в рамках технического этапа рекультивации. Учет запасов проводили на основании данных о мощности пород и плотности; таким же образом и для плодородного слоя почв. Считаем важным уточнить, что в настоящей статье представлена общая оценка ресурсов с целью определения потенциала для рекультивации региона в целом, что может иметь практическое применение в дальнейшем при решении вопросов размещения добывающих предприятий. Названия почв приведены в соответствии с работами Танзыбаев (1993), Национальным атласом почв (2011), а также с классификацией IUSS Working Group WRB (2014).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для успешной реализации рекультивационных мероприятий, а также функционирования и развития техногенного ландшафта учет климатических условий является приоритетом. Сумму биологически активных температур, количество осадков и испаряемость обычно относят к т.н. ресурсам рекультивации (Андроханов, Курачев, 2010), поскольку от этих характеристик зависят темпы преобразования субстрата техногенного ландшафта и интенсивность процессов почвообразования в нем, что дает возможность прогнозных оценок развития почвенного покрова.

Климатически территория Хакасии неоднородна. Причина этому – ее орографическая специфика: цепочка небольших котловин, располагающаяся субмеридионально более чем на 300 км, окаймлена горными хребтами. Орографическая неоднородность обуславливает близкое к концентрическому распределение изогий в котловине, что выражается в росте количества осадков от центра к периферии. Годовая разница в количестве влаги между предгорьями и центральными частями котловины достигает 300 мм и более. Западное окаймление (Абаканский хребет, Кузнецкий Алатау) котловины обеспечивает эффект «дождевой тени» и меньшее количество осадков здесь. Средняя сумма осадков теплого периода в котловине колеблется от 440–500 (в лесостепных низкогорьях вдоль периферии) до 200 мм (в отдельные годы менее 150 мм) в центральной (степной) части (Николаева, 2007; Танзыбаев, 1993). Коэффициент увлажнения (по Иванову) составляет от 1,0–0,9 до 0,5 (Атлас..., 1999). В среднем по величине гидротермического коэффициента территория Минусинской котловины относится к категории недостаточно увлажненной, а по теплообеспеченности к умеренно теплой. Несмотря на это, в летний период средние месячные температуры достигают 17–19°, а абсолютные +36°С (Атлас..., 1999; Новицкий и др., 2012). При небольшом количестве осенне-зимних осадков (не больше 40–50 мм) и малой мощности снегового покрова (не выше 20 см в лесостепи) почвы в котловине промерзают до глубины 2–3 метра (Танзыбаев, 1993). Другими словами, преобразование субстрата протекает преимущественно в ходе физического выветривания, а течение процессов почвообразования в нем осуществляется в условиях дефицита влаги и сильного иссушения в вегетационный период.

Одним из важнейших ландшафто- и почвообразующих факторов является подстилающий субстрат. Как известно, наиболее эффективна рекультивация субстратов с высоким содержанием тонкодисперсной фракции, например, лёссовидных суглинков. Минусинская котловина отличается, например, от межгорных котловин Тувы широким развитием красноцветных и желтобурых глин и суглинков (небольшой мощности до 5–15 м), которые можно использовать при рекультивации (Геологическая карта..., 2019; Карта кайнозойский образований..., 2013; Карта палеоген-четвертичных образований..., 2018; Карта четвертичных образований..., 2015; Танзыбаев, 1993). По генезису это преимущественно элюво-делювий красноцветных осадков

верхнего палеозоя (переотложенная кора выветривания), зачастую засоленный и окарбоначенный (Танзыбаев, 1993, с. 12–21). В составе отложений четвертичного возраста, на которых сформирован современный почвенный покров котловины, присутствуют суглинки, часто скелетные, карбонатные, с прослоями супесей, а в озерных и аллювиальных отложениях с прослоями глин, илов и галечников (Градобоев, 1954; Танзыбаев, 1993). В междуречье Абакана и Енисея развиты золотые пески и лессовидные суглинки мощностью до 30 м (Аржанникова и др., 2014; Карта кайнозойский образований..., 2013). Для целей рекультивации в качестве потенциально-плодородных пород (ППП) наиболее пригодны элювиально-делювиальные и делювиально-пролювиальные, озерно-аллювиальные суглинки и глины. Мощность этих отложений различна, не выдержана пространственно, варьирует от 2 до 25 м, субстрат залегает гнездами, линзами разной мощности и протяженности. Запасы PPP ориентировочно (при средней плотности таких отложений $1,5 \text{ г/см}^3$) варьируют от 30 тыс. тонн/га в северной части Минусинской котловины до 45–50 тыс. тонн/га в южной (Геологическая карта..., 2019; Карта кайнозойских образований..., 2013; Карта палеоген-четвертичных образований..., 2018). Имеются сведения о запасах элювиально-делювиальных суглинков на севере котловины, составляющих около 6 млн. тонн (Государственная..., 2008).

Неоднородность Минусинской котловины по условиям рельефа, климата и подстилающим отложениям обуславливает сложную дифференциацию естественных ландшафтов, в которой прослеживается основная закономерность – котловинно-кольцевая зональность (Танзыбаев, 1993; Семенов, Лысанова, 2016;). Лесостепные низкогорные ландшафты котловины выделяются преимущественно вдоль Западного Саяна, Кузнецкого Алатау, Абаканского хребта, а также в их невысоких отрогах. Основа этих ландшафтов – структурно-денудационный и эрозионно-денудационный рельеф, мелокосопочный, куэстовый, сильно расчлененный крутосклонный, с маломощным рыхлым чехлом современных отложений. Развитию лесостепной растительности способствует достаточное количество тепла и влаги: сумма биологически активных температур составляет $1300\text{--}1550 \text{ }^\circ\text{C}$, годовое количество осадков около $450\text{--}500 \text{ мм}$, коэффициент увлажнения – $0,9\text{--}1,0$ (Атлас..., 1999; Николаева, 2007). Здесь наиболее распространены мелколиственно-лиственничные, мелколиственные (с березой, осиной) травянистые леса, с участием кустарников, в сочетании с настоящими и луговыми степями. На более пологих склонах широко представлены типичные для Алтае-Саянской горной страны «перистеги» (экспозиционные лесостепи) (Макунина, 2006; Семенов, Лысанова, 2016). В составе почвенного покрова присутствуют черноземы (Chernozems), серые лесные (Gray-Luvic Phaeozems) и дерново-карбонатные (Rendzic Leptosols) почвы (Национальный атлас почв, 2011; IUSS Working Group WRB, 2014). Подгорные, предгорные и равнинные лесостепные ландшафты отличаются выположенным, менее расчлененным пологоувалистым, аккумулятивным, денудационно-аккумулятивным и эрозионным рельефом. По обеспеченности гидротермическими ресурсами эти ландшафты близки к группе низкогорных ландшафтов, в связи с чем эта территория в значительной степени хозяйственно освоена. В сочетании с пашнями и залежами здесь распространены мелколиственные колки (из осины и березы), остепненные луга и луговые степи (Семенов, Лысанова, 2016). В почвенном покрове широко представлены черноземы нескольких подтипов, а также серые лесные почвы (Танзыбаев, 1993; Национальный атлас почв, 2011). Степные ландшафты Хакасии занимают большую, по сравнению с лесостепными, площадь – $26,4\%$ ее территории (Танзыбаев, 1993). Низкогорные степные ландшафты распространены по периметру Минусинской котловины, на контакте с лесостепными. Рельеф неоднородный, структурно- и эрозионно-денудационный, сильно расчлененный, со склонами различной крутизны. Гидротермический коэффициент здесь ниже – $0,7\text{--}0,8$, а сумма активных температур выше – до $1800 \text{ }^\circ\text{C}$. Растительность представлена петрофитными настоящими степями с участием кустарниковых и разнотравно-злаковых сообществ на щебнистых маломощных черноземах (Skeletal Kastanozems). Подгорные степные ландшафты отличаются выровненным рельефом подгорных шлейфов, более сомкнутым растительным покровом, широким распространением ковыльных сообществ настоящих степей черноземах. Равнинные степные ландшафты занимают центральные выровненные части котловины, образуют «аридные ядра» в структуре котловинно-кольцевой зональности ее почвенно-растительного покрова. Гидротермический коэффициент наименьший – $0,5\text{--}0,6$, а сумма активных температур наибольшая, достигает $2100 \text{ }^\circ\text{C}$. Здесь представлены сухие разнотравно-злаковые мелкодерновинные и злаково-полянские степи на черноземах (Chernozems) и каштановых (Kastanozems) почвах (Национальный атлас почв, 2011; Семенов, Лысанова, 2016). Степные ландшафты выровненных территорий котловины

сельскохозяйственно освоены и трансформированы. Долинные лесостепные и степные ландшафты развиты в долинах рек (поймы и террасовые комплексы) и в котловинах озер, представлены широким спектром лугов на почвах аллювиального ряда, а также болотами. Рельеф аккумулятивный, выровненный. Климатические параметры определяются расположением долинного ландшафта в условиях лесостепи или степи, значительную роль играет грунтовое увлажнение почв, а усиление засушливости выражается в увеличении площади засоленных почв (Лысанова, 2000).

В соответствии с нормативами при проведении любых земляных работ необходимо селективное снятие плодородного слоя почвы (ПСП); также предусматривается его хранение и использование при проведении некоторых направлений рекультивации (ГОСТ 57446-2017, 2017). В Минусинской котловине широко представлены почвы с хорошо развитым гумусово-аккумулятивным горизонтом (черноземы, каштановые почвы, серые лесные), который можно использовать как ПСП для рекультивации. Однако ресурсы ПСП распределены неравномерно. В северной и предгорной южной части котловины небольшими площадями (не более 2% от площади Хакасии) встречаются черноземы выщелоченные среднемощные среднегумусные среднесуглинистые и тяжелосуглинистые (Танзыбаев, 1993; Единый государственный ..., 2014). Эти почвы считаются наиболее плодородными в регионе, они обогащены питательными веществами и могут служить эталоном для почвенно-экологической оценки как техногенных, так и естественных ландшафтов. При мощности гумусово-аккумулятивной толщи 35–50 см они содержат до 8–12 % гумуса (в среднем 6–7 %) и до 50–60 % фракции физической глины. Мощность гумусированной толщи (до значений 2 % гумуса) составляет 40–45 см, плотность этой толщи варьирует от 1 до 1,2 г/см³ (Градобоев, 1954). Ориентировочные ее запасы в выщелоченных черноземах составляют 4500–5000 т/га.

Наиболее распространены в котловине черноземы обыкновенные малогумусные маломощные суглинистые. Они имеют мощность гумусированной толщи 25–35 см, среднее содержание глинистых частиц 40–60 %, гумуса 5–6 %; плотность гумусового горизонта составляет в среднем 1,2 г/см³ (Танзыбаев, 1999). В степных наиболее засушливых районах южной части котловины распространены черноземы южные маломощные малогумусные суглинистые и глинистые (Calcic Kastanozems skeletal), а также каштановые и темно-каштановые (Kastanozems) почвы малой и средней мощности и пестрого гранулометрического состава. Содержание гумуса в аккумулятивной толще черноземов мощностью 25–30 см составляет 3–4 %, доля частиц физической глины – 45–54 %. С учетом широкого диапазона мощности гумусированной толщи черноземов, а также участия щебнистых разновидностей в составе почвенного покрова округа, запасы ПСП могут варьировать в пределах от 2000 до 5000 т/га – от дефицитных до оптимальных для выполнения наиболее эффективных схем рекультивации. Мощность гумусово-аккумулятивного горизонта каштановых почв не превышает 20–25 см, содержание гумуса в среднем 2–3 %, физической глины 30–35 %, в тяжелосуглинистых до 55–60 %. Мощность гумусированной (до значений 2%) толщи составляет 15–25 см. Среди каштановых почв часто встречаются карбонатные, солонцеватые, щебнистые варианты, которые ухудшают качество ПСП. Плотность гумусовой части составляет 0,9–1,27 г/см³ (Каллас, Соловьева, 2015). С учетом приведенных данных запасы ПСП каштановых почв варьируют в очень широких пределах от 1350 до 5000 т/га, но в среднем дефицитны. Взяв за основу схему ландшафтной дифференциации котловины (Лысанова, 2000), мы выделили районы по обеспеченности ресурсами рекультивации (таблица). В южной части котловины, соответствующей Абакано-Енисейскому округу, ресурсы рекультивации в целом дефицитны. При этом именно на этой территории сосредоточены и интенсивно разрабатываются крупные угледобывающие предприятия.

Таким образом, распределение ресурсов по территории Хакасии неравномерно: запасы влаги и ПСП уменьшаются от северных территорий к южным, а теплообеспеченность и запасы ППП увеличиваются в том же направлении. Но в целом ресурсов недостаточно для реализации оптимальных схем рекультивации с наибольшей эффективностью. Общим является дефицит увлажнения. На фоне достаточной, усиливающейся к югу, теплообеспеченности, в том же направлении прослеживается нарастание аридности, которая сильнее проявляется в техногенных ландшафтах. Ресурсы ППП в регионе обусловлены спецификой его геологического развития и представлены в достаточной мере (на основании ориентировочных расчетов). Следует учитывать такие лимитирующие факторы, как высокая неоднородность гранулометрического состава отложений, невыдержанность по мощности и неглубокий уровень залегания грунтовых вод. Запасы ПСП сосредоточены, главным образом, в суглинистых и глинистых почвах региона и ограничены мощностью этого слоя, который уменьшается с севера на юг. Эта величина

обусловлена как климатическими особенностями, так и характером почвообразующих пород и форм рельефа. Мощность гумусированной толщи не выдержана в пространстве, в среднем не превышает 30 см, варьируя от 15 до 60 см. С высокой частотой в почвах встречаются щебнистые, галечниковые гумусовые горизонты, содержащие карбонаты, легкорастворимые соли. Поскольку для проведения оправдывающей себя по себестоимости рекультивации ресурсы ППП и ПСП должны располагаться в непосредственной близости от объектов, а оценку их запасов нужно корректировать для конкретной территории. Эта оценка является определяющим фактором при выборе направления восстановительных мероприятий. Другими словами, без оценки характера почвенного покрова в районе размещения и/или функционирования добывающего предприятия не обойтись. В целом же перспективы рекультивации на объектах добывающей промышленности в пределах территории Хакасии ограничены.

Таблица

Обеспеченность ресурсами рекультивации отвалов в Хакасии (Минусинская котловина)

Параметры*	Верхнечулымская провинция	Минусинская провинция	
	Ширинский округ	Североминусинский округ	Абакано-Енисейский округ
$\sum t > 10^\circ$	1300–1700	1600–1800	1800–2100
КУ (по Иванову)	0,6–0,9	0,5–0,8	0,5–0,6
Естественные ландшафты	лесостепь	лесостепь	степь
Почвы	серые лесные, дерново-карбонатные, черноземы (выщелоченные, обыкновенные, южные)	дерново-карбонатные, черноземы (выщелоченные, обыкновенные, южные)	черноземы (выщелоченные, обыкновенные, южные), каштановые почвы
Запасы ППП, тысяч т/га	30	40–45	45–50
Запасы ПСП, тысяч т/га	2,0–5,0	3,0–3,6	1,4–5,0
*обеспеченность по (Курачев, Андроханов, 2010): $\sum t > 10^\circ$ – достаточная для обеспечения любых целей рекультивации – выше 1600, дефицитная – 1600-1400, остродефицитная – менее 1400 КУ – избыточное увлажнение – более 1,25 достаточное – 1,0–1,25 дефицитное – менее 1 ППП – достаточные (лесостепь) – > 20 тыс.т/га дефицитные (лесостепь) – 15-20 тыс.т/га остродефицитные (лесостепь) – < 15 тыс.т/га ПСП – достаточные – >3,5 тыс.т/га дефицитные – 2,5-3,5 тыс.т/га остродефицитные – <2,5 тыс. т/га			

Угледобывающие разрезы региона, на которых сформированы наиболее обширные техногенные ландшафты (до 50 % от площади всех нарушенных промышленностью земель региона), располагаются преимущественно в южной, наиболее засушливой, части Минусинской котловины. Формирование здесь техногенных ландшафтов сопровождается рядом трудностей, которые обусловлены неэффективностью традиционных (по ГОСТу) мероприятий рекультивации в специфических природных условиях региона. Основная проблема горнотехнического этапа рекультивации – создание больших площадей отвалов вскрышных и вмещающих пород, сложенных несортированной смесью пород, с выровненными (спланированными) вершинами. Такие отвалы признаны экологически неблагоприятными, трудно поддаются рекультивационным мероприятиям, поскольку в течение времени претерпевают перераспределение субстрата, в значительной мере ксерофитизированы, переуплотнены, подвержены интенсивной дефляции и водной эрозии (Зеньков и др., 2014; Новицкий и др., 2012; Остапова, Евсева, 2019). Традиционное нанесение ППП и ПСП на такие поверхности в условиях засушливого климата, при воздействии ветровой и водной эрозии, не обеспечивает нужного уровня эффективности восстановления

нарушенных территорий и экономически невыгодно (Лавриненко и др., 2014). Другая серьезная проблема горнотехнического этапа – селективное снятие и длительное хранение плодородного слоя почв в буртах, предусмотренное ГОСТом. В первом случае происходит ухудшение гумусного состояния снимаемого ПСП за счет смешивания с почвообразующей породой и слоями с меньшим содержанием гумуса, а во втором происходит негативное изменение хозяйственно ценных свойств плодородного слоя вследствие его интенсивной минерализации, переуплотнения, дефляции и водной эрозии поверхности буртов (Андроханов, 2014; Зеньков, 2010).

Специфика рекультивационных мероприятий на хакасских углеразрезах для решения перечисленных проблем заключается в создании предпосылок для эффективного биологического этапа рекультивации или ускоренного самозарастания поверхности отвалов. Отказ от выполаживания отвалов в пользу создания неровностей рельефа (гребней, западин), ориентированных по направлению преобладающих ветров, позволил решить проблему влагозадержания и накопления мелкодисперсного материала за счет предотвращения выдува тонких частиц, образующихся при физическом выветривании породы (Лавриненко, Остапова, 2018), а также за счет возможного эолового привноса с прилегающей территории. По оценке Баженова (2018) эоловая аккумуляция в котловине составляет до 0,2 т/га в год. При таких темпах вклад дефляции в формирование «очагов» почвообразования за счет скопления в понижениях рельефа мелкозема относительно выше, чем процессов выветривания.

Мощность наносимого слоя ПСП определяется целями рекультивации с учетом специфики зональных почв. Согласно работам Танзыбаева (1993), активный влагооборот в черноземах Хакасии захватывает слой в 30–50 см, в каштановых почвах – менее 30 см. Следовательно, мощность наносимого слоя в местных условиях не может быть меньше 25–30 см. Проблема дефицита ресурсов ПСП и их разубоживания в процессе хранения решается путем неселективного снятия и нанесения почвенного слоя в смеси с почвообразующей породой мощностью 2 м и более (Рекультивация..., 2016). В северной части Хакасии угольные разрезы не разрабатывают, однако на Назаровском угольном разрезе Красноярского края, расположенном севернее, но в схожих природных условиях, апробирована похожая схема нанесения ПСП (Зеньков и др., 2014), которая показывает возможную эффективность и для территории Хакасии. В более засушливых условиях южной части Хакасии успешная реализация такой схемы позволяет не только получить экологический эффект, но и достичь определенной экономии средств, затрачиваемых на горнотехнический этап рекультивации, что в современных условиях развития горнодобывающей промышленности весьма важная деталь.

На биологическом этапе рекультивации главная задача – сформировать функционирующий биоценоз, который способствует закреплению поверхности отвала, и по своим свойствам максимально возможно приблизит техногенный ландшафт к естественным зональным. На рекультивируемых отвалах традиционно проводят посев многолетних трав и древесно-кустарниковой растительности (лесо- и сельскохозяйственная рекультивация). На самозарастающих отвалах растительный покров формируется длительное время путем сукцессий (Курачев и др., 1994; Подурец, 2011). И в том, и в другом случае основным лимитирующим фактором, как и у зональных фитоценозов, является увлажнение. Для естественных степей Минусинской котловины дефицит увлажнения проявляется в разреженности и низкорослости травостоя, преобладании дерновинных злаков – овсяницы, ковылей, змеевки, тонконога, а также осок. Как правило, эти растения имеют мощную развитую корневую систему, благодаря чему способны переносить и сильную засуху и сильное промерзание почвы. Кроме того, по массе и продуктивности подземная фитомасса намного превышает надземную, что придает устойчивости степным экосистемам (Куминова и др., 1976). На залежах восстановление сухостепной растительности проходит в течение длительного периода – 25–30 лет (Балязин, 2018). Зарастание отвалов на угледобывающих разрезах Хакасии происходит за счет ресурсов прилегающих участков и по времени занимает сопоставимый срок. По данным (Швабенланд, Карпухина, 2011), на отдельных участках отвалов Черногорского разреза Хакасии фитоценозы достигали пырейно-попынной стадии развития только через 12–14 лет. Однако даже после 20 лет техногенные фитоценозы остаются своеобразными и неустойчивыми (Доронькин и др., 2019; Сафронова и др., 2018). В то же время показано, что продуктивность фитоценозов на 30-летних отвалах выше продуктивности естественных степей прилегающих территорий в несколько раз (Ламанова, Сафронова, 2017). К общим особенностям восстановления растительности в техногенных ландшафтах региона можно отнести следующие: преимущественно разнотравный состав

фитоценозов и значительное участие рудеральных видов растений; преобладание надземной фитомассы над подземной. В ходе сукцессионных смен, доля рудеральных видов постепенно сокращается. Превышение надземной фитомассы над подземной можно объяснить низким участием дерновинных растений. Также отмечается рост общей фитомассы с увеличением возраста отвала, с поправкой на экспозицию. Как и в случае с естественной растительностью, техногенные фитоценозы наиболее развиты на наветренных затененных склонах отвалов, в понижениях между грядами на поверхностях отвалов (Лавриненко и др., 2018; Доронькин и др., 2019; Рекультивация, 2016). По сравнению с самозарастающими фитоценозами, техногенные агроценозы и древесные посадки отличаются более благоприятными условиями и лучшими показателями продуктивности, поскольку посев корневищных травосмесей и организация древесных и кустарниковых насаждений производится с применением комплекса удобрений, биопрепаратов, с предварительным подбором сортов и организацией почвенного плодородного слоя (Лавриненко, 2016; Лавриненко и др., 2018). Однако, как показывают исследования, отсыпка ПСП не приближает техногенные фитоценозы по видовому обилию к залежам прилегающих территорий (Уфимцев и др., 2019). В целом, адаптированные к условиям Хакасии схемы рекультивации, например лесохозяйственной, являются наиболее благоприятными, по сравнению с самозарастанием, как для минимизации отрицательного воздействия отвалов на прилегающие территории, так и для формирования устойчиво функционирующего техногенного ландшафта.

Несмотря на то, что для региона уже подобраны и апробированы оптимальные схемы рекультивации, большая площадь отвалов оставлена под самозарастание. И восстановление почвенного покрова в таких ландшафтах является основной задачей рекультивации и важнейшим результатом. Как выше было указано, эффективность рекультивации отвалов в условиях Хакасии повышается за счет создания корнеобитаемого слоя путем совместной отсыпки ПСП и ППП, в комплексе с применением удобрений и микробиологических препаратов, а также мероприятиями, направленными на снижение уплотнения почв. Для зональных почвообразующих пород (лессовидных суглинков) имеются сведения о скорости почвообразования: по данным Танзыбаева (1993), ежегодный прирост гумусового слоя на таких породах составляет от 0,16 до 0,6 см в год, что можно принять как зональную скорость для изученного региона. В этом случае можно с определенной долей условности получить представление о скорости развития профиля насыпных техноземов (Technosols) на углерезах Хакасии. Однако необходимо учитывать, что интенсивность процессов дефляции, водной эрозии, неустойчивый режим увлажнения, смена сукцессий растительности являются лимитирующими для почвообразования. Для сравнения темпов почвообразования стоит упомянуть, что максимальная мощность органогенного горизонта дерновых эмбриоземов (Spolic Technosols Gyperskeletal) на самых старых самозарастающих отвалах Хакасии (более 30 лет) не превышает 5–10 см. Собственно гумусово-аккумулятивный горизонт в эмбриоземах на отвалах в регионе не развивается (Соколов, 2015б).

Биоклиматические условия южной части Хакасии и специфика субстрата отвалов препятствуют формированию эволюционно «продвинутых» типов эмбриоземов – гумусово-аккумулятивных (Protfollic Technosols Gyperskeletal), поскольку запасов тонкодисперсной фракции недостаточно для формирования органоминеральных связей при гумусообразовании (Соколов и др., 2015а). Накопление педогенного углерода, формирующегося в ходе почвообразования, в эмбриоземах принципиально важно для их функционирования. Это накопление оценивают по показателю литогенного потенциала гумусонакопления (ЛПГ). Для инициальных эмбриоземов ЛПГ составляет менее 1,0–1,5%, органом-аккумулятивных и дерновых – 2–3% (Соколов и др., 2015б). Для сравнения, ЛПГ эталонных зональных выщелоченных черноземов Хакасии и Кузбасса достигает 8–12%. Средний ЛПГ черноземов и каштановых почв котловин Центральной Тувы составляет 2–4% (Соколов, Доможакова, 2015). Создание условий для накопления тонкодисперсного материала и гумуса в самозарастающих ландшафтах Хакасии посредством мер, рассмотренных выше, может обеспечить прогнозный рост содержания в эмбриоземах органического углерода до 4 % (Лавриненко и др., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом оценка ресурсов рекультивации с экологической точки зрения позволит определить восстановительный потенциал территории. С хозяйственной точки зрения, проведение такой оценки на этапе проектирования мощностей предприятия дает представление о перспективах рекультивации территорий, которые будут нарушены, и возможность более корректного составления проектов рекультивации.

Как показали исследования, в регионе ресурсы распределены неравномерно, что необходимо учитывать при размещении предприятий. В техногенных ландшафтах процессы почвообразования протекают с низкой интенсивностью, вызванной дефицитом увлажнения, тонкодисперсных частиц, активной дефляцией и замедленным развитием растительного покрова. Невысокие темпы восстановления техногенных ландшафтов в Хакасии подтверждаются и другими исследованиями (Зеньков и др., 2017). Следует отметить, что проблема восстановления нарушенных открытой добычей угля территорий Хакасии сохранит свою остроту и в ближайшем будущем из-за высоких темпов роста площади отвалов, дефицита ресурсов и ограниченности использования оптимальных схем рекультивации, а также в определенной степени от заинтересованности добывающих компаний в успешности восстановления нарушенных территорий.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андроханов В.А. Мониторинг почвенного покрова и рациональное использование земельных ресурсов в районах угледобычи // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2014. №2. С.126–130.
2. Андроханов В.А., Куляпина Е.Д., Курачев В.М. *Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 151 с.
3. Андроханов В.А., Курачев В.М. *Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 224 с.
4. Аржанникова А.В., Аржанникова С.Г., Акулова В.В., Данилова Ю.В., Данилов Б.С. О происхождении песчаных отложений в Южно-Минусинской котловине // *Геология и геофизика*. 2014. Т.55. №10. С.1495–1508. DOI: [10.15372/GiG20141004](https://doi.org/10.15372/GiG20141004)
5. *Атлас Республики Хакасия (комплексный)*. Омск, Омская картографическая фабрика, 1999. 32 с.
6. Баженова О.И. *Современная денудация в предгорных островных степях Сибири*. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 259 с.
7. Балязин И.В. Анализ динамики степных геосистем с применением картографического метода на примере Койбалльской степи // *Вестник Иркутского государственного университета. Серия наук о Земле*. 2018. Т.26. С.18–30. DOI: [10.26516/2073-3402.2018.26.18](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.18)
8. Гаджиев И.М., Курачев В.М., Андроханов В.А. *Стратегия и перспективы решения проблем рекультивации нарушенных земель*. Новосибирск: ЦЭРИС, 2001. 37 с.
9. *Геологическая карта кайнозойских образований. Лист N-46-XX. Абакан. М 1:200 000*
10. *ГОСТ 57446-2017*. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. Москва: Стандартинформ, 2019. 6 с.
11. *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтай-Саянская. Лист N-46. Абакан. Объяснительная записка*. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 391 с.
12. *Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Хакасия в 2018 году*. Абакан, 2019. 217 с.
13. Градобоев Н.Д. *Природные условия и почвенный покров левобережной части Минусинской впадины* // Почвы Минусинской впадины. М., 1954. С.7–183.
14. Доронькин В.М., Сафронова О.С., Ламанова Т.Г., Шеремет Н.В. Результаты исследования естественного восстановления растительного покрова на вскрышных отвалах, возникших в 2000-е годы в Республике Хакасия // *Уголь*. №11. 2019. С.94–97. DOI: [10.18796/0041-5790-2019-11-94-97](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-11-94-97)
15. *Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0*
16. Зеньков И.В. Результаты исследования и оценка потерь плодородного слоя почв в горнотехнической рекультивации нарушенных земель // *Уголь*. 2010. № 4. С.66–69.
17. Зеньков И.В., Нефедов Б.Н., Барадулин И.М., Кирюшина Е.В. Технологии формирования и рекультивации породных отвалов при добыче угля открытым способом // *Экология и промышленность России*. 2014. № 6. С.30–33. DOI: [10.18412/1816-0395-2014-6-30-33](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2014-6-30-33)
18. Зеньков И.В., Нефедов Б.Н., Юронен Б.Н., Нефедов Н.Б. Результаты дистанционного мониторинга и полевых исследований экологического состояния нарушенных земель угольными разрезами в Республике Хакасия // *Уголь*. 2017. № 9(1098). С.72–75. DOI: [10.18796/0041-5790-2017-9-72-75](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-9-72-75)
19. Каллас Е.В., Соловьева Т.П. Свойства степных почв Средней Сибири и проблема их деградации // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2015. № 3 (178). С.164–170.
20. *Карта кайнозойских образований. Лист N-46-XXV. Аскиз. М 1:200 000*.
21. *Карта палеоген-четвертичных образований. Лист N-46-XIX. Усть-Бюрь. М 1:200 000*.
22. *Карта четвертичных образований. Лист N-46-XIII. Сорск. М 1:200 000*.

23. Куминова А.В., Зверева Г.А., Маскаев Ю.М., Павлова Г.Г., Седельников В.П., Королева А.С., Нейфельд Э.И., Танзыбаев М.Г., Чижикова Н.М., Ламанова Т.Г. *Растительный покров Хакасии*. Новосибирск: Наука СО, 1976. 418 с.
24. Курачев В.М., Кандрашин Е.Р., Рагим-заде Ф.К. Сингенетичность растительности и почв техногенных ландшафтов: экологические аспекты, классификация // *Сибирский экологический журнал*. 1994. № 3. С. 205–213.
25. Лавриненко А.Т. *Особенности рекультивации техногенно разрушенных территорий в засушливых регионах угледобычи* // Природно-техногенные комплексы: современное состояние и перспективы восстановления: мат. Межд. науч. конф. (Новосибирск; Новокузнецк, 13-18 июня 2016 г.). Новосибирск; Новокузнецк: Изд-во СО РАН, 2016. С.125–133.
26. Лавриненко А.Т., Моршнева Е.А., Сафронова О.С., Евсеева И.Н., Андроханов В.А., Соколов Д.А., Госсен И.Н. *Рекультивация земель, нарушенных угледобывающими предприятиями Хакасии*. Методические рекомендации. Новосибирск, 2016. 38 с.
27. Лавриненко А.Т., Остапова Н.А., Сафронова О.С., Евсеева И.Н. Способ выращивания древесно-кустарниковых пород для биологической рекультивации техногенных отвалов в аридных условиях Республики Хакасия // *Уголь*. 2018. № 11. С.92–95. DOI: [10.18796/0041-5790-2018-11-92-94](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-11-92-94)
28. Лавриненко А.Т., Андроханов В.А., Килин А.Б. Современное состояние нормативного обеспечения проектирования строительства и развития угледобывающих предприятий в части рекультивации нарушенных земель // *Уголь*. 2014. № 1. С.65–67.
29. Лавриненко А.Т., Остапова Н.А. Изучение лимитирующих факторов биологической рекультивации на отвалах гребневой формы отсыпки угледобывающих предприятий Хакасии // *Уголь*. 2018. № 12. С.98–101. DOI: [10.18796/0041-5790-2018-12-98-101](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-12-98-101)
30. Ламанова Т.Г., Сафронова О.С. Особенности естественного зарастания вскрышных отвалов в аридных районах Республики Хакасия // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2017. Том 47. №1. С.25–31.
31. Лысанова Г.И. Ландшафтная структура Минусинской котловины // *География и природные ресурсы*. 2000. № 4. С.77–87.
32. Лысенко Д.П., Акатов Д.И., Скорых Н.Н. Факторы и тенденции развития угледобывающей промышленности Республики Хакасия // *Уголь*. 2019. № 5. С.28–30. DOI: [10.18796/0041-5790-2019-5-28-30](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-5-28-30)
33. Максютова Е.В. Оценка радиационного баланса геосистем Минусинской котловины // *География и природные ресурсы*. 2006. №3. С.69–75.
34. Макунина Н.Н. Степи Минусинских котловин // *Turczaninowia*. 2006. Т. 9. Вып. 4. С.112–144.
35. *Национальный атлас почв Российской Федерации*. Москва: Изд-во МГУ; Астрель, 2011. 632 с.
36. Николаева З.Н. Некоторые закономерности современных изменений гидротермических характеристик в Южно-Минусинской котловине // *Вестник КрасГАУ*. 2007. №1. С.71–75.
37. Новицкий А.А., Андроханов В.А., Лавриненко А.Т., Гнитецкий В.А. Рекультивация техногенных ландшафтов на угольных разрезах Красноярского края // *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2012. № 4(8). С.15–20.
38. Остапова Н.А., Евсеева И.Н. Биологическая рекультивация верхнего вскрышного уступа на отвалах разреза «Черногорский» // *Уголь*. 2019. № 6 С.106–108. DOI: [10.18796/0041-5790-2019-6-106-108](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-6-106-108)
39. Плакиткина Л.С. Анализ и перспективы развития добычи угля на период до 2035 г. в Республике Хакасия // *Горная промышленность*. 2016. № 1(125). С.26–27.
40. Подурец О.И. Связь динамики запасов растительного вещества с фазами посттехногенного почвообразования // *Вестник ТГУ. Биология*. 2011. Вып. 346. № 169. С.169–174.
41. Сафронова О.С., Ламанова Т.Г., Шеремет Н.В. Результаты исследования естественного восстановления растительного покрова на вскрышных отвалах, возникших в 1990-е годы в Республике Хакасия // *Уголь*. 2018. № 7. С.68–71. DOI: [10.18796/0041-5790-2018-7-68-71](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-7-68-71)
42. Семенов Ю.М., Лысанова Г.И. Ландшафтная карта // *Известия Иркутского государственного университета*. 2016. Т. 18. С.128–139.
43. Соколов Д.А., Андроханов В.А., Кулижский С.П., Доможакова Е.А., Лойко С.В. Морфогенетическая диагностика процессов почвообразования на отвалах каменноугольных разрезов Сибири // *Почвоведение*. 2015а. №1. С.106–117. DOI: [10.7868/S0032180X15010153](https://doi.org/10.7868/S0032180X15010153)
44. Соколов Д.А., Мерзляков О.Э., Доможакова Е.А. Оценка литогенного потенциала гумусонакопления отвалов каменноугольных месторождений Сибири // *Вестник Томского государственного университета*. 2015б. № 399. С.247–253.
45. Соколов Д.А., Доможакова Е.А. Литогенный потенциал гумусонакопления почв Центрально-Тувинской котловины // Природные системы и экономика Центрально-Азиатского региона: фундаментальные проблемы, перспективы рационального природопользования: мат. II Всерос. мол. школы-конф. с межд. уч. (Кызыл, 6–9 сентября 2015). Кызыл: РИО ТувГУ, 2015. С. 109–112.
46. Танзыбаев М.Г. *Почвы Хакасии*. Новосибирск: Наука, 1993. 256 с.
47. Уфимцев В.И., Андроханов В.А., Куприянов О.А., Уфимцев Ф.Г. Плодородный слой почвы как фактор восстановления зональных фитоценозов на отвалах угольной промышленности // *Вестник Кузбасского*

государственного технического университета. 2019. № 6(136). С.64–71. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-6-64-71

48. Швабенланд И.С., Карпухина И.В. К вопросу о рекультивации отвалов горнодобывающего предприятия «Черногорская угольная компания» // Молодой ученый. 2011. № 11 (34). Т.1. С.94–98.

49. Язиков Е.Г., Худяков В.М., Азарова С.В. Геоэкологические проблемы угледобывающих предприятий и геохимическая оценка воздействия отвалов на почвы (на примере угольного разреза «Чалпан» Республика Хакасия) // Известия Томского политехнического университет. Инжиниринг георесурсов. 2002. Т.305. № 6 С.433–445.

50. 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 23.01.2021

Принята 10.02.2021

Опубликована 19.02.2021

Сведения об авторах:

Гуркова Евгения Александровна – к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории рекультивации почв ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); gurkova@issa-siberia.ru

Андроханов Владимир Алексеевич – д.б.н., заведующий лабораторией рекультивации почв ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); androhanov@issa-siberia.ru

Лавриненко Алексей Тимофеевич – научный сотрудник лаборатории рекультивации ФГБУН Научно-исследовательского института аграрных проблем Хакасии (с. Зеленое, Республика Хакасия, Россия); aleks233@yandex.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/)

RESOURCES AND SPECIFICITY OF RECLAMATION AT THE COAL MINING SPOILS OF KHAKASSIA

© 2020 E.A. Gurkova ¹, V.A. Androkhanov ¹, A.T. Lavrinenko ²

¹Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Lavrentieva, 8/2, Novosibirsk, 630090, Russia.

E-mail: gurkova@issa-siberia.ru, androkhanov@issa-siberia.ru

²Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia SB RAS, The Republic of Khakassia, Russia.

E-mail: aleks233@yandex.ru

The article analyses Khakassia environmental conditions with the aim to estimate their resources and role in the efficient reclamation of coal mining spoils. The availability of potentially fertile soil substrate as a resource for large-scale reclamation was evaluated by the thickness of the quaternary clay and loamy bedrock layers, taking into account the amount of the substrate needed for reclamation. The availability of resources of the potentially fertile soil substrate was carried out by taking into account the thickness and soil bulk density of the humus horizon of the most fertile soils of the region, and considering the obtained estimates within the framework of the methodical rules and normative regulations for optimal reclamation. The availability of hydrothermal resources was estimated by active temperature sums and hydrothermal coefficient. Overall the distribution of reclamation resources was found to be very uneven throughout the region. In the south of Khakassia with its large areas occupied by technogenic landscapes the reclamation resources were concluded to be in deficit, insufficient for carrying out the reclamation according with the optimal protocols. Such lack of resources is indirectly confirmed by prevailing areas occupied by self-revegetating coal mining spoils. The article also describes some successful reclamation examples where specific local environmental conditions were used in such a way as to decrease the effect of deficient resources, thus increasing the efficacy of the self-restoration of technogenic landscapes.

Key words: reclamation resources; potentially fertile substrate; soil fertile layer; technogenic soils; coal mining industry; Khakassia

How to cite: Gurkova E.A., Androkhanov V.A., Lavrinenko A.T. Resources and specificity of reclamation at the coal mining spoils // *The Journal of Soils and Environment*. 2020. 3(4). e127. doi: [10.31251/pos.v3i4.127](https://doi.org/10.31251/pos.v3i4.127) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. Androkhanov V.A. Monitoring of soil and land rational management in the mining regions, *Bull. of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)*, 2014, No2, p.126-130. (in Russian)
2. Androkhanov V.A., Kulyapina E.D., Kurachev V.M. *The soils of technogenic landscapes: genesis and evolution*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2004, 151 p. (in Russian)
3. Androkhanov V.A., Kurachev V.M. *Soil-ecological state of technogenic landscapes*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2010. 224 p. (in Russian)
4. Arzhannikova A.V., Arzhannikov S.G., Akulova V.V., Danilova Y.V., Danilov B.S. The origin of sand deposits in the South Minusa Basin, *Russian Geology and Geophysics*, 2014, V.55, No10. p.1183-1194 (in Russian) DOI: [10.1016/j.rgg.2014.09.004](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.09.004)
5. *The atlas of Khakassia*. Omsk: Omsk cartographic plant, 1999. 32 p. (in Russian)
6. Bazhenova O.I. *Actual denudation of the foothill steppe plains of Siberia*. Novosibirsk, Academic Publ. House "GEO", 2018. 259 p. (in Russian)
7. Balyazin I.B. Analysis of the dynamics of steppe geosystems using the cartographic method on the example of the Koibal Steppe, *The Bull. of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*, 2018, V. 26, p.18-30. DOI: [10.26516/2073-3402.2018.26.18](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.26.18) (in Russian)
8. Gadzhiev I.M., Kurachev V.M., Androkhanov V.A. *Strategy and prospects for solving the problems of regulation of disturbed lands*. Novosibirsk, CERIS Publ, 2001. 37 p. (in Russian)
9. *Geological map of Cenozoic formation. Page N-46-XX. Abakan. Scale 1:200 000* (in Russian)
10. *GOST 57446-2017. Best available techniques. Disturbed lands reclamation. Restoration of biological diversity*. Moscow: Standartinform, 2019, 6 p. (in Russian)
11. *State geological map of Russian Federation, 1: 1 000 000. Altai-Sayan series. Abakan N-46 page. Explanatory letter*. (in Russian)
12. *State report of environment state of Khakassia in 2018. Abakan, 2019. 217 p.* (in Russian)
13. Gradoboev N.D. *Natural resources and soils cover of the left part of Minusa Basin*. In book: Soils of Minusa Basin. Moscow, 1954. p.7-183. (in Russian)
14. Doronkin V.M., Safronova O.S., Lamanova T.G., Sheremet N.V. The results of the study of natural revegetation on overburden piles, resulting in 2000 years in the Republic of Khakassia, *Ugol*. 2019. No 11. p. 94-97. DOI: [10.18796/0041-5790-2019-11-94-97](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-11-94-97) (in Russian)
15. *Unified state register soil resources of Russia. Version 1.0* (in Russian)
16. Zenkov I.V. Results of research and estimation of losses of a fertile layer of ground in mine technical re-cultivation the broken grounds, *Ugol*, 2010. No4. p.66-69. (in Russian)
17. Zenkov I. V., Nefedov B.N., Baradulin I.M., Kiryushina E.B. Technology of Forming and Reclamation of Waste Heap during Open-pit Coal Mining, *Ecology and Industry of Russia*, 2014, No6. p.30-33 DOI: [10.18412/1816-0395-2014-6-30-33](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2014-6-30-33) (in Russian)
18. Zenkov I.V., Nefedov B.N., Yuronen B.N., Nefedov N.B. Environmental conditions remote sounding and field surveys of the lands, disturbed by coal mining open pits in the Republic of Khakassia, *Ugol*, 2017, No9(1098). p.72-75. DOI: [10.18796/0041-5790-2017-9-72-75](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-9-72-75) (in Russia)
19. Kallas E.V., Soloveva T.P. Properties of steppe soils in Central Siberia and the problem of their degradation, *Bull. of Orenburg State University*, 2015, No3 (178). p.164-170. (in Russian)
20. *Map of Cenozoic formations. Askis N-46-XXV page. Scale 1:200 000* (in Russian)
21. *Map of Paleogene and Quaternary formations. Ust-Byur N-46-XIX page. Scale 1:200 000* (in Russian)
22. *Map of Quaternary formations. Sorsk N-46-XIII page Scale 1:200 000* (in Russian)
23. Kuminova A.V., Zvereva G.A., Maskaev Yu.M., Pavlova P.G. et al. *The vegetation of Khakassia*. Novosibirsk, Nauka SB Publ., 1976. 418 p. (in Russian)
24. Kurachev V.M., Kandrashin E.R., Ragim-Zade F.K. Singeneticity of vegetation and soils of technogenic landscapes: ecological aspects, classification, *Siberian Journal of Ecology*, 1994, No3, p.205-213. (in Russian)
25. Lavrinenko A.T. *Features of man-causing disturbed areas recultivation in arid regions of coal mining*. In book: Natural-technogenic complexes: current state and prospects for restoration: Proc.of the Int.Sci.Conf. (Novosibirsk-Novokuznetsk, 13-18 June, 2016). Syso A.I.(ed.). Novosibirsk, Novokuznetsk: SB RAS Publ., 2016, p.125-132 (in Russian)
26. Lavrinenko A.T., Morshnev E.A., Safronova O.S., Evseeva I.N., Androkhanov V.A., Sokolov D.A., Gossen I.N. *Reclamation of lands disturbed of coal mining in Khakassia. Guidelines*. Novosibirsk, 2016, 38 p. (in Russian)
27. Lavrinenko A.T., Ostapova N.A., Safronova O.S., Evseeva I.N. A method of growing trees and shrub species for biological recultivation of technogenic dumps in the arid environment of Republic of Khakassia, *Ugol*, 2018, No11, p.92-95. DOI: [10.18796/0041-5790-2018-11-92-94](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-11-92-94) (in Russian)
28. Lavrinenko A.T., Androkhanov V.F., Kilin A.B. The current status of regulatory support for design of construction and development of coal producers with regard to mined-land reclamation, *Ugol*, 2014, No1, p.65-67 (in Russian)

29. Lavrinenko A.T., Ostapova N.A. The study of limiting factors of biological reclamation on dumps ridge form filling coal mines Khakassia, *Ugol*, 2018, No12, p.98-101. DOI: [10.18796/0041-5790-2018-12-98-101](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-12-98-101) (in Russian)
30. Lamanova T.G., Safronova O.S. Pattern of natural plant colonization of opencast banks in the arid regions of the Khakassia republic, *Siberian Vestnik of Agricultural Science*, 2017, V.47, No1. p.25-31 (in Russian)
31. Lysanova G.I. Landscapes structure of Minusa Basin, *Geografia i Prirodnye Resursy*, 2000, No4, p.77-87 (in Russian)
32. Lysenko D.P., Akatov D.I., Skorykh N.N. Factors and trends in the development of coal mining industry of the Republic of Khakassia, *Ugol*, 2019, No5, p.28-30. DOI: [10.18796/0041-5790-2019-5-28-30](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-5-28-30) (in Russian)
33. Maksyutova E.V. Assessment of the radiation balance of geosystems in the Minusinsk Basin, *Geografia i Prirodnye Resursy*, 2006, No3, p.69-75 (in Russian)
34. Makunina N.N. Steppes of Minusinsk Hollows, *Turczaninowia*, 2006, V.9, No4. p.112-144. (in Russian)
35. *National Soils Atlas of Russian Federation*. Moscow, MSU Publ., Astrel Publ, 2011, 632 p. (in Russian)
36. Nikolaeva Z.N. Some regularities of modern changes in hydrothermal characteristics in South Minusinsk Basin, *Bull. of KrasGAU*, 2007, No1, p.71-75 (in Russian)
37. Novitskiy A.A., Androkhonov V.A., Lavrinenko A.T., Gnitetskiy V.A. Reclamation of technogenic landscapes on the coal mines of the Krasnoyarsk region, *Bull. of Omsk State Agrarian University*, 2012, No4(8), p.15-20 (in Russian)
38. Ostapova N.A., Evseeva I.N. Biological recultivation of overburden the upper ledge on dumps of “Chernogorsky” open-pit mine, *Ugol*, 2019, No6, p.104-107. DOI: [10.18796/0041-5790-2019-6-106-108](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-6-106-108) (in Russian)
39. Plakitkina L.S. Analysis and prospects for the development of coal mining for the period up to 2035 in the Republic of Khakassia, *Gornaja Promyshlennost*, 2016, No1(125), p.26-27 (in Russian)
40. Podurets O.I. The relationship of the dynamics of plant matter reserves with phases of post-technogenic soil formation, *Tomsk State University Journal*, 2011, V.346, No169, p.169-174 (in Russian)
41. Safronova O.S., Lamanova T.G., Sheremet N.V. The results of the study of natural regeneration of vegetation cover on overburden dumps in the Republic of Khakassia, which emerged in the 90-years of the twentieth century, *Ugol*, 2018, No7, p.68-72. DOI: [10.18796/0041-5790-2018-7-68-71](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-7-68-71) (in Russian)
42. Semenov Yu.M., Lysanova G.I. Landscapes map, *The Bulletin of Irkutsk State University*, 2016, V.18. p.128-139. (in Russian)
43. Sokolov D.A., Androkhonov V.A., Kulizhskii S.P., Loiko C.V., Domozhakova E.A. Morphogenetic diagnostics of soil formation on tailing dumps of coal quarries in Siberia, *Eurasian Soil Science*, 2015, V.48, No1, p.95-105. DOI: [10.1134/S1064229315010159](https://doi.org/10.1134/S1064229315010159)
44. Sokolov D.A., Merzlyakov O.E., Domozhakova E.A. Estimation of lithogene potential of humus accumulating in soils of coal-mine dumps of Siberia, *Tomsk State University Journal*, 2015, No399, p.247-253 (in Russian)
45. Sokolov D.A., Domozhakova E.A. *Lithogenic potential of humus accumulating in soils of Central Tuva depression*: In book: Natural Systems and Economic of Central Asia Region: fundamental problems, perspectives of rational use: Proc. of II Rus. Youth Sci.Conf. (Kyzyl, 6-9 September, 2015). Kyzyl, Tuva State University Publ., 2015. p.109-112 (in Russian)
46. Tanzybaev M.G. *Soils of Khakassia*. Novosibirsk. Science Publ., 1993. 256 p. (in Russian)
47. Ufimtsev V.I., Androkhonov V.A., Kupriyanov O.A., Ufimtsev F.G. Fertile soil layer as a factor of recovery of zonal phytocenoses on coal industry dumps, *Bull. of the Kuzbass State University*, 2019, No6(136), p.64-71. DOI: [10.26730/1999-4125-2019-6-64-71](https://doi.org/10.26730/1999-4125-2019-6-64-71) (in Russian)
48. Shvabenland I.S., Karpukhina I.V. On the question of reclamation of dumps of the mining enterprise “Chernogorsk Coal Company”, *Young Scientist*, 2011, V.1 No11(34). p.94-98. (in Russian)
49. Yazikov E.G., Hud'yakov V.M., Azarova S.V. Geoecological problems of coal mining enterprises and geochemical assessment of the impact of dumps on soils (on the example of the Chalpan coal mine, Khakassia), *Bull. of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2002, V.305, No6, p.433-445 (in Russian)
50. *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 23 January 2021

Accepted 10 February 2021

Published 19 February 2021

About the authors:

Gurkova Evgeniya A. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Recultivation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); gurkova@issa-siberia.ru

Androkhonov Vladimir A. – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Recultivation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); androkhonov@issa-siberia.ru

Lavrinenko Alexey V. – Researcher in the Laboratory of Recultivation of the Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia, SB RAS (The Republic of Khakassia, Russia); aleks233@yandex.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/)

**ЖУКИ-ЖУЖЕЛИЦЫ (COLEOPTERA, CARABIDAE) КАК ПРИРОДНЫЙ ИНДИКАТОР ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ БИОЦЕНОЗА ЗОЛОТВАЛОВ ТВЁРДОТОПЛИВНОЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ПРИМЕРЕ ТЭЦ №5 (НОВОСИБИРСК)**© 2021 А. Н. Беспалов , И. П. Беланов 

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

Цель исследования. Выявить закономерности развития сообщества жуужелиц (Coleoptera, Carabidae), показать их видовую специфику на золоотвалах ТЭЦ в зависимости от уровня развития почвообразовательных процессов и почвенно-экологического состояния нарушенных участков.

Место и время проведения. В качестве объекта исследования был выбран золоотвал №1 ТЭЦ-5 г. Новосибирска (54°59' с.ш., 83°03' в.д.). Образцы почв отбирали в 2019 г.; жуужелиц собирали в 2017 и 2019 гг.

Методология. На золоотвале были выбрано шесть учетных площадок, соответствующих зонам седиментации частиц. В качестве контроля были выбраны: березовый колоч и луг костречово-клеверный. Почвенный покров территории золоотвала описывали в соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов; почвенный покров сформирован различными типами эмбриоземов. Влажность почвы на каждом из участков исследования определяли в слое 0–5 см термовесовым методом. Отбор почвенных образцов проводили в мае 2019 г. Для сбора жуужелиц на каждом участке было установлено пять ловушек, на 1/3 заполненных для фиксации жуков 4% уксусной кислотой. Сбор жуужелиц проводили в мае–июне 2017 г. и в июне–июле 2019 г. По данным о населении жуужелиц рассчитаны индексы α-биоразнообразия. Фауны различных биотопов сравнивали с помощью кластерного анализа в программе PAST 3.09.

Основные результаты. На всех участках обнаружено 74 вида жуужелиц; на участках золоотвала обнаружено 60 видов жуужелиц, при этом на секции с отсыпкой потенциально плодородной породой (ППП) отмечено 48 видов, а на секции с зольным материалом 35 видов. На контрольных участках отмечено 24 вида: в березовом колочке 14 и на лугу 10 видов. Обилие жуужелиц на рекультивированной секции почти в 3 раза больше, чем на нереккультивированной (973 экземпляра против 347). Кластерный анализ показал, что участки золоотвала по фауне жуужелиц разделяются на 3 группы: группа сухих нереккультивированных участков, группа сухих рекультивированных участков и группа участков с переувлажнением. Почвенный покров исследуемого золоотвала представлен инициальным, органо-аккумулятивным, дерновым и гумусово-аккумулятивным эмбриоземами.

Заключение. За девять лет самозарастания золоотвала на нем образовались сообщества жуужелиц с высоким видовым богатством и обилием. Эти сообщества существенно отличаются от сообществ соседних ненарушенных биоценозов, выбранных для сравнения. Видовой состав и динамическая плотность жуужелиц увеличивается в ряду контроль – зольный материал – отсыпка ППП. Установлена закономерность: автономное положение в ландшафтно-геохимической катене занимает эволюционно менее развитый тип эмбриозема, и с увеличением степени увлажненности и подчиненности по положению в рельефе эволюционный порядок типа почвы увеличивается. Проведение технического этапа рекультивации с применением потенциально плодородной породы или плодородного слоя почв, позволяет значительно ускорить развитие почвенного покрова и биогеоценозов в целом.

Ключевые слова: ТЭЦ; почвообразовательные процессы; мезофауна; жуужелицы; Carabidae; техногенные почвы; рекультивация

Цитирование: Беспалов А.Н., Беланов И.П. Жуки-жуужелицы (Coleoptera, Carabidae) как природный индикатор процессов развития биоценоза золоотвалов твёрдотопливной теплоэлектростанции на примере ТЭЦ № 5 (Новосибирск) // Почвы и окружающая среда. 2020. Том 3. № 4. е132. doi: 10.31251/pos.v3i4.132

ВВЕДЕНИЕ

Более 60% электроэнергии в России вырабатывают тепловые электростанции (Veselov et al., 2019). В результате работы электростанций на твердом топливе (каменный и бурый уголь, торф и т.д.) образуется большое количество золошлаковых отходов, часто не подлежащих вторичному использованию и требующих безопасного захоронения на специальных полигонах, занимающих огромные площади (Андреева, 2006). Золоотвалы ТЭЦ являются серьезными источниками

загрязнения окружающей среды, в первую очередь – атмосферного воздуха (Носков и др., 1990; Haynes, 2009). Поэтому большое внимание уделяют консервации и рекультивации данных территорий. Для разработки эффективных технологий консервации и восстановления старых золоотвалов необходимо всестороннее изучение вопросов, касающихся особенностей формирования биоценозов в условиях нарушенных территорий.

К настоящему времени выполнено много работ по исследованию функционирования и восстановления биоценозов золоотвалов как в нашей стране, так и за рубежом. Большинство работ посвящено изучению одного определенного компонента экосистемы: почвенного покрова и процессов почвообразования (Константинов и др. 2018), почвенных беспозвоночных животных (Полчанинова, Форшук, 2013; Новгородова, 2018) и растительности (Гурина, 2014; Maiti, Prasad, 2016). В то же время существующих работ явно недостаточно для понимания полной картины функционирования и восстановления разрушенных экосистем. Использование биоиндикаторов позволяет установить стадии сукцессии и охарактеризовать экологическое состояние территории, а также в определенной мере оценить эффективность рекультивационных работ. Среди различных биоиндикаторов жуки-жужелицы являются одним из самых удобных объектов, позволяющих четко проследить сукцессионные смены и установить их направление, так как жужелицы активно реагируют на изменения среды (Koivula, 2011). В данной работе мы попытались применить комплексный подход для изучения восстановления экосистемы на золоотвалах ТЭЦ. Целью нашей работы было исследовать сообщества жуков-жужелиц на золоотвале, провести сравнение сообществ жужелиц на рекультивированных и нереккультивированных участках отвала, исследовать особенности почвообразовательных процессов, изучить взаимосвязи между почвенными беспозвоночными, а именно жужелицами, почвой и растительностью на золоотвале.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований нами был выбран золоотвал № 1 ТЭЦ №5 г. Новосибирска. Золоотвал расположен в черте города в верховьях лога «Барышевский» вблизи водораздела р.Ини и р. Плющихи (54.997 с.ш., 83.069 в.д.). Отвал был введен в эксплуатацию в 1987 г., подача золошлакового материала прекращена в 2008 г. Золоотвал состоит из двух секций, разделенных дамбой; общая площадь его составляет 41,4 га. В 2010–2011 гг. на одной секции (S1) золоотвала площадью 17,7 га отсыпку не проводили. На другой секции (S2) отработанного золоотвала был проведен технический этап рекультивации, который состоял в нанесении на поверхность золоотвала слоёв потенциально плодородных пород (ППП) различной мощности. На каждой секции сформирован уклон, обусловленный тремя зонами седиментации частиц: приустьевая, основная и ядерная, отличающимися по степени увлажнения грунта (сухая, умеренно влажная и влажная соответственно), а также по развившимся на них растительным сообществам. Биологический этап рекультивации не проводили. Поселение растений происходило на свободный минеральный субстрат, поэтому восстановительная сукцессия идет по типу первичных. Для исследования на золоотвале было выбрано шесть учетных площадок по три на каждую секцию; в качестве контроля взяли два ненарушенных участка: березовый колос и луг, расположенные в непосредственной близости. Характеристика растительного покрова, а также влажность каждого из полигонов, где проводили наблюдение, представлены в Таблице 1.

Почвенный покров территории золоотвала описывали в соответствии с классификацией почв техногенных ландшафтов. Почвенный покров представлен различными типами эмбриоземов (Курачев, Андроханов, 2002). Почву контрольных участков классифицировали как серую лесную (Классификация..., 1977), или Phaeozem (IUSS, 2015). Влажность почвы на каждом из участков исследования определялась в слое 0–5 см термовесовым методом согласно ГОСТ 28268-89: Почвы. Методы определения влажности, гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. (ГОСТ 28268–89).

Описание флористического состава и его характеристик в каждом из местообитаний использовано по данным Н.В.Шермет с соавторами (Sheremet et al., 2018). Флористический состав золоотвала представлен 130 видами сосудистых растений из 96 родов и 37 семейств. Флора секции 2 состоит из 42 видов 36 родов из 14 семейств. В то же время флора секции 1 с нанесением ППП в настоящий момент представлена 93 видами 67 родами 30 семействами, что показывает ее большее разнообразие. Наибольший вклад в состав хозяйственно-ботанических групп на участках регенерации на зольном материале вносят злаки, доминирующая роль среди которых принадлежит вейнику наземному (*Calamagrostis epigeios*) и тростнику южному (*Phragmites australis*). На

участках с нанесением ППП доминируют виды бобовых — клевер луговой (*Tripholium pratense*), клевер гибридный (*Tripholium hybridum*) и чина луговая (*Lathyrus pratensis*). В целом нанесение потенциально плодородных пород, обладающих более высоким литогенным потенциалом, способствует увеличению видового разнообразия и продуктивности растительных сообществ.

Исследования жуков-жужелиц проводили одновременно на всех участках с 30 мая по 13 июня 2017 (контрольный травянистый участок КТ не исследовали в 2017 г.) и с 27 июня по 4 июля 2019 г. На каждом участке было установлено 5 ловушек, на 1/3 заполненных 4% уксусной кислотой в качестве фиксатора. Ловушки представляли собой пластиковые стаканчики объемом 200 мл и диаметром 6,5 см. Ловушки ставили в линии с расстоянием 1 метр между ловушками (Фасулати, 1971). Проверяли ловушки каждые 7 дней. Отработано более 700 ловушко-суток.

Фауны различных биотопов сравнивали с помощью кластерного анализа с использованием программы PAST 3.09 (Hammer et al., 2001). К видам доминантного комплекса отнесены виды, доля особей которых в учетах составляла не ниже 5% от общего числа особей. Рассчитывали следующие индексы α -биоразнообразия: индекс Маргалефа для оценки видового богатства, индекс Бергера-Паркера для оценки степени доминирования, и индекс Шеннона для оценки сложности структуры сообщества жужелиц (Мэггаран, 1992). Экологические группы жужелиц по биотопической приуроченности (лесная, луговая, лугово-степная, эвритопная, пойменно-прибрежная) определены на основе литературных источников (Дудко, Самбыла, 2005; Лузянин и др, 2015; Воронин, Чумаков, 2015; Важенина, Сергеева 2018) и собственных наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы и растительность

Почвенный покров исследуемого золоотвала представлен инициальным, органо-аккумулятивным, дерновым и гумусово-аккумулятивным эмбриоземами согласно классификации почв техногенных ландшафтов, разработанной в ИПА СО РАН (Курачев, Андроханов, 2002). Почвы характеризуются разной степенью накопления и разложения растительного опада, и, как следствие, отсутствием или наличием формирующегося гумусового горизонта.

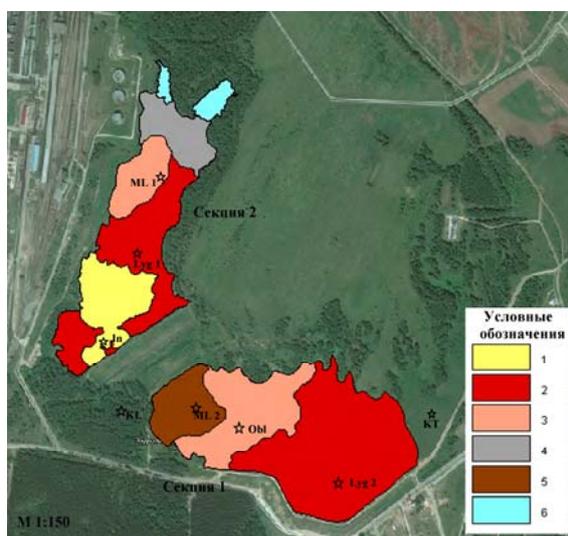


Рисунок 1. Карта-схема почвенного покрова сформировавшегося на поверхности золоотвала ТЭЦ-5 Условные обозначения: 1 – эмбриозем инициальный; 2 - эмбриозем органо-аккумулятивный; 3 – эмбриозем дерновый; 4 – эмбриозем дерновый глеевый; 5 - эмбриозем грубогумусово-аккумулятивный глеевый; 6 – вода.

Представленная карта-схема показывает, что почвенный покров в каждой из зон катены при отсыпке ППП однороден, в то время как на зольном материале наблюдается некоторая мозаичность (Рис. 1). При этом за одинаковый период времени на территории секции 2 сформировались типы эмбриоземов более высокого эволюционного порядка.

Установлена закономерность: автономное положение в катене занимает эволюционно менее развитый тип эмбриозема, и при увеличении степени увлажненности и подчиненности по положению в рельефе эволюционный порядок типа почвы увеличивается. Так, в вегетационный период средняя влажность (в слое 0–5 см) на травянистом участке с облепихой In составляет в среднем 8,3%, на участке с травянистой растительностью Lyg1 – 18,3%, на травянистом участке

ML1 – 22%. Аналогичная закономерность прослеживалась на территории секции с нанесением ППП, где на травянистом участке Lyg2 влажность составляла 10,9%, на травянистом участке с облепихой и ивой Obl 17,5%, на травянистом участке ML2 – 18,9% (см. Табл. 1).

Таблица 1

Характеристика рабочих полигонов в разных зонах нерекультивированной (S1) и рекультивированной (S2) секций золоотвала ТЭЦ; растительное сообщество охарактеризовано по данным Н. Шеремет с соавторами (Sheremet et al., 2018)

Полигон	Тип растительных сообществ	Проективное покрытие, %	Высота травостоя, см	Травянистые растения (доминанты)	Древесные растения	Полевая влажность в слое 0-5см, %
In	Разнотравно-вейниковое с облепихой	5	40	<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth., <i>Artemisia integrifolia</i> L., <i>A. vulgaris</i> L., <i>Turritis glabra</i> L., <i>Melilotus albus</i> Medic.	<i>Hi ppophaë rhamnoides</i> L., <i>Populus italica</i> (Du Roi) Moench	8,3
Lyg1	Донниково-вейниковое	90–100	90	<i>C. epigeios</i> , <i>M. albus</i>	<i>H. rhamnoides</i>	18,3
ML1	Тростниково-вейниковое	50	110	<i>C. epigeios</i> , <i>Agrostis gigantea</i> Roth.	<i>Salix caprea</i> L., <i>S. viminalis</i> L.	22
Lyg2	Разнотравно-клеверозлаковое	70	70–80	<i>Phleum pratense</i> L., <i>Dactylis glomerata</i> L., <i>C. epigeios</i> , <i>Trifolium hybridum</i> L., <i>T. pratense</i> L., <i>Cirsium setosum</i> (Willd.) Bess., <i>Artemisia dracunculus</i> L., <i>Galium boreale</i> L.	<i>Acer negundo</i> L., <i>S. rosmarinifolia</i> L., <i>Pinus sylvestris</i> L., <i>H. rhamnoides</i>	10,9
Obl	Разнотравно-бобово-злаковое с кустами облепихи и ивы	90–100	80–90	<i>P. pratense</i> , <i>C. epigeios</i> , <i>A. gigantea</i> , <i>T. pratense</i> , <i>T. hybridum</i> , <i>Sonchus arvensis</i> L.	<i>H. rhamnoides</i> , <i>S. caprea</i> , <i>S. viminalis</i>	17,5
ML2	Клеверополевищное	60	55–60	<i>A. gigantea</i> , <i>C. epigeios</i> , <i>Phragmites australis</i> (Gav.) Trin. ex Steudel, <i>T. pratense</i> , <i>T. hybridum</i> , <i>T. repens</i> L.	<i>Betula pendula</i> Roth., <i>P. italica</i> , <i>P. sylvestris</i> , <i>S. caprea</i> , <i>S. viminalis</i> , <i>H. rhamnoides</i>	18,9
KL	Березовый лес со злаково-снытьевым покровом	-	-	<i>D. glomerata</i> , <i>Festuca pratensis</i> Huds., <i>Aegopodium podagraria</i> L., <i>G. boreale</i> , <i>Lathyrus gmelinii</i> Fritsch, <i>Sanguisorba officinalis</i> L.	<i>B. pendula</i> , <i>P. sylvestris</i>	22
КТ	Луг кострцово-клеверный	100	90	<i>A. gigantea</i> , <i>C. epigeios</i> , <i>Phragmites australis</i> (Gav.) Trin. ex Steudel, <i>T. pratense</i> , <i>T. hybridum</i> , <i>T. repens</i> L.	-	12

Примечание: нерекультивированная секция (S1): In, Lyg1, ML1, рекультивированная секция (S2): Lyg2, Obl, ML2, контрольные участки KL и КТ.

Фауна и население жуков-жужелиц

В отличие от почвы и растений сообщество животных обладает важным качеством – возможностью передвижения особей в пространстве и, соответственно, выбора ими наиболее подходящих для своего существования местообитаний. Всего за время исследования собрано 1565 экземпляров жужелиц 74 видов из 26 родов. На участках с нанесением ППП собрано 973 экземпляра жуков жужелиц из 48 видов, а на нерекультивированных участках – 347 экземпляров из 35 видов. На контрольных участках отмечено 24 вида: в березовом колке – 14 видов и на лугу – 10 видов, по 209 и 36 особей жужелиц соответственно. Количество видов в крупных родах распределилось следующим образом: *Amara* – 11, *Harpalus* и *Bembidion* по 9 видов и *Dyschiriodes* – 6, что составляет 47% от общего видового состава, выявленного на всех учетных площадках. Наибольший вклад в население нарушенных территорий вносят 5 родов: *Poecilus* (51%), *Agonum* (10,5%), *Pterostichus* (10%), *Bembidion* (7%) и *Dyschiriodes* (5%): их суммарное обилие составляет более 83% всех собранных экземпляров жужелиц. В количественном отношении наиболее многочисленными оказались три вида рода *Poecilus*: *P. versicolor* (Sturm) (25,3%), *P. cupreus* (L.) (11,8%) и *P. lepidus* (Leske) (9,6%). Достаточно многочисленными были *Agonum sexpunctatum* (L.) (9,5%) и *Pterostichus magus* Mnnh. (9%). Остальные виды имеют обилие менее 5 %.

Таблица 2

Параметры таксоценов жужелиц в разных биотопах

Показатель разнообразия	Биотопы							
	In	Lyg1	ML1	Lyg2	Obl	ML2	KL	KT
Число видов	15	22	18	20	23	24	14	10
Средняя динамическая плотность (ДП), особей на 100 ловушко-суток	45,2	264,2	82,8	273,3	343,8	309,5	199	102,8
Индекс Бергера-Паркера	0,21	0,17	0,37	0,54	0,55	0,43	0,67	0,53
Индекс Шеннона, H	2,48	2,52	2,17	1,67	1,60	1,83	1,30	1,60
Индекс Маргалефа	3,85	3,89	3,81	3,36	3,74	4,00	2,43	2,51

Для сообществ жужелиц были рассчитаны индексы α -биоразнообразия (Табл. 2). Индекс Шеннона отражает сложность структуры сообщества. Минимальные значения индекса Шеннона были рассчитаны для контрольных участков (1,2–1,6). Эти значения указывают на то, что данные участки отличаются небольшим набором видов, однако сообщества жужелиц имеют хорошо сбалансированный видовой состав. Наибольшие значения индекса рассчитаны для травянистого участка с облепихой In и травянистого участка Lyg1 (2,4–2,5), что указывает на среднюю сложность структуры сообществ: в видовом составе здесь преобладают пионерные виды, устойчивого сообщества здесь не сформировано.

Увеличение индекса Бергера-Паркера указывает на снижение α -биоразнообразия и увеличение степени доминирования одного вида, то есть состояние сообщества становится менее стабильным. Максимальные значения этого индекса отмечены для контрольных точек, т.е. травянистого участка Lyg2 и травянистого участка с облепихой и ивой Obl, где они находятся в пределах 0,5–0,6. Эти значения показывают, что сообщества жужелиц на нарушенных территориях характеризуются небольшим количеством доминирующих видов с высоким обилием и значительным числом видов с низким обилием. Исключение составили только травянистый участок с облепихой In и травянистый участок Lyg1, отличающиеся от других большим количеством видов с высокой численностью и маленьким числом видов с низкой численностью.

Индекс Маргалефа отражает плотность видов, или видовое богатство, на определенной территории, т.е. чем выше индекс, тем большим видовым богатством характеризуется данная территория. Для исследованных нарушенных территорий значение индекса Маргалефа колеблется в пределах от 3,3 до 4,0, что указывает на большее видовое богатство данных сообществ жужелиц. Наименьшее значение данного индекса отмечено для контрольных участков (2,4–2,5), что показывает относительную бедность их сообществ жужелиц.

Для анализа сходства видовых композиций исследованных участков был проведен кластерный анализ (Рис.2). Первыми от дендрограммы отделяются ветви с контрольными участками, что объясняется небольшим набором видов и низким обилием жужелиц. Сообщества жужелиц тут находятся в стабильном состоянии, в то время сообщества жужелиц нарушенных территорий нестабильны, и в их составе большое количество видов, не свойственных для данных биотопов. Ядро дендрограммы состоит из 3 ветвей. В первую ветвь вошли два участка:

травянистый участок с облепихой In и участок с травянистой растительностью Lyg1, участки находятся в сухой зоне секции 1, где рекультивацию не проводили. Это участки характеризуются достаточно богатым видовым составом, но небольшим обилием. Вторая ветвь содержит участки: травянистый участок с облепихой и ивой Obl и травянистый участок Lyg2; участки находятся в сухой зоне секции 2, где рекультивацию проводили. Участки отличаются большим количеством видов и богатым населением жужелиц. Третья, смешанная, группа состоит из травянистых участков ML1 и ML2, находящихся в более влажной ядерной зоне: здесь представлены участки как из секции № 1, так и секции № 2. В фауне и населении жужелиц здесь отмечено большое количество влаголюбивых видов жужелиц. Однако участок первой, нерекультивированной секции, отличается меньшим набором видов, и население жужелиц на нем почти в 4 раза беднее, чем на участке ML2. Такое распределение биотопов по дендрограмме показывает, что проведение рекультивации ускоряет процесс восстановления сообщества жужелиц. Эти различия более выражены на участках, расположенных в сухих зонах.



Рисунок 2. Дендрограмма сходства видовых композиций жуков-жужелиц исследованных участков нарушенных территорий (индекс Жаккара, метод невзвешенной пары, UPGMA). Обозначение биотопов, как в таблице 1.

Биотопический спектр жужелиц сформирован пятью экологическими группами (рис.3). По числу видов в фауне жужелиц преобладают лугово-степная и пойменно-прибрежная группы (по 26,8% соответственно). По числу экземпляров в населении жужелиц преобладает лугово-степная группа (49,3%), лесная группа (22,8%) и группа пойменно-прибрежных видов (15,8 %).

Рассмотрим соотношение экологических групп жужелиц основных участков в отдельности. В фауне травянистого участка с облепихой In преобладала лугово-степная группа (35,7%), на втором месте группа эвритопных видов (28,6 %), на третьем месте пойменно-прибрежные виды (21,5%). В населении лидировала группа эвритопных видов (33,3%), а группа лугово-степных видов находилась на втором месте с показателем 30%. В фауне травянистого участка Lyg 1 лугово-степная группа и пойменно-прибрежная группа имели одинаковое значение, по 33,3%. В населении резко преобладает лугово-степная группа (54,6%), а группа пойменно-прибрежных видов занимала только второе место с показателем 22,8%. В фауне влажного участка с травянистой растительностью ML1 преобладали пойменно-прибрежные виды (40%), а на втором месте находилась лугово-степная группа (26,6%). В населении преобладали пойменно-прибрежные виды (71,9%); на втором месте были лугово-степные виды (19,6%). В фауне травянистого участка Lyg 2 резко преобладали лугово-степная группа (55,0%), на втором месте находилась эвритопная группа (20%). В населении преобладала лугово-степная группа (72,5%), на второе место выходит группа лесных видов (16,7%). На травянистом участке с присутствием облепихи и ивы Obl в фауне преобладали лугово-степные виды жужелиц (34,8%), а на втором месте луговые виды (21,7%). В населении преобладали представители лугово-степных видов (62%), а на второе место вышли лесные виды с показателем 23%. В целом можно отметить, что для нерекультивированных участков характерно доминирование лугово-степных видов, с большой долей эвритопных и пойменно-прибрежных видов. Для рекультивированных участков характерно доминирование лугово-степных видов, при этом доля эвритопных и пойменно-прибрежных видов здесь значительно меньше, за исключением влажного участка, где доминировали пойменно-прибрежные виды.

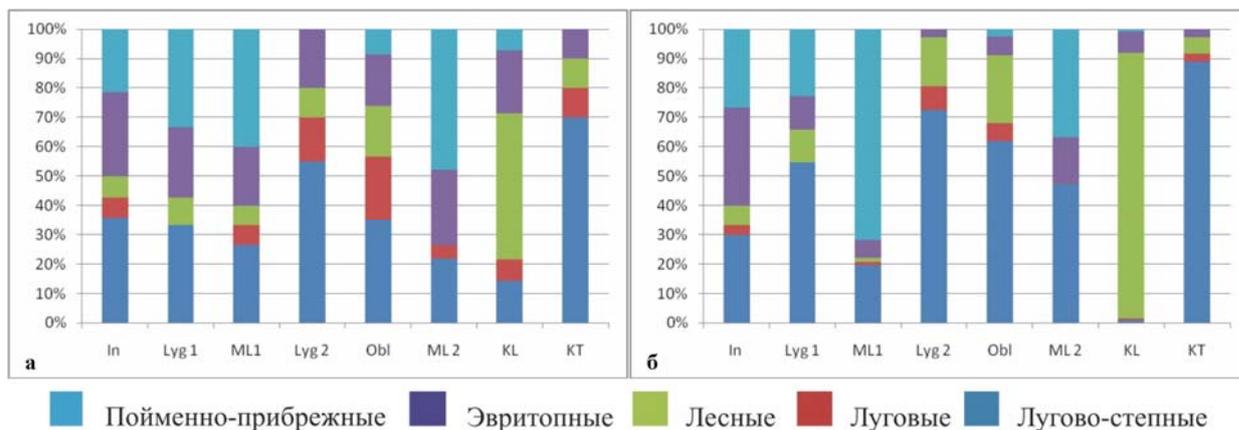


Рисунок 3. Соотношение экологических групп жуслиц: а – по числу видов, б – по суммарной динамической плотности. Обозначения биотопов, как в таблице 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За девять лет самозарастания золоотвала на его территории образовались сообщества жуслиц с большим видовым богатством и высокой численностью. Эти сообщества существенно отличаются от ненарушенных биоценозов, расположенных по соседству с золоотвалом и выбранных для сравнения. На участках золоотвала обнаружено 60 видов жуслиц, при этом на рекультивированных участках отмечено 48 видов, а на нереккультивированных – 35 видов. Обилие жуслиц на рекультивированных участках почти в три раза больше, чем на нереккультивированных, 973 экземпляра, против 347. На контрольных участках отмечено 24 вида: в березовом колке отмечено 14 видов и на лугу 10 видов, 209 и 36 особей жуслиц соответственно. Видовой состав и плотность жуслиц увеличивались в ряду контроль – зольный материал – отсыпка ППП. Кластерный анализ показал, что участки золоотвала по фауне жуслиц разделяются на три группы: группа сухих нереккультивированных участков, группа сухих рекультивированных участков и группа участков с переувлажнением. В фауне жуслиц нарушенных территорий преобладают виды лугово-степной группы, велика доля эвритопных и прибрежных видов. В населении нарушенных территорий наиболее многочисленны представители лугово-степной группы, второе место занимали представители пойменно-прибрежной группы.

Почвенный покров исследуемого золоотвала представлен инициальным, органо-аккумулятивным, дерновым и гумусово-аккумулятивным эмбриозёмами. Они характеризуются разной степенью накопления и разложения растительного опада и как следствие отсутствием или наличием формирующегося гумусового горизонта. Представленная карта-схема показывает, что почвенный покров в каждой из зон катены при отсыпке ППП однороден, в то время как на зольном материале наблюдается некоторая мозаичность. При этом за одинаковый период времени на территории секции 2 сформировались типы эмбриоземов более высокого эволюционного порядка.

Проведение технического этапа рекультивации с применением потенциально плодородных пород или плодородного слоя почв, позволяет значительно ускорить развитие почвенного покрова и биогеоценозов в целом при естественном самозарастании.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена по государственному заданию ИПА СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева С.Г. *Гигиеническая оценка золошлаковых отходов, образующихся при сжигании углей Канско-Ачинского бассейна*. Автореф. дисс. ... к.м.н. Кемерово, 2006. 21 с.
2. *Важенина Н.В., Сергеева Е.В.* Структура и динамика населения жуслиц (*Coleoptera, Carabidae*) поймы Нижнего Иртыша // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2018. №43. С.111 – 135. DOI: [10.17223/19988591/43/6](https://doi.org/10.17223/19988591/43/6)
3. *Воронин А.Г., Чумаков Л.Н.* Распределение жуслиц (*Coleoptera, Carabidae*) различных экологических групп по лесолуговому экотону // *Экология*. 2015. №6. С.470 – 472.
4. *ГОСТ 28268-89.* Почвы. Методы определения влажности, гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. 2005. 8 с.
5. *Гурина И.В.* Зависимость продуктивности травосмеси на золоотвале от минерального питания // *Природообустройство*. 2014. №1. С.23 – 25.

6. Дудко Р.Ю., Самбыла Ч.Н. Высокогорная фауна жужелиц (Coleoptera, Carabidae) восточно-тувинского нагорья // *Евразийский энтомологический журнал*. 2005. Т.4. №3. С.209 – 218.
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. Константинов А.О., Новоселов А.А., Лойко С.В. Особенности процессов почвообразования на участках самозарастающих золоотвалов твердотопливной теплоэлектро станции // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2018. № 43. С.6 – 24. DOI: [10.17223/19988591/43/1](https://doi.org/10.17223/19988591/43/1)
9. Курачев В. М., Андроханов В. А. Классификация почв техногенных ландшафтов // *Сибирский экологический журнал*. 2002. №3. С.255 – 262.
10. Лузянин С.Л., Дудко Р.Ю., Беспалов А.Н., Еремеева Н.И. Биоразнообразие жужелиц (Coleoptera, Carabidae) на отвалах угольных разрезов Кузбасса // *Евразийский энтомологический журнал*. 2015. Т.14. № 5. С. 455–467.
11. Мэгарран Э. *Экологическое разнообразие и его измерение*. М.: Мир, 1992. 161 с.
12. Наумова Н.Б., Беланов И.П., Аликина Т.Ю. Таксономическое разнообразие бактериального ансамбля в эмбриоземе самозарастающего золоотвала // *Почвы и окружающая среда*. 2019. Т.2. № 3. e84. DOI: [10.31251/pos.v2i3.84](https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.84)
13. Новгородова Т.А. Мирмекофауна золоотвала ТЭЦ-5 г. Новосибирска на начальных этапах самозарастания. // *Евразийский энтомологический журнал*. 2018. Т.17. № 5. С.340 – 344.
14. Носков А.С., Савинкина М.А., Анищенко Л.Я. *Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1990. 178 с.
15. Полчанинова Н.Ю., Фороцук П.В. Первые сведения о населении пауков (Araneae) рекультивированных золоотвалов (Луганская ТЭЦ, Украина) // *Биологический вестник Мелитопольского государственного педагогического университета им. Богдана Хмельницкого*. 2013. № 3(9). С.238-249.
16. Фасулати К.К. *Полевые изучения наземных беспозвоночных*. М.: Высшая школа, 1971. 424 с.
17. Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. Vol.4. Iss.1. P.9.
18. Haynes R.J. Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites – Challenges and research needs // *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol.90. Is.1. P.43 – 53. DOI: [10.1016/j.jenvman.2008.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.003)
19. *IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps (2015) update 2015. World Soil Resources Reports*. Rome: FAO.
20. Koivula M.J. Useful model organisms, indicators, or both? Ground beetles (Coleoptera, Carabidae) reflecting environmental conditions // *ZooKeys*. 2011. №. 100. P. 287–317. DOI: [10.3897/zookeys.100.1533](https://doi.org/10.3897/zookeys.100.1533)
21. Maiti D., Prasad B. Revegetation of fly ash – a review with emphasis on grass-legume plantation and bioaccumulation of metals // *Applied ecology and environmental research*. 2016. V.14 №2. P.185 – 212. DOI: [10.15666/aecer/1402_185212](https://doi.org/10.15666/aecer/1402_185212)
22. Sheremet N., Belanov I., Doronkin V., Lamanova T., Naumova N. Biogeocenosis development during initial revegetation of a coal combustion ash dump. BIO Web of Conferences // *Pros. Development and Challenges of Modern Botany*. 2018. V.11. N00038. DOI: [10.1051/bioconf/20181100038](https://doi.org/10.1051/bioconf/20181100038)
23. Veselov F.V., Khorshev A.A., Erokhina I.V., Alikin R.O. Economic Challenges For Coal-Fired Power Plants In Russia And Around The World // *Power Technology and Engineering*. 2019. Vol. 53. № 3. P. 324-330. DOI: [10.1007/s10749-019-01079-9](https://doi.org/10.1007/s10749-019-01079-9)

Поступила в редакцию 16.03.2021

Принята 14.05.2021

Опубликована 17.05.2021

Сведения об авторах:

Беспалов Алексей Николаевич - к.б.н., научный сотрудник лаборатории рекультивации почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); bespalov@issa-siberia.ru

Беланов Иван Петрович - к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории рекультивации почв ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, Россия); belanov@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/)

GROUND BEETLE (*COLEOPTERA*, *CARABIDAE*) COMMUNITIES AS NATURAL INDICATORS OF ECOSYSTEM RESTORATION ON THE TERMINATED FLY ASH DUMP OF THE THERMOELECTRIC POWER STATION (NOVOSIBIRSK, RUSSIA)

© 2021 A. N. Bepalov , I. P. Belanov 

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

The aim of the study. The aim of the study was to reveal regularities in the development of ground beetles (*Coleoptera*, *Carabidae*)' communities, to determine their species peculiarities as dependent on soil formation rate and soil ecology in the ecosystems developed on the terminated fly ash dump of the thermoelectric power station over nine years of restoration.

Location and time of the study. The main object of the study was a terminated fly ash dump No.1 of the thermoelectric power station No.5 in Novosibirsk, Russia. (54°59' NL, , 83°03' EL). Soil samples were collected in 2019, whereas the ground beetles were collected in 2017 and 2019.

Methodology. Six study sites, corresponding to the fly ash dump sedimentation zones, were chosen. The undisturbed white birch forest and clover-brome meadow were chosen as controls representing mature climax ecosystems. Soil cover, developing on the fly ash dump after its termination, was described according to the soil classification of technogenic landscapes, and was shown to consist of various types of embryozems (*Technosols*). Soil water content on each study site was measured in 0–5cm layer by gravimetric method. Soil samples were collected in May 2019. To collect ground beetles five traps were placed on each study site, each trap filled up to 1/3 of its volume with 4% acetic acid for fixing the trapped beetles. The beetles were collected in May–June 2017 and in June–July 2019. The data obtained were used to calculate α -biodiversity indices and perform cluster analysis using PAST v.3.09 software.

Main results. Altogether 74 species of the ground beetle we found: 60 species of ground beetles were identified in the revegetating fly ash dump areas, with 48 species found at the sites amended with potentially fertile substrate (PFS), and 35 species found at the sites without PFS addition. The control sites under birch forest and meadow had 14 and 10 species, respectively. Thus the ground beetles' abundance in the reclaimed area was almost 3 times greater than in the non-reclaimed area (973 specimens vs. 347). Cluster analysis discriminated three groups in the studied fly ash dump sites, namely dry non-reclaimed sites, dry PFS sites and moist sites. Soil cover of the studied fly ash dump was represented by initial, organic matter accumulating, humus-accumulating and sod embryozems (*Technosols*).

Conclusion. Over nine years of spontaneous restoration at the terminated fly ash dump of the thermoelectric power station species rich and abundant communities of ground beetles were formed. These communities differed significantly from those at the adjacent undisturbed climax ecosystems used for comparison. Species richness and dynamic density of ground beetles was shown to increase from the control sites to non-reclaimed sites and PFS-reclaimed sites. The autonomous position in the catena was found to be occupied by the less evolutionary developed embryozem type, whereas downwards along the catena, i.e. with increasing soil moisture content, identified soil types belonged to higher evolutionary order. Therefore technical recultivation with fly ash dump overlaying with potentially fertile substrate or fertile soil allow accelerating soil cover development, as well as the development of an entire biogeocenosis.

Key words: thermoelectric power station; soil formation processes; mesofauna; *Technosols*; spontaneous restoration

How to cite: Bepalov A.N., Belanov I.P. Ground beetle (*Coleoptera*, *Carabidae*) communities as natural indicators of ecosystem restoration on the terminated fly ash dump of the thermoelectric power station (Novosibirsk, Russia) // *The Journal of Soils and Environment*. 2020. 3(4). e132. doi: [10.31251/pos.v3i4.132](https://doi.org/10.31251/pos.v3i4.132) (in Russian with an English abstract).

REFERENCES

1. Andreeva S. G. Hygienic assessment of ash and slag waste generated during coal burning in the Kansk-Achinsk basin, Abstract of Dissertation ... Cand. Of Medical Sci. in Biology. Kemerovo, 2006, 21 p. (in Russian)
2. Vazhenina N. V., Sergeeva E. V. Structure and dynamics of the population of ground beetles (*Coleoptera*, *Carabidae*) in the floodplain of the Lower Irtysh, *Bull. of Tomsk State University. Biology*, 2018, No 43. p. 111–135. DOI: [10.17223/19988591/43/6](https://doi.org/10.17223/19988591/43/6) (in Russian)
3. Voronin A. G., Chumakov L. N. Distribution of ground beetles (*Coleoptera*, *Carabidae*) of various ecological groups in the forest-meadow ecotone, *Ecology*, 2015, No 6. p.470-472 (in Russian)
4. GOST 28268-89 Soil. Methods for determining humidity, hygroscopic humidity and humidity of sustainable wilting of plants. 2005. 8 p. (in Russian)

5. Gurina I. V. Dependence of the productivity of the grass mixture on the ash dump on mineral nutrition, *Nature management*, 2014, No 1. p. 23-25. (in Russian)
6. Dudko R. Yu., Sambyla Ch. N. High-mountain fauna of ground beetles (*Coleoptera, Carabidae*) of the East Tuva highlands, *Euroasian Entomological Journal*, 2005, Vol. 4, No 3. p. 209-218 (in Russian)
7. *Classification and diagnostics of soils of the USSR*. Moscow, Kolos Publ., 1977, 224 p. (in Russian)
8. Konstantinov A. O., Novoselov A. A., Loiko S. V. Features of soil formation processes in the areas of self-infesting ash dumps of a solid-fuel thermal power plant, *Bull. of Tomsk State University. Biology*, 2018, No. 43, p. 6-24. DOI: [10.17223/19988591/43/1](https://doi.org/10.17223/19988591/43/1) (in Russian)
9. Kurachev V.M., Androkhanov V.A. Classification of soils of technogenic landscapes, *Contemporary Problems of Ecology*, 2002, No 3. p. 255–262 (in Russian)
10. Luzyanin S.L., Dudko R.Yu., Bepalov A.N., Ereemeva N.I. Biodiversity of carabids (*Coleoptera, Carabidae*) on coal mining dumps of Kuzbass region, Kemerovskaya oblast", Russia, *Euroasian Entomological Journal*, 2015, Vol.14, No. 5, p. 625–628 (in Russian)
11. Megarran E. *Ecological diversity and its measurement*. Moscow, Mir Publ., 1992, 161 p. (in Russian).
12. Naumova N.B., Belanov I.P., Alikina T.Y. Taxonomic diversity of bacterial assemblage in Technosol of the revegetating fly ash dump, *The Journal of Soils and Environment*, 2019, Vol.2, Iss.3. e84. DOI: [10.31251/pos.v2i3.84](https://doi.org/10.31251/pos.v2i3.84) (in Russian with an English abstract)
13. Novgorodova T.A. Myrmecofauna of ash dump of the Novosibirsk combined heat and power plant (CHPP-5) at the initial stages of self-revegetation, *Euroasian Entomological Journal*, 2018, Vol. 17, No 5. p. 340-344 (in Russian)
14. Noskov A. S., Savinkina M. A., Anishchenko L. Ya. *The impact of TPP on the environment and ways to reduce the damage caused*. Novosibirsk, SB RAS Publ., 1990, 178 p. (in Russian)
15. Polchaninova N. Yu., Foroshchuk P. V. The first data on the population of spiders (Araneae) of recultivated ash dumps (Luhansk TPP, Ukraine), *Biological Bulletin of the Melitopol State Pedagogical University. Bogdan Khmelnytsky*, 2013, No 3(9). p. 238-249. (in Russian)
16. Fasulati K. K. *Field studies of terrestrial invertebrates*. Moscow, Higher School Publ., 1971, 424 p. (in Russian)
17. Hammer O., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis, *Palaeontologia Electronica*, 2001, 4(1), p.9.
18. Haynes R.J. Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites – Challenges and research needs, *J. Environ. Manage*, 2009, Vol. 90, No1. p. 43-53. DOI: [10.1016/j.jenvman.2008.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.003)
19. *IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps (2015) World Soil Resources Reports*. Rome: FAO.
20. Koivula M.J. Useful model organisms, indicators, or both? Ground beetles (*Coleoptera, Carabidae*) reflecting environmental conditions, *ZooKeys*, 2011, No 100. p. 287–317. DOI: [10.3897/zookeys.100.1533](https://doi.org/10.3897/zookeys.100.1533)
21. Maiti D., Prasad B. Revegetation of fly ash – a review with emphasis on grass-legume plantation and bioaccumulation of metals, *Applied ecology and environmental research*, 2016, Vol.14, No 2. p.185-212. DOI: [10.15666/aecer/1402_185212](https://doi.org/10.15666/aecer/1402_185212)
22. Sheremet N., Belanov I., Doronkin V., Lamanova T., Naumova N. Biogeocenosis development during initial revegetation of a coal combustion ash dump. BIO Web of Conferences, *Pros. Development and Challenges of Modern Botany*, 2018, Vol.11, N00038. DOI: [10.1051/bioconf/20181100038](https://doi.org/10.1051/bioconf/20181100038)
24. Veselov F.V., Khorshev A.A., Erokhina I.V., Alikin R.O. Economic Challenges For Coal-Fired Power Plants In Russia And Around The World, *Power Technology and Engineering*, 2019, Vol. 53, No 3. p. 324-330. DOI: [10.1007/s10749-019-01079-9](https://doi.org/10.1007/s10749-019-01079-9)

Received 16 April 2021

Accepted 14 May 2021

Published 17 May 2021

About the authors:

Bepalov Alexey N. – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Recultivation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); bepalov@issa-siberia.ru

Belanov Ivan P. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Recultivation of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); belanov@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/)



СТО ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ИИ ЛЕОНИДОВНЫ КЛЕВЕНСКОЙ

© 2021 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 доктора биологических наук Клевенской Ии Леонидовны - организаторе и руководителе лаборатории почвенной микробиологии ИПА СО РАН, проработавшей в академической науке 40 лет и посвятившей свою деятельность изучению физиологии и экологии микроорганизмов в почвах Сибири.

Ключевые слова: Клевенская Ия Леонидовна; 100-летие; почвы; олигонитрофильные бактерии.

Цитирование: Артамонова В.С. Сто лет со дня рождения д.б.н. Ии Леонидовны Клевенской // Почвы и окружающая среда. 2020. Том 3. №4. е134. doi: 10.31251/pos.v3i4.134

В этом году исполнилось 100 лет со дня рождения Ии Леонидовны Клевенской, доктора биологических наук, микробиолога, известного в нашей стране и за рубежом, основателя лаборатории почвенной микробиологии Института почвоведения и агрохимии СО АН СССР. Её научный путь начинался в Биологическом институте Западно-Сибирского филиала АН СССР, позже переименованного в Биологический институт СО АН СССР, продолжился в Институте почвоведения и агрохимии СО АН СССР (ныне – ИПА СО РАН). Ия Леонидовна посвятила академической науке 40 лет, из них около 20 лет возглавляла лабораторию почвенной микробиологии. Некоторое время до ухода на заслуженный отдых работала в лаборатории рекультивации почв в должности ведущего научного сотрудника, затем – консультанта.



**Ия Леонидовна
Клевенская**

Ия Леонидовна Клевенская родилась 24 марта 1921 года в с. Тисуль Мариинского района Кемеровской области. После окончания школы в 1938 году в г. Севастополе поступила в Московский государственный университет им. Ломоносова на биологический факультет. В октябре 1941 года из-за эвакуации университета временно прервала учёбу, затем возобновила и в 1945 году окончила полный курс по специальности «физиология растений» (по кафедре микробиологии). Решением государственной экзаменационной комиссии от 9 июля 1945 года ей была присвоена квалификация «научного работника в области биологических наук, преподавателя ВУЗа, ВТУЗа и учителя средней школы».

Трудовая деятельность И.Л. Клевенской началась в 1945 году в г. Сталинабаде (ныне Душанбе) Таджикской ССР в Центральной лаборатории Садвинтреста Министерства пищевой промышленности республики, где она проработала микробиологом два года. Затем работа продолжилась в Институте эпидемиологии, микробиологии и санитарии Таджикистана, сначала в вакцинном отделе, в должности младшего научного сотрудника (до конца 1948 года), позже – в отделе БЦЖ того же института (1948–1949), в должности заведующего отделом. В связи с переводом мужа на другую работу И.Л. Клевенская переехала с семьёй в г. Чкаловск (ныне Оренбург) и продолжила работу на Областной санитарно-эпидемиологической станции в должности зав. отделом дезинфекции (1950–1952). В 1952 году Ия Леонидовна (после очередного перевода мужа) переехала в г. Новосибирск и поступила на работу младшим научным сотрудником в лабораторию физиологии и биохимии растений Биологического института ЗСФ АН СССР. С 1954 года И.Л. Клевенская начинает исследования в области микробиологии как ответственный исполнитель микробиологического раздела темы «Биологическое обоснование рационального использования целинных и залежных земель Западной Сибири». Она изучает микробиологические процессы в почвах Северной Кулунды в зависимости от сроков и глубины вспашки, получает информацию об особенностях развития агрономически ценных групп микроорганизмов. В 1957 году И.Л. Клевенская начинает изучение видового разнообразия актиномицетов в почвах.

В 1958 году Институт был передан в Сибирское отделение Академии наук СССР. С января 1959 года Ия Леонидовна (с прежней ставкой) переводится в новую структуру – Биологический институт СО АН СССР. В это время она активно работает над кандидатской диссертацией.

В 1961 году И.Л. Клевенская успешно защищает в Институте микробиологии АН СССР (Москва) диссертацию на соискание ученой степени кандидата биологических наук по теме «Микрофлора южных чернозёмов Кулундинской степи» и ей присуждают искомую учёную степень. Диссертация посвящена микроорганизмам целинных и освоенных почв Западной Сибири. В ней представлены закономерности распространения физиологически активных групп микроорганизмов в различных типах почв, результаты изучения распределения микроорганизмов по генетическим горизонтам, интенсивности микробиологических процессов, а также влияния мелиорации, орошения, внесения удобрений, глубины вспашки на биологическую активность почв. Были изучены возможности микроорганизмов утилизировать различные источники углерода и азота, выживать при повышенной концентрации солей, а, следовательно, и осмотическом давлении почвенного раствора, расти и размножаться при различных температурах, продуцировать и выделять физиологически активные вещества и многое другое. Полученные результаты использованы при разработке рекомендаций по освоению целинных земель, мелиорации солонцов и орошению каштановых почв Кулундинской степи.

В 1963 году на заседании учёного совета Биологического института СО АН СССР к.б.н. Клевенская Ия Леонидовна была избрана на должность заведующего лабораторией почвенной микробиологии. В 1966 году решением Президиума АН СССР И.Л. Клевенская утверждена в учёном звании старшего научного сотрудника по специальности «микробиология».

В декабре того же года Президиум АН СССР постановил:

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 структуру Института и основные научные направления лабораторий.

В состав Института почвоведения и агрохимии СО АН СССР вошли семь лабораторий, в том числе лаборатория микробиологии почв. Во исполнение решения Бюро Президиума Сибирского отделения Академии наук СССР № 360 от 9 октября 1968 г. в порядке перевода из Биологического института заведующая лабораторией микробиологии к.б.н. Клевенская И.Л. вместе со штатом лаборатории была зачислена в Институт почвоведения СО АН СССР и 31 декабря 1968 года по решению учёного совета Института утверждена в должности на очередной срок.

В 1974 году на заседании Объединенного учёного совета по биологическим наукам (Новосибирск) И.Л. Клевенская успешно защитила докторскую диссертацию, посвящённую олигонитрофильным¹ микроорганизмам почв Западной Сибири. Была установлена большая роль олигонитрофилов в генезисе почв подзолистого ряда и уменьшение значения олигонитрофильного типа питания у микроорганизмов, населяющих эволюционно более зрелые почвы. Было выявлено, что в интразональных почвах наибольшее распространение олигонитрофилы имеют в почвах с широким соотношением C/N. Среди олигонитрофилов было выявлено несколько десятков форм, способных к фиксации азота атмосферы. Был сделан важный в практическом плане вывод о том, что такие приемы, как орошение каштановых почв или осушение торфяно-болотных почв приводят к резкому увеличению азотфиксирующих форм олигонитрофилов, и что совместное внесение органических удобрений с микроэлементами особенно эффективно в плане увеличения таких форм и поступления атмосферного азота в связанном виде в почву.

Ия Леонидовна внесла большой вклад в развитие фундаментальной науки и микробиологического направления в почвоведении. Её организаторский талант, прекрасные человеческие качества помогли расширить коллектив лаборатории, привлечь молодёжь. Под её руководством в лаборатории микробиологии начались исследования бактерий, грибов и водорослей в географическом и экологическом аспектах, была создана коллекция клубеньков на

¹ Олигонитрофильные микроорганизмы (олигонитрофилы) – почвенные микроорганизмы, способные развиваться за счет малых количеств связанного азота в окружающей среде или атмосфере; многие олигонитрофилы обладают способностью фиксировать молекулярный азот (Толковый..., 1975).

корнях бобовых и небобовых растений, регулярно проводились лабораторные семинары и полевые комплексные экспедиции на Алтай, КАТЭК, Салаир, в Кузбасс для сбора образцов. Ия Леонидовна и сотрудники ее лаборатории детально исследовали микрофлору зональных и интразональных почв Западной Сибири. Впервые были получены данные о видовом составе и численности основных таксономических групп микроорганизмов в профиле почв и в ходе сезонной динамики. Были выявлены особенности микробных ассоциаций, а также биохимические особенности отдельных групп микроорганизмов. Особое внимание И.Л. Клевенская и сотрудники ее лаборатории уделяли изучению факторов, лимитирующих развитие и активность бактерий в почвах Западной Сибири. По инициативе Ии Леонидовны в лаборатории было организовано изучение ассоциативной и симбиотической фиксации азота атмосферы, освоен и откорректирован ацетиленовый метод определения азота в воздухе почв, позволивший оценивать актуальную и потенциальную нитрогеназную активность фото- и гетеротрофных бактерий. Очень интересны детальные исследования клубеньковых образований, которые были обнаружены у многих осоковых и злаковых растений, составляющих основу травянистых экосистем Сибири. С помощью изотопного и ацетиленового методов и химического определения содержания азота в растениях показано, что корневые клубеньки небобовых травянистых растений выполняют ту же функцию в снабжении растений азотом, что и клубеньки бобовых. Были получены очень важные оценки поступления азота в почву путем азотфиксации в клубеньках небобовых растений; таких оценок до сих пор не так много. В 80–90-е годы прошлого века было начато исследование сингенетических сукцессий микроорганизмов и эволюции их биогеоценотической деятельности в техногенных, в том числе рекультивированных, экосистемах в районе угледобычи. В 1984 году Ия Леонидовна была переведена в лабораторию рекультивации почв ИПА СО РАН, где работала в должности ведущего научного сотрудника, возглавляя исследования по теме «Микробоценозы техногенных ландшафтов» и продолжая курировать эту тему в должности консультанта вплоть до ухода на заслуженный отдых в 1993 году.

Первые публикации научных трудов И.Л. Клевенской появились в 1956 году, в соавторстве с Т.Г. Поповой и А.И. Сидоренко, возглавлявшими в 50-е годы XX-го столетия микробиологические исследования в Биологическом институте ЗСФ АН СССР. Результаты многолетней научной деятельности Ии Леонидовны опубликованы как в России, так и за рубежом. Ей принадлежит более 100 научных работ, в том числе три монографии, а также два удостоверения о регистрации по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР. На её статью многие годы учились студенты биологического факультета МГУ. Сама Ия Леонидовна была ученицей проф. Е.Н. Мишустина, преемницей его идей. Она постоянно поддерживала дружеские отношения с выпускниками университетов и коллегами – представителями осковских и ленинградских научных школ.

Из научных трудов И.Л. Клевенской особо следует выделить:

Клевенская И.Л. Олигонитрофильные микроорганизмы почв Западной Сибири // Новосибирск: Наука. 1974. 250 с.

Клевенская И.Л. Влияние тяжёлых металлов (Cd, Zn, Pb) на биологическую активность почв и процесс азотфиксации // Микробоценозы почв при антропогенном воздействии. – Новосибирск: Наука. 1985. С. 73–94.

Клевенская И.Л. Эволюция сообществ diaзотрофов и их азотфиксирующей функции (на примере регенерационных экосистем) // Биологическая фиксация азота. – Новосибирск: Наука. 1991. С. 191–196.

Клевенская И.Л. Эволюция микробоценозов и их функций // Экология и рекультивация техногенных ландшафтов. – Новосибирск: Наука. 1992. С. 149–199.

Клевенская И.Л., Клёнов Б.М. Рост и азотфиксация олигонитрофилов на гуминовых кислотах // Микробиологические процессы в почвах Западной Сибири. – Новосибирск: Наука. 1972. С. 3–22.

Клевенская И.Л., Родынюк И.С. Клубеньковые образования травянистых растений Западной Сибири // Новосибирск: Наука. 1977. 178 с.

Клевенская И.Л., Трофимов С.С., Таранов С.А., Кандрашин Е.Р. Сукцессии и функционирование микробоценозов в молодых почвах техногенных экосистем Кузбасса // Микробоценозы почв при техногенном воздействии. – Новосибирск: Наука. 1985. С. 3–21.

Фундаментальный вклад И.Л. Клевенской в развитие экологии, физиологии микроорганизмов почв сибирских территорий неосценим.

Обширным опытом, знаниями, перспективными идеями Ия Леонидовна делилась со своими учениками – молодыми сотрудниками лаборатории, а также аспирантами, соискателями ученой степени, представляющими академические институты и вузы Новосибирска, Владивостока, Алматы, Ташкента, Душанбе и других городов разных регионов нашей страны.

Многие годы И.Л. Клевенская являлась членом специализированного диссертационного совета по присуждению учёной степени доктора наук по специальностям «почвоведение» и «агрохимия» при ИПА СО АН СССР, оказывала помощь соискателям ученых степеней в подготовке кандидатских и докторских диссертаций, выступала оппонентом при защите диссертационных работ. Она была ответственным редактором ряда сборников научных трудов сотрудников институтов СО АН СССР, организатором издания коллективных монографий.

В 70-е годы И.Л. Клевенская читала курс лекций по микробиологии в Новосибирском государственном сельскохозяйственном институте.

Длительный период времени Ия Леонидовна возглавляла Новосибирское отделение Всесоюзного микробиологического общества АН СССР (ВМО). Была делегирована, как глава Отделения, на Международный конгресс по биологии почв, состоявшийся в 1967 году в г. Санта-Мария (Бразилия). В соответствии с приглашением Президиума ВМО в составе делегации в 1979 году посетила Венгерскую Народную Республику.

За достигнутые успехи И.Л. Клевенская награждена медалями: «За освоение целинных земель», «За трудовое отличие», «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина».

Активная жизненная позиция, организаторский талант, целеустремлённость и другие прекрасные качества Ии Леонидовны Клевенской долгие годы объединяли большой коллектив руководимой ею лаборатории (26 сотрудников) и притягивали к себе молодёжь. Отдавая дань научному наследию И.Л. Клевенской, выражаем огромную благодарность и уважение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толковый словарь по почвоведению. М.: Наука, 1975.
2. Клевенская И.Л. *Олигонитрофильные микроорганизмы почв Западной Сибири*. Новосибирск: Наука, 1974. 250 с.
3. Клевенская И.Л. *Влияние тяжёлых металлов (Cd, Zn, Pb) на биологическую активность почв и процесс азотфиксации* // Микробиоценозы почв при антропогенном воздействии. Новосибирск: Наука, 1985. С. 73–94.
4. Клевенская И.Л. *Эволюция сообществ diaзотрофов и их азотфиксирующей функции (на примере регенерационных экосистем)* // Биологическая фиксация азота. Новосибирск: Наука, 1991. С. 191–196.
5. Клевенская И.Л. *Эволюция микробиоценозов и их функций* // Экология и рекультивация техногенных ландшафтов. Новосибирск: Наука. 1992. С. 149–199.
6. Клевенская И.Л., Клёнов Б.М. *Рост и азотфиксация олигонитрофилов на гуминовых кислотах* // Микробиологические процессы в почвах Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1972. С. 3–22.
7. Клевенская И.Л., Родынюк И.С. *Клубеньковые образования травянистых растений Западной Сибири*. Новосибирск: Наука, 1977. 178 с.
8. Клевенская И.Л., Трофимов С.С., Таранов С.А., Кандрашин Е.Р. *Сукцессии и функционирование микробиоценозов в молодых почвах техногенных экосистем Кузбасса* // Микробиоценозы почв при техногенном воздействии. Новосибирск: Наука, 1985. С. 3–21.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в ИПА СО РАН по бюджетному финансированию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Поступила в редакцию 12.04.2021

Принята 27.04.2021

Опубликована 27.04.2021

Сведения об авторах:

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

THE 100TH ANNIVERSARY OF I. L. KLEVENSKAYA

© 2021 V. S. Artamonova 

Affiliation: 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 gives the main biographic information of the Doctor of Biological Sciences Iya Leonidovna Klevenskaya, who was the initiator and the head of the Laboratory of Soil Microbiology of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. She worked in academic science for 40 years, focusing her research on microbial physiology and ecology in soils of Siberia.

Key words: Klevenskaya I.L.; 100th anniversary; oligonitrophilic bacteria

How to cite: Artamonova V.S. The 100th anniversary of I.L. Klevenskaya // *The Journal of Soils and Environment*. 2020. 3(4). e134. doi: [10.31251/pos.v3i4.134](https://doi.org/10.31251/pos.v3i4.134) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. *Soil Science Thesaurus*. Moscow: Nauka Pubs., 1975. (in Russian)
2. Klevenskaya I.L. *Oligonitrophilic microorganisms in soils of West Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1974. 250 p. (in Russian)
3. Klevenskaya I.L. *Heavy metals (Cd, Zn, Pb) effect on soil biological activity and nitrogen fixation process // Soil microbiocenoses under anthropogenic impact*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985. P. 73–94. (in Russian)
4. Klevenskaya I.L. *Evolution of diazotroph communities and their nitrogen fixing function (in regenerating ecosystems) // Biological fixation of nitrogen*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1991. P. 191–196. (in Russian)
5. Klevenskaya I.L. *Evolution of microbiocenoses and their functions // Ecology and recultivation of technogenic landscapes*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1992. P. 149–199. (in Russian)
6. Klevenskaya I.L., Klenov B.M. *The growth and nitrogen fixation by oligonitrophiles growing on humic acids // Microbiological process in soils of West Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1972. P. 3–22. (in Russian)
7. Klevenskaya I.L., Rodynyuk I.S. *Nodule formations of herbaceous plants of West Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1977. 178 p. (in Russian)
8. Klevenskaya I.L., Trofymov S.S., Taranov S.A., Kandrashin E.R. *Successions and functioning of microbiocenoses in young soils of the technogenic ecosystems in Kuzbas // Soil microbiocenoses under anthropogenic impact*. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985. P. 3–21. (in Russian)

Received 12 April 2021

Accepted 27 April 2021

Published 27 April 2021

About the author:

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