

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2022

Оригинальные статьи

- Оценка запасов почвенного углерода лесных районов России с использованием баз данных почвенных характеристик
О. В. Честных, В. И. Грабовский, Д. Г. Замолодчиков 227
- Разложение опада хвои в почвах лесных культур сосны Восточной Финляндии
О. Н. Бахмет, М. В. Медведева 239
- Пространственная неоднородность химического состава лесных подстилок сосновых насаждений средней тайги Восточной Финляндии
Г. В. Ахметова 250
- Влияние климата на ферментативную активность лесных почв Северного Кавказа
Ю. С. Козунь, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников 262
- Микробиологическая индикация почв лесных посадок в Ширинской степи
И. Д. Гродницкая, В. А. Сенашова, Г. И. Антонов, Э. О. Пашкеева 270
- Пулы пирогенного углерода лесных почв Верхнего Приамурья
С. В. Брянин, А. В. Данилов, Е. С. Сулопарова, А. В. Иванов 285
- Крупные древесные остатки в муссонных тропических лесах Вьетнама
Е. А. Капица, А. Н. Кузнецов, С. П. Кузнецова, В. О. Лопес де Гереню, В. В. Каганов, И. Н. Курганова, Е. В. Кушневская, Е. В. Шорохова 297
- Методы создания лесных насаждений на высохшем дне Аральского моря
Н. Ж. Бакиров, Э. Б. Новицкий, А. Х. Хамзаев 312
- Влияние природно-климатических факторов на механическую устойчивость и аварийность деревьев березы повислой в г. Донецке
В. О. Корниенко, В. Н. Калаев 321

Хроника

- IX Всероссийская научная конференция с международным участием “Лесные почвы и изменение климата” (Россия, онлайн-заседания, 21–24 сентября 2021 г.) 335
-
-

CONTENTS

No. 3, 2022

Original Articles

- Estimate of the Soil Carbon Stock of Russia's Forested Regions Using the Soil Properties Databases
O. V. Chestnykh, V. I. Grabovskiy, and D. G. Zamolodchikov 227
- Pine Needles Litter Decomposition in Soils of the Eastern Fennoscandia's Pine Plantations
O. N. Bakhmet and M. V. Medvedeva 239
- Spatial Heterogeneity of the Forest Litter's Chemical Composition in Pine Stands of the Eastern Fennoscandia's Middle Taiga
G. V. Akhmetova 250
- Climate's Affect on the Northern Caucasian Forest Soils' Enzymatic Activity
Yu. S. Kozun', K. Sh. Kazeev, and S. I. Kolesnikov 262
- Soils' Microbiological Indication in Forest Plantations of the Shirinskaya Steppe
I. D. Grodnitskaya, V. A. Senashova, G. I. Antonov, and O. E. Pashkeeva 270
- Pyrogenic Carbon Pools of the Upper Amur Region
S. V. Bryanin, A. V. Danilov, Ye. S. Susloparova, and A. V. Ivanov 285
- Coarse Woody Debris in Monsoon Tropical Forests of Vietnam
Ye. A. Kapitsa, A. N. Kuznetsov, S. P. Kuznetsova, V. O. Lopes de Gerenyu, V. V. Kaganov, I. N. Kurganova, Ye. V. Kushnevskaya, and Ye. V. Shorohova 297
- Application of Various Forest Stands Creation Methods on the Dried-Up Bottom of the Aral Sea
N. Zh. Bakirov, Z. B. Novitskiy, and A. K. Khamzaev 312
- The Impact of Natural Climatic Factors on a Mechanical Stability and Accident Proneness of the Silver Birch Trees in Donetsk City Area
V. O. Korniyenko and V. N. Kalaev 321

News

- IX All-Russian Scientific Conference with international participation "Forest Soils and Climate Change". (Russia, online sessions, September 21–24, 2021) 335
-
-

УДК 630.182.5+574.47

ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ПОЧВЕННОГО УГЛЕРОДА ЛЕСНЫХ РАЙОНОВ РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗ ДАННЫХ ПОЧВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК¹

© 2022 г. О. В. Честных^{a, b, *}, В. И. Грабовский^a, Д. Г. Замолотчиков^{a, c}

^aЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, Москва, 117234 Россия

^bМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

^cВысшая школа экономики, Покровский бульвар, д. 11, Москва, 109028 Россия

*E-mail: ochestn@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.2021 г.

После доработки 24.11.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Актуальность и цели. Почва — один из ключевых пулов углерода наземных экосистем. По последним данным, пул почвенного углерода лесных экосистем может быть значительно недооценен. В связи с этим особую актуальность приобретает получение надежно интерполированных данных по углероду лесных почв на географические площадные контуры. В работе имеющиеся данные по запасам углерода почв агрегированы по лесным районам, официально утвержденным эколого-административным пространственным единицам. Лесные районы послужили топологической основой для экстраполяции выборочных данных на всю территорию соответствующего района и лесных земель в целом. Непосредственной задачей данной работы является интерполяция данных почвенных разрезов по слоям почвенной толщи по лесным районам. **Объекты и методы.** Основой для расчетов запасов углерода в почвах лесов и тундр России послужила база данных, которая объединяет информацию о почвенных разрезах из 300 литературных источников. Для определения пространственной дифференциации средних значений все присутствовавшие в базе разрезы распределены по лесным районам через их координаты. Установлены принадлежность каждого разреза к лесному району, а по описаниям разрезов — к биотопу. Всего отобрано 1405 почвенных разрезов, содержащих все необходимые для анализа данные: координаты, расчетные данные по содержанию углерода на различных почвенных уровнях, а также данные о биотопе, в котором проводился разрез. **Результаты.** Регрессионный анализ связи запасов почвенного углерода с биотопами и лесными районами подтвердил адекватность выделенной картографической основы для интерполяции, чем подтвердил обоснованность выбора топологической основы для интерполяции почвенных данных. Получены суммарные и средние запасы почвенного углерода для площади 1368×10^6 га лесных районов России. **Выводы.** Суммарно для России запасы C_{soil} в слоях 0–30 см, 0–50 см и 0–100 см оценены в 128.4×10^9 т С, 166.5×10^9 и 215.8×10^9 т С. Для слоя 0–100 см средние запасы — 162 ± 23 т С га⁻¹, оценки представлены средними значениями $\pm SE$ (стандартной ошибкой). Получены карты распределения запасов углерода для лесных районов России в отношении разных глубин разрезов.

Ключевые слова: земли лесного фонда России, лесообразующие породы, база данных, лесные почвы, запасы почвенного биологического углерода (C_{soil}).

DOI: 10.31857/S0024114822030056

Проблема глобального потепления климата стимулировала научный интерес к оценке запасов углерода для природных зон, стран, частей континентов. В арктических, бореальных и умеренных экосистемах значительная часть углерода содержится в органическом веществе почвы, по-

этому территориальные расчеты запасов почвенного углерода стали популярным направлением исследований. Известны оценки суммарного пула углерода, опубликованные в начале 1990-х годов (Vinson, Kolchugina, 1993; Орлов и др., 1996; Рожков и др., 1997; Stolbovoi, McCallum, 2002; Щепашенко и др., 2013). Представлены оценки запасов углерода почв для регионального (Титлянова и др., 2007; Пастухов, Каверин, 2013; Чернова и др., 2020), биомного (Честных и др., 1999; Честных, Замолотчиков, 2004; Честных и др.,

¹ Работа выполнена в рамках темы научного проекта государственного задания МГУ № 121032500094-5 “Построение концептуальных и математических моделей зональных типов наземных экосистем” (анализ базы данных) и при поддержке РНФ № 19-77-30015 (оценка запасов углерода).

2004a; Stolbovoi, 2006) и интразонального (Ефремова и др., 1997) уровней. В составе экосистемных оценок углеродных пулов почва рассматривается в работах (Алексеев, Бердси, 1994; Уткин и др., 2001; Shvidenko, Nilsson, 2003; Замолодчиков и др., 2005; Замолодчиков и др., 2011; Швиденко, 2014, Чернова и др., 2021).

Почва — один из ключевых пулов углерода наземных экосистем. В последнее время появились данные о том, что пул почвенного углерода лесных экосистем может быть значительно недооценен (Sothe et al., 2021). В связи с этим особую актуальность приобретает получение надежных данных по углероду лесных почв в пересчете на географические площадные контуры. Стандартный подход для интерполяции данных почвенных разрезов на площади состоит в выборе картографической основы, используемой для получения значений площадей тех или иных контуров, в пределах которых предполагается наличие закономерно однородных запасов углерода почвы. Контуры могут быть выбраны по картам типов почв (Орлов и др., 1996; Рожков и др., 1997), ландшафтов (Честных и др., 1999) и растительных ассоциаций (Vinson, Kolchugina, 1993), материалам учета лесного фонда (Уткин и др., 2001; Честных и др., 2004). Последнее время выбор топографической основы все больше и чаще останавливается на продуктах дистанционного зондирования (Пастухов, Каверин, 2013; Щепашенко и др., 2013).

В пределах выбранных контуров оцениваются средние значения запасов углерода почвы. Это может быть сделано либо с использованием баз данных, сформированных на основе анализа почвенных разрезов, либо с использованием типовых значений запасов углерода для разных категорий почв (Чернова и др., 2020). Одна из таких баз типовых почвенных профилей, приведенная в цифровом источнике (Stolbovoi, Mccallum, 2002). Эта база содержит 254 типовых профиля почвы и используется для расчетов эталонных значений запасов углерода для типов почвы (Stolbovoi, 2002, 2006). Эти же почвенные профили были использованы и для более поздней оценки запасов углерода почвы (Щепашенко и др., 2013). Тем не менее, даже наиболее современные по времени расчеты запасов углерода почв России основываются на ограниченном наборе почвенных профилей. В силу высокой вариабельности профиля почвы (Рыжова, Подвезенная, 2008, Чернова и др., 2020, 2021), ограниченное количество профилей потенциально приводит к высоким смещениям площадных оценок запасов углерода и других элементов в почвах.

В предлагаемой работе произведены оценки запасов углерода, представленные с учетом пространности в регионе местообитаний, в которых произведен каждый почвенный разрез. В

целом для всей территории России использовано 1405 средних типовых значений почвенных профилей, которые никак не пересекались при вычислении средних типовых значений содержания почвенного углерода. Такой подход позволяет получить уточненные оценки запасов углерода.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Имеющиеся данные по запасам углерода почв были агрегированы по лесным районам, официально утвержденным эколого-административным пространственным единицам (приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 18 августа 2014 г. № 367). Лесные районы послужили картографической основой для экстраполяции выборочных данных на всю территорию соответствующего района и лесных земель в целом. Такой подход облегчает использование данных по оценкам запасов почвенного углерода в оценках углеродного бюджета региональных экосистем.

Непосредственной задачей данной работы является экстраполяция данных почвенных разрезов по слоям почвенной толщи (0–30, 0–50, 0–100 см) по лесным районам.

Двумя авторами настоящей работы ранее по материалам открытых публикаций была создана база данных “Почвенные характеристики Северной Евразии” (Честных, Замолодчиков, 2004, 2018). База данных объединяет информацию около 1500 почвенных разрезов из 300 литературных источников. В ней более представлены почвенные разрезы, заложенные в лесах, добавлены описания разрезов для других категорий земель — тундр, лугов, степей, пастбищ, пашен, садов. В последней версии базы существенно изменена структура, для отсутствующих значений тех или иных параметров добавлены расчетно-экспертные оценки, что позволило включить ранее не использовавшуюся информацию в расчет. Для этого была разработана процедура расчета запасов вещества для профилей, в которых имелись пропуски среди горизонтов либо отсутствие стыковки глубин горизонтов. Эта процедура заполняет пропуск в равной пропорции величинами, приведенными в описании для вышележащего и нижележащего горизонтов. В представленной базе проводилась оценка запасов органического углерода в почвах России, к тому же методологически максимально совместимая с данными о запасах углерода в других пулах биогеоценозов. По каждому разрезу имеется подробная информация (около 40 параметров): географическое положение, строение почвенного профиля, физико-химические свойства почв, механический состав, валовый химический состав, содержание органики по всем выделенным горизонтам. По имеющейся в базе информации, связанной с объемным весом поч-

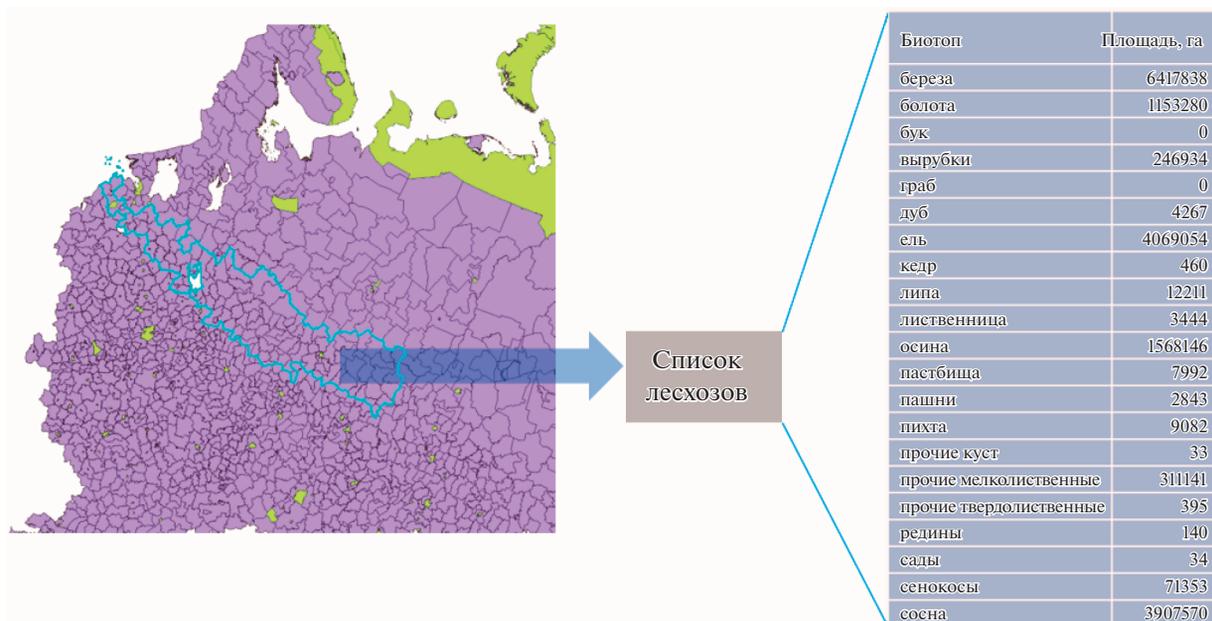


Рис. 1. Пример расчета площадей биотопов южно-таежного лесного района.

венных горизонтов, были оценены значения объемной массы для всех почвенных горизонтов, используя регрессионные уравнения, в которых учитывалась глубина залегания горизонта, процентное содержание в нем гумуса, группы типов почв, группы подстилающих пород, географическая подзона.

База служила основой для расчетов запасов углерода и азота в почвах лесов и тундр России (Честных, Замолодчиков, 2017). Расчеты типовых значений углерода почвы выполнены на основе этой базы. Всего отобрано 1405 почвенных разрезов, содержащих все необходимые для анализа данные: координаты, расчетные данные по содержанию углерода на различных почвенных уровнях (в слоях 0–30, 0–50 и 0–100 см), а также данные о биотопе, в котором проводился разрез.

Вторым источником информации является база данных Государственного учета лесного фонда (ГУЛФ) от 2008 г. Это последняя база с представительством отдельных лесхозов. В ЦЭПЛ РАН в 2000-е годы в рамках проектов Минприроды РФ и Рослесхоза создавались ГИС-слои лесхозов и лесных районов для статистического и пространственного анализа данных ГУЛФ. По ГУЛФ 2008 рассчитаны доли площадей лесных земель разных категорий как для покрытых лесной растительностью земель, так и для не покрытых лесной растительностью лесных и нелесных земель (вырубки, редины, луга, пашни и т.д.). Методом “Пространственного соединения” из инструментария ArcGIS получены списки лесхозов, составляющих лесные районы. По этим спискам и долям площадей

составлены доли земель различных категорий для лесных районов.

Категориям земель из ГУЛФ (для краткости будем называть их “биотопы”) были сопоставлены описания местообитаний проведения почвенных разрезов. Всего таких биотопов 22. В качестве источника картографических материалов были использованы шейп-файлы лесных районов и лесхозов для территории России. Всего эта территория представлена 31 лесным районом и 1975 лесхозами. Средствами ArcGis получены суммарные площади интересующих нас биотопов в каждом лесном районе (рис. 1).

По имеющимся координатам каждому почвенному разрезу был присвоен код лесного района, в котором находится разрез. Таким образом, исходная база для расчетов включала поля кода лесного района, биотоп и собственно 3 поля с данными о содержании углерода в разных слоях почвы. На основе этих данных были рассчитаны средние удельные показатели содержания углерода в почве для каждого лесного района и для каждого биотопа, а также рассчитаны их статистические ошибки.

Для оценки связи между удельными запасами почвенного углерода с биотопами и лесными районами был проведен регрессионный анализ. Оценена система с зависимой переменной удельного содержания углерода в почве и независимых переменных — двух взаимодействующих факторов: лесных районов и биотопов. То есть, была построена двухфакторная линейная регрессионная модель с факторными переменными. Расчеты

были произведены при помощи базовой функции линейной модели $lm()$ в R.

На следующем этапе полученные удельные средние значения содержания углерода в почвах были умножены на площади соответствующих биотопов в соответствующих лесных районах, и, таким образом, получены суммарные показатели содержания углерода в почвах учтенных биотопов соответствующих лесных районов. Для того, чтобы получить оценки по всей площади лесных районов (ЛР), был рассчитан коэффициент пересчета на всю площадь ЛР. Получен он следующим образом. Площади биотопов по каждому лесному району рассчитаны как суммы площадей соответствующих биотопов по лесным районам (см. рис. 1). Полученные площади биотопов лесных районов сопоставили с общей площадью лесных районов, рассчитанной из шейп-файлов. Отношение этих величин (площади по суммам площадей биотопов и общей площади ЛР) дало нам искомый коэффициент. Иными словами, этот коэффициент позволяет компенсировать недостающую из сумм биотопов площадь лесного района. Этот недостаток обусловлен, во-первых, существованием земель, не относящихся к землям лесного фонда и, во-вторых, биотопов, в которых не проводились исследования почв. Результатом применения коэффициента пересчета является таблица суммарного содержания углерода в лесных районах РФ. Расчеты проводились в среде R и ArcGis 10.4.

Настоящая работа базируется на результатах обработки базы данных лишь в отношении одного из почвенных элементов, а именно, углерода. Для пересчета запасов гумуса в углерод использован единый коэффициент 0.57 (Кобак, 1988). Оценка запаса по профилю включает как углерод органического вещества почвы в верхних горизонтах, которые могут быть отнесены к подстилке, так и в заторфованных горизонтах подзолисто-болотных почв. Таким образом, суммарная оценка для профиля включает запасы органического углерода подстилки, органогенных и минеральных горизонтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, произведем оценку адекватности предложенной картографической основы для интерполяции данных почвенных разрезов. Для этого оценим величину связи между удельным содержанием органического углерода в почвах и предложенной картографической основой. Сделаем это посредством регрессионного анализа связи в модели вида:

$$C_{\text{soil}} = a + bF + cB + dFB, \quad (1)$$

где C_{soil} — удельное содержание углерода в почве, F и B — факторные переменные с 31 и 22 уровнями

(лесные районы и биотопы соответственно), a — свободный член, a, b, c, d — коэффициенты уравнения.

Результаты применения линейной модели $lm()$ показали наличие достоверной на уровне $P < 0.05$ и выше связи C_{soil} с 7 уровнями фактора F (лесными районами), 10 уровнями фактора B (биотопами) и с 25-ю их сочетаниями. Скорректированная величина $R^2 = 0.41$ может быть достаточным обоснованием адекватности выбора картографической основы. Очевидно, что в силу инертности почв как углеродного пула и динамичности смен биотопов (лесные биотопы, например, превращаются в вырубку или гарь за один сезон) трудно ожидать особо сильную связь между параметрами.

В табл. 1 представлено распределение суммарных и типовых средних значений почвенного углерода для лесных районов Европейско-Уральской части России. Рассматривая выборки средних в целом по лесным районам вне их биотопической привязки, можно отметить, что наибольшее количество данных в районе степей — 124, хвойно-широколиственных лесов — 119 и Северо-Кавказском районе — 117, при этом относительные ошибки средних резко уменьшаются, т.к. увеличивается число разрезов на каждую полосу. Разброс относительных ошибок средних для всех районов — 5–30%.

Максимальные средние значения наблюдаются в притундровом и Северо-таежном районах, а также в Северо-Уральском районе. Минимальные — в хвойно-широколиственном районе, где небольшая представленность нелесных земель. Наиболее высокие средние значения 466 т С га^{-1} свойственны почвам Северо-Уральского и северо-таежного — 271 т С га^{-1} районов, где в расчеты попадают заболоченные земли. Минимальные средние значения в 64 т С га^{-1} рассчитаны для хвойно-широколиственного района и в 80 т С га^{-1} — для района степей, что, возможно, объясняется либо засушливыми территориями, либо тем, что большая часть биома степей распахана, и, таким образом, участки с большим средним значением попадают в категорию “пашни”. Для региона пустынь данные не приведены вовсе, т.к. они не присутствуют в базе. Интерес представляют данные по Северо-Кавказскому району, где при общей небольшой площади в 2.23 млн га, т.е. одному из самых маленьких выделов, средние значения достигают значительных величин 112 т С га^{-1} и дают суммарные запасы в $250 \times 10^6 \text{ т С}$, что объясняется наличием большого количества пашен в этом регионе. Оценены запасы углерода в почвах тундровой зоны, для глубины 0–30 см — $26 \times 10^6 \text{ т С}$, для 0–50 см — $33 \times 10^6 \text{ т С}$, для 0–100 см — $41 \times 10^6 \text{ т С}$.

Суммарные запасы углерода в почвах лесных районов Европейско-Уральской части составили

Таблица 1. Запасы углерода в почвенных слоях лесных районов для Европейско-Уральской части России

Район	Площадь 10 ⁶ га	Слой, см						Число разрезов
		0–30 см		0–50 см		0–100 см		
		10 ⁶ т С	т С га ⁻¹	10 ⁶ т С	т С га ⁻¹	10 ⁶ т С	т С га ⁻¹	
Тундры	0.2	26	105 ± 75	33	134 ± 111	41	167 ± 156	60
Район притундровых лесов и редкостойной тайги	23	3474	149 ± 42	5286	226 ± 73	6122	262 ± 87	53
Северо-таежный район	35	4940	141 ± 57	7204	205 ± 88	9526	271 ± 123	57
Средне-таежный район	32	2920	92 ± 29	3629	114 ± 32	4934	155 ± 43	37
Южно-таежный район	18	2090	118 ± 101	2334	131 ± 112	2568	144 ± 120	34
Район хвойно-широколиственных лесов	23	1020	44 ± 29	1177	51 ± 31	1480	64 ± 34	119
Лесостепной район	5	272	55 ± 36	358	72 ± 49	470	94 ± 59	26
Район степей	3	96	38 ± 13	134	53 ± 18	200	80 ± 27	124
Северо-кавказский горный район	2	135	61 ± 28	179	80 ± 36	250	112 ± 45	117
Северо-уральский район	12	2544	204 ± 31	4120	331 ± 39	5812	466 ± 49	17
Средне-уральский район	20	1243	63 ± 21	1511	77 ± 26	1967	100 ± 33	20
Южно-уральский район	8	542	69 ± 3	640	82 ± 8	801	102 ± 16	11
Всего	181	19303	95 ± 39	26603	130 ± 52	34170	168 ± 66	675

Примечание. Оценки в т С га⁻¹ представлены средневзвешенными оценками ± SE (стандартной ошибкой).

для глубины 0–30 см 19303×10^6 т С, для 0–50 – 26603×10^6 т С, для 0–100 см – 34170×10^6 т С. Общая площадь земель лесного фонда в европейской части России для этих лесных районов оценена в 181.13×10^6 га.

В табл. 2 представлено распределение суммарных и типовых средних значений почвенного углерода в слоях почвы 0–100, 0–50, 0–30 см для лесных районов Западной и Восточной Сибири. Максимальный запас углерода приходится на два основных района – Алтае-Саянский горно-таежный район и Восточно-Сибирский таежный мерзлотный район, занимающие максимальные площади 129 и 193×10^6 га соответственно. При этом Западно-Сибирский равнинный таежный и Восточно-Сибирский район притундровых лесов представлены максимальным количеством разрезов, что можно объяснить большей доступностью территории. Рассматривая региональные оценки запасов углерода, необходимо отметить, что в Западной Сибири задействовано 238 разрезов при площади 327×10^6 га, в Восточной – 273 разрезов, общая площадь 528×10^6 га.

В целом средние величины запасов почвенного углерода по Западной Сибири чуть больше таковых для Восточной, особенно там, где сосредоточены основные массивы болот. Средние и по болотам, и по гарям, и по сосновым насаждениям в первом случае больше. Но при итоговых расчетах эти превышения нивелируются именно рас-

пределением площадей, т.к. Восточная Сибирь представлена гораздо большими территориями.

При территории всей Сибири в 856 млн га общий запас почвенного углерода в слое 0–100 см в Западной Сибири оценивается нами в 56226×10^6 т С углерода. При этом гораздо большая часть, 72904×10^6 т С, располагается в Восточной Сибири.

Нелесные земли в структуре земель лесного фонда в Сибири могут выступать главным аккумулятором биологического углерода во всем биогеоценозе бореальных лесов. При этом C_{soil} болот и определяет приоритеты отдельных регионов в общих запасах углерода лесного фонда, а не только его нелесных земель.

Суммарные запасы углерода в почвах лесных районов Сибири составили для глубины 0–30 см – 82069×10^6 т С, для 0–50 см – 101405×10^6 т С, для 0–100 см – 129130×10^6 т С. Общая площадь земель лесного фонда для лесных районов Сибири оценена в 855×10^6 га.

В табл. 3 представлено распределение суммарных и типовых средних значений почвенного углерода в слоях почвы для лесных районов Дальнего Востока. Наиболее представительны два лесных района – Камчатский и Дальневосточный таежный, т.к. первый из них представлен максимальным количеством разрезов, 91 при достаточно большой площади 131×10^6 га, второй представлен 37 разрезами, общая площадь района небольшая,

Таблица 2. Запасы углерода в почвенных слоях лесных районов для Западной и Восточной Сибири России

Лесной район	Площадь 10 ⁶ га	Слой, см						
		0–30		0–50		0–100		
		10 ⁶ т С	т С га ⁻¹	10 ⁶ т С	т С га ⁻¹	10 ⁶ т С	т С га ⁻¹	
Западная Сибирь								
Западно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги	15	1040	67 ± 7	1108	72 ± 13	1256	81 ± 16	10
Западно-Сибирский равнинный таежный район	49	6726	138 ± 8	7444	153 ± 9	8658	178 ± 9	97
Западно-Сибирский подтаежно-лесостепной район	92	7926	86 ± 5	9623	104 ± 7	11679	127 ± 8	64
Алтае-Саянский горно-таежный район	129	15358	119 ± 10	20102	156 ± 13	26685	207 ± 16	59
Алтае-Саянский горнолесостепной район	42	5700	135 ± 30	6770	160 ± 34	7948	188 ± 34	8
Всего по Западной Сибири	327	36750	112 ± 5	45047	137 ± 6	56226	172 ± 6	238
Восточная Сибирь								
Среднесибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги	70	6222	89 ± 25	8253	118 ± 29	10368	149 ± 29	20
Среднесибирский плоскогорный таежный район	66	11666	176 ± 60	13423	203 ± 57	15697	237 ± 65	10
Приангарский район	114	8988	79 ± 29	11384	100 ± 31	15233	134 ± 33	14
Среднесибирский подтаежно-лесостепной район	46	3980	86 ± 59	4981	108 ± 72	6177	134 ± 81	62
Восточно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги	24	1463	62 ± 31	2077	88 ± 42	2933	124 ± 55	94
Восточно-Сибирский таежный мерзлотный район	193	12322	64 ± 46	15489	80 ± 51	21595	112 ± 59	44
Байкальский горный лесной район	15	678	46 ± 27	751	50 ± 27	901	61 ± 25	29
Всего по Восточной Сибири	528	45319	86 ± 3	56358	107 ± 4	72904	138 ± 4	273
Всего по Сибири	855	82069	96 ± 3	101405	119 ± 3	129130	151 ± 4	511

Примечание. Оценки в т С га⁻¹ представлены средневзвешенными оценками ±SE (стандартной ошибкой).

24 × 10⁶ га, но по общим запаса почвенного органического углерода это максимальные значения.

Высокие средние значения запаса почвенного углерода в Камчатском и Дальневосточном таежном районах обязаны, главным образом, дальневосточным каменноберезнякам, связанным с глубокогумусными луговыми почвами. В региональном отношении менее контрастны показатели для мягколиственных насаждений. Очень высокие средние запасы для категории “прочие кустарники” связаны с преобладанием в ней по площади зарослей кедрового стланика и притундровых кустарников. Также можно отметить сенокосы, которые характеризуются богатыми луговыми почвами.

Наибольшие средние запасы свойственны Дальневосточному таежному району, наименьшие – лесостепным Забайкальскому и Дальневосточному районам. Переходные значения сред-

них – в Камчатском районе и Дальневосточном районе притундровых лесов и редкостойной тайги. При общей площади земель лесного фонда ~1110 × 10⁶ га распределение между категориями покрытых лесом, не покрытых лесом и нелесных земель равно соответственно 65, 9 и 26%. В пределах отдельных регионов это соотношение существенно меняется. На Дальнем Востоке увеличение доли площади в лесном фонде не покрытых лесом земель обусловлено значительным распространением гарей и вырубок.

Получены карты распределения запасов углерода для Дальнего Востока России в отношении разных глубин разрезов. Эти данные, очевидно, отражают распределение площадей по лесным районам, в самом большом по площади Камчатском районе (131 × 10⁶ га) наблюдаются и самые высокие запасы C_{soil} – 27710 × 10⁶ т С. Как уже мы отмечали выше, в этом районе средние запасы по

Таблица 3. Запасы углерода в почвенных слоях лесных районов для Дальнего Востока России

Лесной район	Площадь, 10 ⁶ га	Слой, см						Число разрезов
		0–30		0–50		0–100		
		10 ⁶ т С	т С га ⁻¹	10 ⁶ т С	т С га ⁻¹	10 ⁶ т С	т С га ⁻¹	
Забайкальский горномерзлотный район	24	1880	79 ± 53	2179	92 ± 59	2622	110 ± 68	25
Забайкальский лесостепной район	36	1823	51 ± 0	2552	71 ± 0	3225	89 ± 0	1
Дальневосточный район притундровых лесов и редкостойной тайги	13	1156	92 ± 56	1516	120 ± 71	2042	162 ± 91	41
Камчатский район	131	12212	93 ± 49	19258	147 ± 74	27710	211 ± 98	91
Дальневосточный таежный район	24	2899	123 ± 66	3689	157 ± 80	4823	205 ± 83	37
Приамурско-Приморский хвойно-широколиственный район	87	5330	61 ± 12	7299	84 ± 20	9806	112 ± 36	11
Дальневосточный лесостепной район	16	1727	106 ± 8	2023	124 ± 8	2315	142 ± 9	13
Всего по Дальнему Востоку	331	27027	82 ± 21	38516	116 ± 31	52543	159 ± 41	219

Примечание. Оценки в т С га⁻¹ представлены средневзвешенными оценками ± SE (стандартной ошибкой).

биотопам также превышают все остальные выделы. Далее по запасам лидируют Приамурско-Приморский хвойно-широколиственный и Дальневосточный таежный районы, суммарные запасы соответственно 9806 и 4823 × 10⁶ т С.

Суммарные запасы углерода в почвах лесных районов Дальнего Востока составили для глубины 0–30 см – 27027 × 10⁶ т С, для 0–50 см – 38516 × 10⁶ т С, для 0–100 см – 52543 × 10⁶ т С. Общая площадь земель лесного фонда для этих лесных районов оценена в 331 × 10⁶ га.

В табл. 4 представлены все полученные региональные оценки и рассчитаны средние итоговые запасы почвенного углерода в разных почвенных слоях. Из четырех регионов – Европейско-Уральская часть, Западная и Восточная Сибирь, Дальний Восток – наибольшую площадь занимает Восточная Сибирь, и, несмотря на самые низкие значения средних запасов, именно ей свойственны самые большие запасы почвенного углерода. А самые меньшие – приходятся на Европейско-Уральский регион. Однако рассчитанные оценки средних значений существенно изменяют картину. Как уже отмечалось выше, самые большие значения средних типовых запасов отмечены именно для Западной Сибири с ее заторфованными территориями, на второе место в этом рейтинге выходит Европейско-Уральская часть с большим включением тундровых территорий, затем идет Дальний Восток с гумусированными луговыми почвами, а

вот средние типовые значения почв Восточной Сибири оказываются самыми меньшими, на что, по-видимому, влияет и рельеф региона, и его криогенность.

При сравнении удельных значений можно отметить следующие моменты в региональном аспекте. А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко оценивают средние значения запасов для Европейской и Азиатской частей страны, и в сравнении с нашими данными они варьируют по-разному. Для Европейской части они приводят данные в 163 т С га⁻¹, что почти совпадает с нашими оценками 168 т С га⁻¹, для Азиатской части расхождения более существенные – они приводят оценки 180 т С га⁻¹ против наших 155 т С га⁻¹. В целом по России ими получены средние запасы в метровом слое в 176 т С га⁻¹, наша же величина меньше – 162 т С га⁻¹. Как нам кажется, именно бóльшая площадь горных районов в криолитозоне Сибири с их меньшими удельными запасами и обеспечивают снижение этой величины, что и отражается в наших расчетах. А более пологий рельеф, меньшая площадь мерзлотных почв, приуроченных к северным тундровым территориям в Европейской части, дает меньшие расхождения в оценках.

Интерес представляют полученные средние значения запасов для представленных региональных территорий, которые позволяют перейти от гетерогенности лесных районов к более крупным

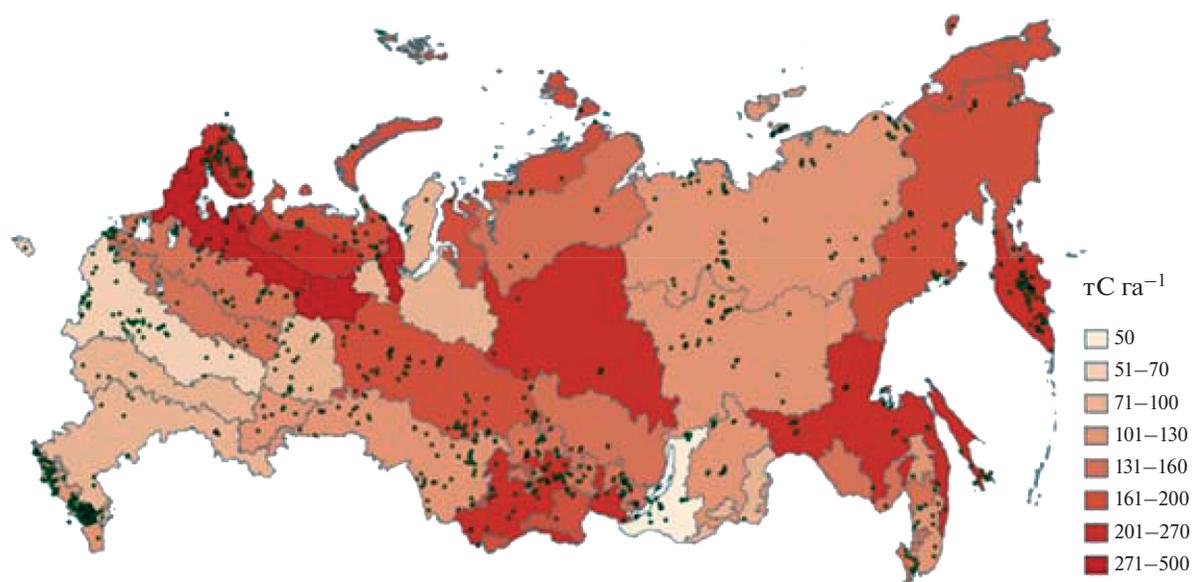


Рис. 2. Средние запасы углерода ($t C ha^{-1}$) в слое почвы 0–100 см на землях лесного фонда Российской Федерации (точки – места почвенных разрезов).

оценкам, что будет полезно при составлении бюджета углерода в целом для России.

Получены суммарные и средние запасы почвенного углерода для площади 1367×10^6 га лесных районов России. Суммарные запасы углерода в почвах лесных районов России составили для глубины 0–30 см – 128.4×10^9 т С, для 0–50 см – 166.5×10^9 т С, для 0–100 см – 215.8×10^9 т С.

На рис. 2 приведена карта распределения средних удельных запасов почвенного углерода в слое 0–100 см по лесным районам России.

Сравнение с нашими более ранними данными, представляемыми в виде 12 квадратов (три полосы – северная, средняя и южная, и 4 региона – Европейско-Уральская часть, Западная Сибирь, Восточ-

ная Сибирь и Дальний Восток), вызывает некоторые трудности, прежде всего – из-за расхождений в площадях, т. к. в суммарную площадь лесных районов сейчас нами включены и северные лесные районы притундровых редколесий, а часть среднесибирского таежного района в прежних расчетах частично включалась в Дальний Восток, отчего суммарные площади существенно расходятся.

Однако если считать запас почвенного углерода в целом по России, то наблюдается хорошая сходимость результатов, особенно для слоев 0–30 и 0–50 см. Общая площадь новых расчетов составила 1367 млн га против 1110 млн га прежних расчетов, что связано с включением в расчет и тундровых территорий. Для слоя 0–30 см совпадение

Таблица 4. Запасы углерода в почвенных слоях лесных районов России

Район	Площадь, 10^6 га	Слой, см						Число разрезов
		0–30		0–50		0–100		
		10^6 т С	$t C ha^{-1}$	10^6 т С	$t C ha^{-1}$	10^6 т С	$t C ha^{-1}$	
Европейско-Уральская часть	181	19303 ± 7495	95 ± 39	26603 ± 9954	130 ± 52	34170 ± 12505	168 ± 66	675
Западная Сибирь	327	36750 ± 1584	112 ± 5	45047 ± 1841	137 ± 6	56225 ± 2116	172 ± 6	238
Восточная Сибирь	528	45319 ± 1605	86 ± 3	56358 ± 1869	107 ± 4	72905 ± 2175	138 ± 4	273
Дальний Восток	331	27027 ± 1245	82 ± 4	38516 ± 1662	116 ± 5	52543 ± 2148	159 ± 6	219
Всего	1367	128399 ± 19660	94 ± 14	166524 ± 24517	124 ± 18	215843 ± 31057	162 ± 23	1405

Примечание. Оценки представлены средними значениями $\pm SE$ (стандартной ошибкой).

почти полное, 128 Гт С против старых оценок в 127 Гт С, для слоя 0–50 см – 167 против 174, и для слоя 0–100 см – 216 против старых 241 Гт С.

Очевидно, что причина различий – результат взвешивания почвенных данных по представленности биотопов в соответствующих лесных районах, тогда как в работе, с результатами которой ведется сравнение, вычислялись лишь простые средние данных почвенных разрезов по географическим полосам.

При сравнении средних запасов некоторых биотопов Сибирского региона по глубине 0–50 см с данными, которые относятся к почвам лесных экосистем Енисейского меридиана (Ваганов и др., 2005), можно отметить, что в среднем данные группы сибирских исследователей и наши данные близки по величине. Так, для лесотундры приводятся данные 103 т га^{-1} , наши – для редин в Восточно-Сибирский и Западно-Сибирский районах притундровых лесов и редкостойной тайги – 100 и 67 т га^{-1} соответственно. Для северной тайги – 118 т га^{-1} , против наших данных в Восточно-Сибирском таежном мерзлотном районе 120 т га^{-1} . Для средней тайги авторы приводят данные по Енисейскому бассейну 107 т га^{-1} , наши данные для таежных лесов Западно-Сибирского равнинного таежного района – 108 т га^{-1} , Среднесибирского плоскогорного таежного района – 89 т га^{-1} . В южной тайге, в районе Енисейского меридиана, приведены данные в 134 т га^{-1} , для наших лесных районов в преобладающих биотопах Западно-Сибирского и Среднесибирского подтаежно-лесостепного районов – 143 и 144 т га^{-1} соответственно. Всего по Сибири в цитируемой работе среднее приведено 114 т га^{-1} в слое 0–50 см, у нас эта расчетная величина равна по Сибирскому региону в целом 119 т га^{-1} . Таким образом, наблюдается вполне хорошее совпадение величин, особенно для агрегированных территорий.

В работе Черновой и др. (2021) оценены общие запасы углерода в толще 0–30 см для всей территории страны в 101 Гт С. Нам это кажется заниженной оценкой, т. к. только для территории лесных районов, что составляет 80% от всей территории страны, запас углерода в этом слое оценен нами в 128.4 Гт С. В предыдущей работе автора, Черновой и др. (2020), отмечено, что для разных ландшафтов недооценка запасов органического углерода почв варьирует от 10 до 40%. В этой же работе приводятся данные по полугидроморфным почвам Карелии, запасы углерода в них в среднем составляют $73 \pm 8.2 \text{ т га}^{-1}$, что в 7 раз выше, чем в автоморфных почвах. Наши данные этого региона равны $92 \pm 29 \text{ т га}^{-1}$. Авторы подчеркивают, что пренебрежение вкладом полугидроморфных почв в общий запас органического

углерода почв региона приводит к заниженным оценкам.

В работе Щепашенко и др. (2013) оценены запасы органического углерода в почвах России. Согласно полученным авторами оценкам, общие запасы органического углерода в однометровом слое почвы на территории Российской Федерации составляют 317.1 Пг (или в среднем для территории страны – 19.2 кг С/м^2). Можно сказать, что в целом по России они оценивают углерод в 317 Гт С против наших 216 Гт С, а средние запасы в 192 т С га^{-1} против наших – $162 \pm 23 \text{ т С га}^{-1}$. Различия могут быть связаны с размером территории, но в работе не приводятся данные, на какую площадь были проведены расчеты.

В работе Швиденко, Щепашенко (2014) приводятся запасы органического углерода почв лесных экосистем в региональном и суммарном разрезе, т.е. для Европейской и Азиатской части страны и в целом для всей России. Расчеты приведены для метрового слоя. Можно видеть, что суммарные значения наших расчетов, наоборот, несколько выше – по Европейской части наши – 34 Гт С против 27 Гт С, для Азиатской части – наши 182 против 117 Гт С, и в целом для России – наши 216 против 145 Гт С. Объяснение расхождений можно найти в площадных оценках, т. к. если для Европейской части России площади существенно не расходятся – 168 млн га у авторов против наших 181 млн. га, то оценки для Азиатской части расходятся значительно – авторы приводят цифры в 653 млн га, тогда как только Сибирский регион у нас оценивается в 855 млн га, а еще и площадь региона Дальнего Востока у нас оценена в 331 млн га. Возможно, что авторы считают только покрытые лесом территории, а земли, не покрытые лесом и нелесные, которые также относятся к лесному фонду, в расчет не входят. И в целом по России авторы приводят суммарную цифру в 821 млн га, наша оценка для 1367 млн га, что и объясняет столь существенное расхождение суммарных запасов органического углерода почв.

В материалах Глобального симпозиума по органическому углероду почвы (FAO, 2017) мировые запасы углерода почв оценены в 1417 Гт С, таким образом, наши расчеты для лесных почв России показывают, что эта величина составляет **не менее 15% от мировых запасов** почвенного углерода.

Отметим, что близкое соответствие полученных нами данных и результатов оценок запасов углерода почв, полученных другими авторами, может быть лишь для регионов с невысоким биотопическим разнообразием. В этом случае взвешенные по площадям биотопов оценки не должны слишком расходиться с невзвешенными оценками. В прочих случаях можно ожидать наличие существенных различий в оценках запасов углерода почв, полученных разными методами интерполя-

ции данных. Очевидно, что сбор новых почвенных данных и получение репрезентативных по разнообразию категорий земель (биотопов) выборочек должен сократить разрыв оценок, полученных разными методами интерполяции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый подход интерполяции почвенных данных на площадь, в котором в качестве пространственных субъектов выступают такие экологически обособленные сущности, как лесные районы. Суть подхода заключается в процессе взвешивания почвенных данных по площадям биотопов, составляющих лесные районы при получении средних по лесным районам оценок. Такой подход основан на статистически обоснованном допущении о связи лесных районов и биотопов, а также взаимодействии этих факторов с содержанием углерода почв.

Оценки углерода почв, полученных предложенным подходом, могут служить основой для экосистемных исследований бюджета углерода в пределах эколого-административного деления РФ на лесные районы.

Побочным продуктом проделанной работы оказалось выявление мест (сочетаний лесных районов и биотопов), в которых необходимо проведение почвенных исследований. Это белые пятна в базе почвенных данных, заполнение которых существенно увеличит точность региональных (и глобальных) оценок содержания углерода почв России. Отметим, что предложенная работа в отличие от оценок предшественников (Щепашенко и др., 2013) основана на максимальном объеме имеющихся на данный момент эмпирических данных (собственно, почвенных срезов) и минимуме допущений. Появление новых почвенных данных позволит вносить коррективы оценок и производить все более точные интерполяции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.А., Бердси Р.А.* Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева, 1994. 173 с.
- Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В. и др.* Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода. // Сибирский экологический журн. 2005. Т. 12. № 4. С. 631–649.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Мелентьева Н.В.* Запасы и содержание соединений углерода в болотных экосистемах России // Почвоведение. 1997. № 12. С. 1470–1477.
- Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Краев Г.Н.* Динамика бюджета углерода лесов России за два последних десятилетия // Лесоведение. 2011. № 6. С. 16–28.
- Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Уткин А.И. и др.* Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 200 с.
- Кобак К.И.* Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 248 с.
- Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 254 с.
- Пастухов А.В., Каверин Д.А.* Запасы почвенного углерода в тундровых и таежных экосистемах Северо-Восточной Европы // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1084–1094.
- Рожков В.А., Вагнер В.В., Козут Б.М. и др.* Запасы органических и минеральных форм углерода в почвах России // Углерод в биогеоценозах: Чтения памяти акад. В.Н. Сукачева, XV. М.: Наука, 1997. С. 5–58.
- Рыжова И.М., Подвезенная М.А.* Пространственная вариативность запасов органического углерода в почвах лесных и степных биогеоценозов // Почвоведение. 2008. № 12. С. 1429–1437.
- Титлянова А.А., Кудряшова С.Я., Косых Н.П., Шибарева С.В.* Базы данных “Органический углерод” и “Запасы растительного вещества в экосистемах Сибири” как средство оценки углеродного баланса, его моделирования и прогнозирования на геоинформационной основе // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. Спецвыпуск № 2. С. 131–139.
- Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Коровин Г.Н., Зукерт Н.В.* Леса России как резервуар органического углерода биосферы // Лесоведение. 2001. № 5. С. 8–23.
- Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепашенко Д.Г.* Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. № 3. С. 273–286.
- Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А.* Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350.
- Честных О.В., Замолодчиков Д.Г.* Зависимость плотности почвенных горизонтов от глубины их залегания и содержания гумуса // Почвоведение. 2004. № 8. С. 937–944.
- Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В.* Запасы органического углерода в почвах тундровых и лесотундровых экосистем // Экология. 1999. № 6. С. 426–432.
- Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И.* Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.
- Честных О.В., Замолодчиков Д.Г.* Запасы органического углерода в почвах лесов России // Природные и антропогенные экосистемы: проблемы и решения. М.: БИБЛИО-ГЛОБУС, 2017. С. 19–60. ISBN 978-5-6040237-3-0
- Честных О.В., Замолодчиков Д.Г.* БД “Почвенные характеристики Северной Евразии”. Свидетельство о гос. регистрации БД в Федеральной службе интеллектуальной собственности № 2018621164 от 17.05.2018 г.
- Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф.* Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132.

Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журн. 2014. № 1. С. 69–92.

Proceedings of the Global Symposium on Soil Organic Carbon 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Rome, Italy. 534 p.

Shvidenko A., Nilsson S. A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998 // Tellus. 2003. V. 55. № 2. P. 391–415.

Sothe C., Gonsamo A., Arabian J., Kurz W.A., Finkelstein S.A., Snider J. Large soil carbon storage in terrestrial ecosys-

tems of Canada. *Earth and Space Science Open Archive ESSOAr* (2021).

Stolbovoi V. Carbon in Russian Soils // *Climatic Change*. 2002. V. 55. № 1–2. P. 131–156.

Stolbovoi V. Soil carbon in the forests of Russia // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2006. № 11. P. 203–222.

Stolbovoi V., McCallum I. Land Resources of Russia (CD-ROM). IIASA & RAS. Laxenburg, Austria, 2002.

Vinson T.S., Kolchugina T.P. Pools and fluxes of biogenic carbon in the Former Soviet Union // *Water, Air, and Soil Pollution*. 1993. № 70. P. 223–237.

Estimate of the Soil Carbon Stock of Russia's Forested Regions Using the Soil Properties Databases

O. V. Chestnykh^{1, 2, *}, V. I. Grabovskiy¹, and D. G. Zamolodchikov^{1, 3}

¹Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Profsoyuznaya st., 84/32 bldg. 14, Moscow, 117234 Russia

²Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

³Higher School of Economics, Pokrovskiy blvd., 11, Moscow, 109028 Russia

*E-mail: ochestn@mail.ru

Study relevance and objectives. Soil is one of the key pools of carbon in terrestrial ecosystems. According to recent data, the soil carbon pool of forest ecosystems may be significantly underestimated. In this regard, obtaining data on the forest soils carbon reliably interpolated on geographic areal contours is of particular interest. In this paper, the available data on soil carbon stocks are aggregated by forest regions – officially approved ecological-administrative spatial units. Forest regions served as a topological basis for the sample data extrapolation to the entire territory of the corresponding region and forest lands in general. The immediate task of this work is the interpolation of data from soil profiles by layers of the soil stratum in forest regions. **Study objects and methods.** The basis for calculating the carbon stocks in the forest and tundra soils of Russia was a database that combines information on soil sections gathered from 300 literary sources. To determine the spatial differentiation of the average values, all the sections present in the database were distributed among different forest regions according to their coordinates. For each section, a forest region was determined, and based on the description of a section, a biotope. A total of 1405 soil sections were selected containing all the data necessary for analysis: coordinates, calculated data on the carbon content at various soil levels, and data on the biotope in which the section was made. **Study results.** The regression analysis of the correlation between soils' carbon stocks and biotopes, as well as the forest regions confirmed the adequacy of the selected cartographic basis for interpolation, which confirmed the validity of the choice of the topological basis for soil data interpolation. The total and average reserves of soil carbon were obtained for an area of 1368×10^6 ha of forest regions of Russia. **Conclusions.** The total C_{soil} stock for the territory of Russia within the layers 0–30 cm, 0–50 cm, and 0–100 cm is estimated at 128.4×10^9 t C, 166.5×10^9 and 215.8×10^9 t C. For the layer 0–100 cm, the average reserves are 162 ± 23 t C ha⁻¹, with estimates being mean values \pm SE (standard error). Maps of the carbon stocks distribution for the forest regions of Russia have been obtained in relation to different depths of the sections.

Keywords: Russia's forest resources, forest forming species, database, forest soils, stock of soil biological carbon (C_{soil}).

Acknowledgements: The study has been carried out within the framework of the State contract with the Moscow State University № 121032500094-5 “Creating conceptual and mathematical models of the terrestrial ecosystems' zonal types” (database analysis) and with the support from RSF № 19-77-30015 (carbon stock estimates).

REFERENCES

Alekseev V.A., Berdsi R.A., *Uglerod v ekosistemakh lesov i bolot Rossii* (Carbon in ecosystems of forests and peatlands of Russia), Krasnoyarsk: Izd-vo IL SO RAN, 1994, 170 p.

Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepashchenko D.G., Integrated approach to spatial assessment of soil organic carbon in the Russian Federation, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 3, pp. 325–336.

Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A., Assessment of organic carbon stocks in forest soils on a regional scale, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 3, pp. 339–348.

Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., *BD “Pochvennye kharakteristiki Severnoi Evrazii”* (Database “Soil characteristics of Northern Eurasia”), Certificate of state registration of the database in the Federal Service for Intellectual Property, No. 2018621164 of 05.17.2018.

- Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Bulk density of soil horizons as dependent on their humus content, *Eurasian Soil Science*, 2004, Vol. 37, No. 8, pp. 816–823.
- Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvakh tundrovyykh i lesotundrovyykh ekosistem (Reserves of organic carbon in soils of tundra and forest-tundra ecosystems), *Ekologiya*, 1999, No. 6, pp. 426–432.
- Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I., Obshchie zapasy biologicheskogo ugleroda i azota v pochvakh lesnogo fonda Rossii (Total storages of biogenic carbon and nitrogen in soils of the forest fund of Russia), *Lesovedenie*, 2004, No. 4, pp. 30–42.
- Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvakh lesov Rossii (Organic carbon stocks in soils of Russian forests), In: *Prirodnye i antropogennyye ekosistemy: problemy i resheniya* (Natural and anthropogenic ecosystems: problems and solutions), Moscow: BIBLIO-GLOBUS, 2017, pp. 19–60.
- Efremova T.T., Efremov S.P., Melent'eva N.V., The reserves and forms of carbon compounds in bog ecosystems of Russia, *Eurasian soil science*, 1997, Vol. 30, No. 12, pp. 1318–1325.
- Kobak K.I., *Bioticheskie komponenty uglerodnogo tsikla* (Biotic components of the carbon cycle), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 248 p.
- Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I., *Organicheskoe veshchestvo pochv Rossiiskoi Federatsii* (Organic matter in soils of the Russian Federation), Moscow: Nauka, 1996, 254 p.
- Pastukhov A.V., Kaverin D.A., Soil carbon pools in tundra and taiga ecosystems of northeastern Europe, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 9, pp. 958–967.
- Proceedings of the Global Symposium on Soil Organic Carbon 2017*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Rome, Italy, 534 p.
- Rozhkov V.A., Vagner V.V., Kogut B.M., Konyushkov D.E., Sheremet B.V., Zapasy organicheskikh i mineral'nykh form ugleroda v pochvakh Rossii (Stocks of organic and mineral forms of carbon in the soils of Russia), *Uglerod v biogeotsenozakh* (Carbon in biogeocenoses), Conf. Proc. in memory of V.N. Sukacheva, XV., Moscow: Nauka, pp. 5–58.
- Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A., Spatial variability of the organic carbon pool in soils of forest and steppe biogeocenoses, *Eurasian soil science*, 2008, Vol. 41, No. 12, pp. 1260–1267.
- Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Mukhortova L.V., Vedrova E.F., The pool of organic carbon in the soils of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2013, Vol. 46, No. 2, pp. 107–116.
- Shvidenko A., Nilsson S., A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998, *Tellus*, 2003, Vol. 55, No. 2, pp. 391–415.
- Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Uglerodnyi byudzhet lesov Rossii (Carbon budget of Russian forests), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 69–92.
- Sothe C., Gonsamo A., Arabian J., Kurz W.A., Finkstein S.A., & Snider J., Large soil carbon storage in terrestrial ecosystems of Canada, *Earth and Space Science Open Archive ESSOAr* (2021).
- Stolbovoi V., Carbon in Russian Soils, *Climatic Change*, 2002, Vol. 55, No. 1–2, pp. 131–156.
- Stolbovoi V., McCallum I., *Land Resources of Russia* (CD-ROM). IIASA & RAS. Laxenburg, Austria, 2002.
- Stolbovoi V., Soil carbon in the forests of Russia, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, No. 11, pp. 203–222.
- Titlyanova A.A., Kudryashova S.Y., Kosykh N.P., Shibareva S.V., Bazy dannykh “Organicheskii uglerod” i “Zapasy rastitel'nogo veshchestva v ekosistemakh Sibiri” kak sredstvo otsenki uglerodnogo balansa, ego modelirovaniya i prognozirovaniya na geoinformatsionnoi osnove (Databases “Organic carbon” and “Reserves of plant matter in the ecosystems of Siberia” as a means of assessing the carbon balance, its modeling and forecasting on a geoinformation basis), *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2007, Vol. 12, No. 2S, pp. 131–139.
- Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Korovin G.N., Zukert N.V., Lesa Rossii kak rezervuar organicheskogo ugleroda biosfery (Forests of Russia as a reservoir-storage of carbon in the biosphere), *Lesovedenie*, 2001, No. 5, pp. 8–23.
- Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verkhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukhinin A.I., Shibistova O.B., Lesa i bolota Sibiri v global'nom tsikle ugleroda (Forests and swamps of Siberia in the global carbon cycle), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2005, Vol. 12, No. 4, pp. 631–649.
- Vinson T.S., Kolchugina T.P., Pools and fluxes of biogenic carbon in the Former Soviet Union, *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, No. 70, pp. 223–237.
- Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kraev G.N., A twenty year retrospective on the forest carbon dynamics, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 706–715.
- Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Utkin A.I., Chestnykh O.V., Sohngen B., *Uglerod v lesnom fonde i sel'skokhozyaystvennykh ugod'yakh Rossii* (Carbon pool of the forest fund and the farm lands of Russia), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2005, 200 p.

УДК 630*114.35:630*181.32(470.22)

РАЗЛОЖЕНИЕ ОПАДА ХВОИ В ПОЧВАХ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР СОСНЫ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

© 2022 г. О. Н. Бахмет^а, *, М. В. Медведева^б^аОтдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН,
ул. Пушкинская, д. 11, Петрозаводск, Республика Карелия, 185910 Россия^бИнститут леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, Петрозаводск, Республика Карелия, 185910 Россия

*E-mail: bachmet@mail.ru

Поступила в редакцию 26.10.2021 г.

После доработки 02.12.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Исследования проведены на территории Восточной Фенноскандии, почвы представлены подзолами иллювиально-железистыми песчаными (Podzols). В работе рассмотрены данные по деструкции опада хвои сосны в почвах, находящихся на различных стадиях искусственного лесовосстановления (свежая вырубка, культуры сосны 7-, 15- и 40-летнего возраста). В качестве контроля выбран сосняк брусничный 170-летний, произрастающий на заповедной территории. Исследована эффективность разложения опада хвои сосны в модельном полевом эксперименте, изучено изменение содержания химических элементов, а также биохимических показателей в процессе его минерализации в почве. Проведена оценка эколого-трофической структуры микробного сообщества почв изучаемых экосистем. Установлено, что наибольшие изменения процесса трансформации органического вещества происходят в почвах, находящихся на ранних стадиях лесовосстановления. В почвах, сформировавшихся под культурами сосны более 15 лет, интенсивность минерализационных процессов и содержание трудногидролизуемых элементов снижается, а при достижении 40 лет становится характерной для почв ненарушенных лесных сообществ. Изменения содержания химических элементов отмечено в опаде сосны, экспонированной в почве. Полученные данные можно использовать при мониторинге природной среды.

Ключевые слова: среднетаежная подзона Карелии, свойства почв, культуры сосны, ненарушенные лесные экосистемы, трансформация органического вещества.

DOI: 10.31857/S0024114822030032

В настоящее время бессистемные вырубки лесов привели к снижению их природоохранного потенциала, прогрессирующему и преждевременному истощению. Как известно, влияние рубки древостоя на лесное сообщество многофакторное. Изменение гидротермического и трофического режимов вырубаемых лесов приводит к нарушению природного потенциала биосистемы, круговорота питательных веществ, сводит на нет выполнение главной ее функции – биосферной. Одним из действенных способов восстановления лесов, подвергнутых вырубке, является создание культур хвойных деревьев. В искусственных экосистемах возможно создание определенной фитоценотической структуры, формирование консортивных связей в лесном сообществе с заранее заданными свойствами (Бабич, Клевцов, 2012; Бабич, 2013). Это в конечном итоге позволяет планировать продукционную способность рукотворного древостоя. При этом важно отметить, что принцип неистощимого природопользова-

ния предполагает не только охрану и защиту объектов природы, но и их восстановление.

Как известно, при проведении лесохозяйственных работ происходит изменение различных компонентов экосистемы, в том числе и почв (Дымов и др., 2012). Установлено изменение свойств почв в условиях искусственного лесовозобновления (Бескорвайная и др., 2010; Федорев и др., 2016). В связи с изменением свойств почв в процессе лесохозяйственного использования возможно изменение природных ритмов поступления-минерализации органического вещества. Как известно, процесс разложения органического вещества в почве зависит от природно-климатических условий. В таежной зоне процесс разложения идет медленнее, чем в более теплых областях (Zhang et al., 2006). Также существует зависимость от влажности почв, поступающих осадков, температуры (Vauramo, Setälä, 2011). Процесс трансформации органического вещества определяется временем экспозиции опада: мак-

симальное разложение отмечено в начальные сроки, затем скорость превращения снижается (Jennifer S. Powers et al., 2009). Продукты разложения опада сосны могут быть основным источником дисперсного органического вещества (Семенов и др., 2019), которое определяет ее плодородие.

Велика роль почвенной биоты в процессах трансформации органического вещества (Dickenson, Pugh, 1974). Методом изоляции микрокосм установлена роль нематод и коллембол в данном процессе (Kotilainen et al., 2004). Микроорганизмы, осуществляя деструкцию растительного опада в почве, донируют метаболиты-предшественники стабильного органического вещества почв, способствуя агрегации и прочному химическому связыванию с минеральной почвенной матрицей (Cotrufo et al., 2013). При этом отмечается, что данный процесс приводит к формированию лабильных и стабильных компонентов органического вещества. Последний может быть представлен лигнином, скорость минерализации которого очень низкая (Лопес де Гереню и др., 2021). Он может оказывать каталитическое/ингибирующее влияние на круговорот углерода в экосистеме (Austin, Ballaré, 2010)

Деструкция органического вещества в почве зависит от содержания азота (Berg, 2000; Ларионова и др., 2017). В процессе разложения изменяется соотношение биофильных элементов: С/Р, С/Н и N/P, поэтому их можно использовать для диагностики этого процесса (Хуе-Фенг et al., 2008). Скорость высвобождения серы, фосфора зависит от вида опада, микробиологической активности (McGill, Cole, 1981). Процессы высвобождения С, Р, Cu, Са и К в процессе разложения опада зависят от содержания фосфора (Qualls, Richardson, 2000).

Несмотря на то, что много данных по вопросу биологии разложения растительных остатков в почвах ненарушенных лесных экосистем, необходимо дальнейшее развитие методологии оценки процесса разложения для антропогенно нарушенных почв. Последнее даст правильное представление о направленности почвообразовательного процесса, а также позволит корректно интерпретировать информацию, проводить сравнительный анализ данного процесса в различных условиях фитоценотической среды, возможность создания единой мировой базы данных (Krishnal, 2017). В этой связи целью настоящих исследований было изучение динамики разложения опада сосны в почвах хронологического ряда восстановления лесной экосистемы.

Данная работа имеет общетеоретическое и практическое значение, так как позволяет решить проблему изучения трансформации органического вещества как целенаправленное замедление/ускорение процесса почвовосстановления

под действием лесохозяйственных мероприятий. Полученные данные могут стать основой при создании математической модели круговорота элементов. Также полученные результаты можно использовать при проведении лесохозяйственных работ, оценке экологического потенциала территории, в создании экологического паспорта фитокомплекса. Последнее, как известно, является актуальным в связи с проведением глобальной инвентаризацией лесов бореальной зоны Восточной Фенноскандии (Бореальные леса ..., 2017).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в среднетаежной подзоне Карелии (62°16' с.ш. и 33°59' в.д.). Изучение состояния почв хронологического ряда лесовосстановления выполнены на пяти пробных площадях (ПП). Особенностью данной работы было соблюдение принципа "выравниваемости" экологических условий, в которых идет формирование почв: единообразия климата, позиций в ландшафте, почвообразующих пород, фитоценоза, рельефа местности. Только соблюдая данное условие можно провести комплексный анализ почв, использовать полученные данные для практических целей.

Почвы, выбранные для исследования, подзолы иллювиально-железистые (Podzols), широко распространены на территории Восточной Фенноскандии (Морозова, 1991). Почвы альфе-гумусового генезиса имеют хорошо дифференцированный профиль, в котором выделяют горизонты О (лесная подстилка), Е (подзолистый горизонт), В (иллювиальный), С (песчаные флювиогляциальные отложения).

При изучении деструкционных процессов особый интерес представляют контрастные экологические условия почвообразования: свежая вырубка – 7 лет–15 лет–40 лет–170 лет. ПП 1 представляет свежую вырубку после проведения сплошной рубки соснового древостоя. Почва – антропогенно нарушенный подзол иллювиально-железистый песчаный, имеет следующее морфологическое строение: Oantr(0–1 см)–Eantr(1–4 см)–VF(4–20 см)–B2(20–57 см)–BC(57–92 см)–C(92 см и далее). Изменение морфологического строения почв выражается во фрагментарном развитии подстилки небольшой мощности. Вследствие действия лесозаготовительной техники в отдельных местах она содрана, поэтому обнажения минеральной толщи прослеживаются повсеместно. Многочисленные вдавления верхних горизонтов почв в нижние, перемешивания, возникающие на фоне действия лесозаготовительной техники, хорошо диагностируются на данном участке. Также можно отметить древесную ветошь, состоящую из опилок, сучьев, веток, лежащую на поверхности почв. Это создает большую пространствен-

ную неоднородность условий, в которых идет формирование почв.

ПП 2 — это участок с культурами сосны 7-летнего возраста. Почва — подзол иллювиально-железистый песчаный, имеет следующее морфологическое строение: O(0–2 см)–E(2–4 см)–BF(4–14 см)–B2(14–22 см)–BC(22–85 см)–C(85 см и далее). Вследствие изменения качественного состава поступающего в экосистему опада растений — доминирования многолетних трав — ведущими почвообразовательными процессами на данном этапе развития почв становятся дерновый и подзолообразовательный. Последний не выражен, подзолообразовательный процесс носит фрагментарный характер.

ПП 3 — это участок с культурами сосны 15-летнего возраста. Почва — подзол иллювиально-железистый песчаный, имеет следующее морфологическое строение: O(0–3 см)–E(3–5 см)–BF(5–18 см)–B2(18–60 см)–BC(60–90 см)–C(90 см и далее). На данном этапе формирования древостоя происходит сомкнутость крон сосны, которая создает предпосылки для быстрого восстановления верхнего органогенного горизонта (O). Лесная подстилка хорошо дифференцируется на отдельные подгоризонты (OL и OFH), что является характерным для ненарушенных почв данного типа. Кислотообразуемые продукты минерализации мортмассы, образованной опадом сосны и растений жестколистных кустарничков, древесной ветошью, обуславливают интенсивно идущий подзолообразовательный процесс.

ПП 4 представляет собой участок, на котором произрастают культуры сосны 40 лет. Для данного этапа развития соснового насаждения является характерным усложнение структуры растений напочвенного покрова. Оно выражается в формировании растительных микрогруппировок, характерных для ненарушенного лесного комплекса. Почва — подзол иллювиально-железистый песчаный, имеет следующее морфологическое строение: O(1–4 см)–E(4–7 см)–BF(7–23 см)–B2(23–57 см)–BC(57–88 см)–C(88 см и далее). Для почв является характерным увеличение мощности горизонтов, накопление собственно органического вещества в иллювиальной толще. Вследствие роста древостоя корнеобитаемая зона становится глубже, более упорядоченной становится и корневая система растений, траектория дальнейшего развития всего древостоя уже прогнозируема.

В качестве контроля была выбрана ПП 5, расположенная на заповедной территории, не испытывающая антропогенного воздействия. Почвы заповедника “Кивач” могут быть эталоном при проведении работ в области лесовосстановления, создании балансовых моделей круговорота вещества в экосистеме, прогностическом мониторинге природной среды. Почва, характеризующая

ненарушенный сосняк брусничный, относится к подзолу иллювиально-железистому песчаному. Строение ее профиля может быть представлено как O(0–5 см)–E(5–8 см)–BF(8–29 см)–B2(29–52 см)–BC(52–100 см)–C(100 см и далее). В сосняке черничном 170-летнего возраста ведущими почвообразовательными процессами являются подстилконопление, подзолообразование, иллювиирование. Горизонты хорошо выражены, более однородны, морфометрические и физико-химические свойства почв более контрастны, что свидетельствует о сформированном почвенном профиле, характерном для зрелых лесных сообществ.

Для характеристики микробного сообщества почв, подвергнутых лесохозяйственным мероприятиям, на каждой пробной площади проводили отбор почв из верхнего генетического горизонта почв — лесной подстилки. Эколого-трофическую структуру микробного сообщества определяли методом предельных разведений с последующим высевом почвенных суспензий на селективные питательные среды согласно традиционным в почвенной микробиологии методике (Методы ..., 1987). Подсчет колоний микроорганизмов проводили на анализаторе колоний Scan 100 (France).

Эффективность разложения опада хвои сосны определяли методом “сетчатых мешочков” (Карпачевский и др., 1980; Германова, Медведева, 2010). Для эксперимента использовали опад хвои сосны, отобранный в конце вегетации растений. Отобранный растительный материал высушивали до постоянной массы при температуре 40°C. Мешочки с высушенным растительным материалом помещали между верхним слоем опада и подстилкой в межкрановом пространстве древостоя. Повторность выполнения опыта 9-кратная. Время экспозиции опыта составило 1 год. В лабораторных условиях по окончании эксперимента образцы высушивали до постоянной массы при 40°C и взвешивали. В качестве критерия интенсивности разложения использовали убыль массы опада хвои сосны. Минерализационные потери в процессе разложения остатков растений оценивали по изменению содержания химических элементов в разлагающемся материале с последующим пересчетом к исходному количеству. Опыт по годичному разложению остатков хвои сосны в этих насаждениях проводился впервые.

В исходном и экспонируемом в почве опаде хвои сосны устанавливали следующие показатели. Зольность определяли согласно прописям (Аринушкина, 1970), содержание общего азота и углерода определяли на CNH-анализаторе. Валовое содержание макро- (Ca, Mg, P, K) и микро-элементов (Ni, Cu, Zn, Fe) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (спектрофотометр AA-7000, Shimadzu, Япония). Биохими-

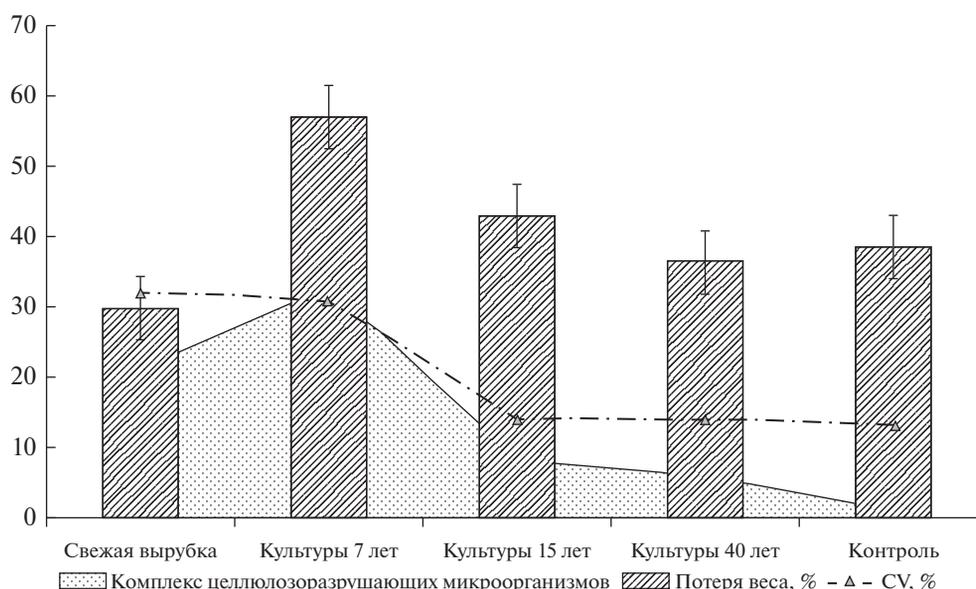


Рис. 1. Изменение численности целлюлозоразрушающих микроорганизмов (тыс. КОЕ/г почвы) в почве и эффективности разложения опада сосны (%), коэффициента вариации (CV) данного показателя в процессе его годичной экспозиции в почве в условиях искусственного лесовосстановления.

ческий состав органического вещества проводили по методике Н.И. Ястрембовича и Ф.Л. Калинина (Ястрембович, Калинин, 1962) в модификации Г.И. Софроновой с соавторами (Софронова и др., 1978). Содержание углеводов пересчитывалось в абсолютно сухое беззольное вещество.

Данные были получены с использованием оборудования ЦКП “Аналитическая лаборатория” ИЛ КарНЦ РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность разложения опада сосны, инкубируемого в почве. Результаты показали, что исследуемые показатели имеют отличия на каждом участке, что связано с влиянием антропогенного воздействия на свойства почв, древостои. Динамика разложения опада хвои сосны и высвобождение элементов питания связаны с накоплением их в процессе роста древостоя и работой микробиоты, осуществляющей процессы трансформации органического вещества. Низкая скорость минерализации опада (<30%) в почвах на участке с полным удалением древостоя, высокий коэффициент вариации (>50%) изучаемого параметра свидетельствуют о резком изменении почвенно-химической обстановки для подстилочных деструкторов, контрастности микроусловий микропроцессов (рис. 1). Как известно, велико влияние лесозаготовительной техники на свойства почв. Сдирание лесной подстилки, обнажение минеральной толщи, формирование турбированных горизонтов почв, а также многочисленные порубочные остатки, вывалы пней и пневый

осмол — вот не полный перечень негативных изменений, которые происходят в почве на фоне стопроцентной вырубке древостоя. Все это “отбрасывает” лесную экосистему назад, создает пессимальные местообитания для биотического блока биогеоценоза и, в конечном итоге, тормозит восстановление свойств почв, формирование природного баланса элементов (Bakhmet, Medvedeva, 2015).

Наиболее высокая скорость минерализации хвойного опада происходит в почвах, сформировавшихся под 7-летними и 15-летними культурами сосны, составляющая 55 и 42% соответственно. “Мягкий” сосновый опад молодого древостоя создает благоприятные трофические условия обитания для зимогенной микробиоты. При этом коэффициент вариации данного показателя довольно высокий (до 55%) на данных участках, что свидетельствует о гетерогенности педоусловий в результате антропогенного воздействия. В почвах, сформировавшихся под 15- и 40-летними культурами сосны и контролем, скорость минерализации опада сосны низкая и составляет <40%. При этом коэффициент вариации данного показателя не высокий, что в целом отражает восстановление педоусловий.

Необходимо также подчеркнуть, что сукцессия растений напочвенного покрова и почв при снятии антропогенного воздействия может проходить в несколько стадий. Первая стадия характеризуется доминированием мертвopoкpoвнoй ассоциаций с фрагментами хвойного опада (свежая вырубка), большой гетерогенностью эдафи-

Таблица 1. Интенсивность высвобождения азота и зольных элементов из опада сосны в процессе его минерализации в почве

Свежий опад, %					Изменение при разложении, % от исходного содержания				
Зольность	С	N	P	К	Зольность	С	N	P	К
Контрольный участок, Сосняк брусничный, пр.пл. 5									
3.58	44.88	0.71	0.14	0.02	120.4	88.3	101.4	128.6	211.1
Свежая вырубка, пр.пл. 1									
3.65	54.6	0.79	0.10	0.07	106.6	84.0	70.9	210.0	185.7
Культуры сосны 7 лет, пр.пл. 2									
1.32	42.16	1.24	0.17	0.15	175.7	98.1	97.6	94.1	206.7
Культуры сосны 15 лет, пр.пл. 3									
1.18	41.20	1.14	0.16	0.12	139.0	99.9	86.0	106.3	275.0
Культуры сосны 40 лет, пр.пл. 4									
1.52	42.21	0.81	0.14	0.08	134.2	96.4	139.5	157.1	325.0

ческих условий. Вторая стадия характеризуется развитием многолетних трав, которые формируют задерненную лесную подстилку (7-летние культуры сосны). На третьей стадии происходит сомкнутость крон сосновых деревьев, затемнение под пологом леса, изменение природной среды. Именно на данной стадии эволюции экосистемы начинает активно формироваться лесная подстилка (15- и 40-летние культуры сосны). В целом, по мере формирования древостоя, круговорот элементов питания растений становится более сбалансированным, трофические связи более «упорядоченными», детритная пищевая цепь укорачивается, древостой переходит в фазу климаксового. В данной фазе развития лесной экосистемы гумусное состояние почв можно охарактеризовать как «зрелое», буферное действие пула углеводов может обеспечивать формирование депо органического вещества.

Изменение содержания элементов питания в опаде сосны инкубируемого в почве. Интенсивность высвобождения азота и зольных элементов из опада сосны в процессе его минерализации в почве представлено в табл. 1. В целом необходимо отметить низкую зольность (до 4%), содержание НРК в опаде сосны. Это является характерным для опада хвойных деревьев, адаптированных к неблагоприятным условиям. Содержание С в опаде высокое и составляет до 55%, однако он входит в состав трудногидролизующих углеводов, минерализация которых в почвах заторможена.

Содержание микроэлементов (Fe, Cu, Zn, Ni), щелочноземельных металлов в исследуемом опаде сосны низкое (табл. 2).

Как известно, почвообразующие породы Карелии бедны по содержанию щелочных и щелочноземельных металлов. Это находит отражение в

химическом составе опада хвойных деревьев, содержание которых низкое, что подтверждает генетическую связь различных компонентов, слагающих биогеоценоз. На фоне антропогенного воздействия нарушается рециклирование элементов, однако оно восстанавливается до природного по мере развития древостоя. Содержание золы в опаде древостоя старше 40 лет более высокое по сравнению с молодыми деревьями. Тенденция снижения в содержании изучаемых биогенных элементов (С, N, P, K) в опаде сосны четко прослеживается в ряду 7 лет > 15 лет > 40 лет > > 170 лет = свежая вырубка. При этом химический состав опада отражает общий план строения древостоя: наибольшее содержание элементов отмечено в опаде молодого леса, в более старовозрастных насаждениях содержание биогенных веществ снижается.

При лесовосстановительных мероприятиях прослеживаются закономерные тенденции изменения в содержании отдельных химических элементов в процессе минерализации опада сосны. Прежде всего отмечается возрастание зольности, что связано с резкой потерей органической массы в процессе его минерализации. Быстрое высвобождение беззольной части опада происходит под действием гидролитических ферментов, активность которых в лесных подстилках высокая. При этом наибольшие показатели отмечали на участках 7- и 20-летнего древостоев. Высвобождение углерода из опада сосны происходит медленно, что связано с его участием в формировании структуры хвои, образованием волокон, трудногидролизующих соединений. Отмечается уменьшение в содержании углерода в опаде сосны, экспонируемого в почве контрольного участка. Наибольшие потери фосфора произошли на участках 7 и 15-летних культур. В отношении калия замет-

Таблица 2. Интенсивность высвобождения макро- и микроэлементов из опада в процессе его годичного разложения в почве

Свежий опад, мг/кг						Изменение при разложении, % от исходного содержания					
Cu	Zn	Ni	Fe	Ca	Mg	Cu	Zn	Ni	Fe	Ca	Mg
Контрольный участок, Сосняк брусничный, пр.пл. 5											
2.62	65.2	1.19	51.5	5000	627	153.05	57.1	334.5	132.4	71.3	60.8
Свежая вырубка, пр.пл. 1											
2.58	54.6	1.21	92.5	5270	486	142.3	67.0	332.2	101.9	106.6	111.9
Культуры сосны 7 лет, пр.пл. 2											
3.71	32.1	1.92	92.3	2218	366	71.70	100.3	91.7	66.2	64.1	78.7
Культуры сосны 15 лет, пр.пл. 3											
3.21	28.2	0.91	64.8	1826	455	79.13	103.5	118.7	83.6	88.7	66.4
Культуры сосны 40 лет, пр.пл. 4											
3.61	41.2	0.94	72.4	2150	318	78.12	63.3	193.6	88.6	80.2	107.2

ного различия на отдельных участках не выявили, что связано с его высокой миграционной способностью, участием в почвообразующих процессах. Интересно отметить, что содержание всех исследуемых элементов в опаде, экспонируемом в почве, высокое в 40-летнем сосняке. Возможно, что именно на этой стадии происходит переход древостоя в состояние “стабилизации”, сомкнутость крон хвойных деревьев, изменение условий их произрастания. Доминирующие деревья становятся “дирижерами” развития микроорганизмов, определяя стратегию их развития. На более поздних этапах восстановительной сукцессии соснового древостоя интенсивность высвобождения элементов при минерализации опада имеет более однотипный характер, меньше зависит от пула элементов питания, а следовательно, более устойчив к неблагоприятным факторам среды. В этот период сложились темп и ритм высвобождения элементов, свойственные естественным фитоценозам.

Важным показателем направленности трансформации органического вещества в опаде является соотношение биофильных элементов C/N, C/P. Результаты показали, что в опаде сосны значение отношения C/N, C/P было наиболее благоприятным на участках 7- и 15-летних культур, составляющее 35, 250 соответственно. В опаде деревьев 40 лет и свежей вырубке это соотношение было больше 50 и 300 соответственно.

В опаде, экспонируемом в почве, произошло изменение показателя C/N, C/P, что свидетельствует об активном участии элементов в круговороте веществ, постсинтетических процессах. При этом оптимальные значения данных показателей для подстильных деструкторов отмечали на участках с 7- и 15-летними культурами сосны, что подтверждало вышесказанное об интенсивно происходящих процессах минерализации органического вещества на данных участках.

Изменение в содержании макро- и микроэлементов в опаде сосны, инкубируемом в почве, представлено в табл. 2. Как видно из приведенных результатов, содержание исследуемых элементов в опаде низкое, четкого различия на отдельных участках не отмечали. Тенденция возрастания щелочных элементов Ca, Mg в опаде хвои старовозрастных деревьев прослеживается, что может быть связано с дефицитом фосфора, отмеченным выше. Также отмечали возрастание цинка в опаде сосны по мере увеличения возраста растений.

По мере минерализации опада в почве содержание химических элементов становится другим. Наиболее высокие показатели отмечены в опаде сосны, инкубируемом в свежей вырубке, что обусловлено интенсивным вовлечением их в процессы почвообразования. Установили возрастание меди, никеля, железа в опаде сосны, инкубируемом в почвах старовозрастных древостоев и свежей вырубке.

Динамика изменения биохимических показателей в процессе разложения опада сосны в почве. В изучаемом хронологическом ряду лесовосстановления происходит закономерное с точки зрения сукцессии соснового древостоя изменение в содержании растворимых углеводов, крахмала, гемицеллюлозы и целлюлозы (табл. 3).

Максимальное содержание водорастворимых сахаров, крахмала отмечено в опаде сосны 7-летних культур. Высокое содержание лабильных гемицеллюлоз также выявили на данном участке. Снижение стабильной фракции гемицеллюлозы и целлюлозы было ниже по сравнению с контролем, изменение фракционного состава полисахаридов также выявили. При этом необходимо отметить, что численность и активность целлюлолитических микроорганизмов, относящихся к к-стратегам, здесь наиболее высокая. Однако это не

Таблица 3. Содержание углеводов в опаде хвои сосны, инкубируемой в почве хронологического ряда вырубок

Растворимые углеводы				Крахмал	Гемицеллюлоза		Сумма углеводов	Целлюлоза	
моносахариды		дисахариды	олигосахариды		сумма	лабильная			стабильная
глюкоза	фруктоза								
Контрольный участок, Сосняк брусничный, пр.пл. 5									
$\frac{0.72}{15.28}$	Не обн.	$\frac{5.01}{36.53}$	$\frac{1.82}{26.37}$	$\frac{7.55}{32.05}$	$\frac{1.18}{34.75}$	$\frac{5.3}{61.13}$	$\frac{35.8}{59.25}$	$\frac{49.83}{54.75}$	$\frac{19.61}{57.32}$
Свежая вырубка, пр.пл. 1									
$\frac{0.44}{100}$	Не обн.	$\frac{4.02}{52.99}$	$\frac{1.41}{58.16}$	$\frac{5.87}{50.26}$	$\frac{1.22}{66.39}$	$\frac{4.8}{67.50}$	$\frac{37.6}{56.25}$	$\frac{49.49}{56.88}$	$\frac{18.21}{61.72}$
Культуры сосны 7 лет, пр.пл. 2									
$\frac{0.98}{100}$	$\frac{0.72}{100}$	$\frac{8.14}{8.85}$	$\frac{3.22}{11.18}$	$\frac{12.34}{8.75}$	$\frac{6.45}{100}$	$\frac{14.2}{95.92}$	$\frac{26.1}{71.34}$	$\frac{59.81}{55.71}$	$\frac{8.81}{47.79}$
Культуры сосны 15 лет, пр.пл. 3									
$\frac{0.62}{11.29}$	$\frac{0.63}{100}$	$\frac{3.25}{28.31}$	$\frac{1.92}{100}$	$\frac{5.79}{17.10}$	$\frac{1.39}{100}$	$\frac{7.7}{71.17}$	$\frac{34.4}{93.66}$	$\frac{49.91}{77.52}$	$\frac{13.64}{62.46}$
Культуры сосны 40 лет, пр.пл. 4									
$\frac{0.70}{11.43}$	Не обн.	$\frac{4.01}{36.16}$	$\frac{1.78}{34.83}$	$\frac{6.49}{33.13}$	$\frac{1.42}{22.54}$	$\frac{4.8}{55.21}$	$\frac{38.2}{83.32}$	$\frac{50.91}{72.58}$	$\frac{23.83}{68.07}$

В числителе — исходное содержание углеводов в хвое сосны, в знаменателе — процент от исходного содержания

противоречит полученным данным, а напротив, еще раз подтверждает дублированность процессов трансформации органического вещества в почве, а также улучшение азотного питания микроорганизмов (Звягинцев, 1987). Как известно, не все участники целлюлозолитического комплекса способны осуществлять гидролиз целлюлозы. Трансформация целлюлозы происходит при активном потреблении азота, что усиливает конкуренцию за субстрат не только со стороны микроорганизмов гидролитического комплекса, но и корнями растений, осваивающими новую территорию.

Скорость минерализации углеводов в опаде сосны в исследуемых древостоях не одинакова. На участке, подвергнутом 100-процентному удалению древостоя, не выявили замедление процессов утилизации гомо- и гетерополисахаридов, несмотря на резкое изменение педохимических условий. Нивелирование негативного влияния на первом этапе происходит, возможно, за счет большего прогрева почв при удалении деревьев, порубочные остатки и корневой опад способствуют развитию микроорганизмов, осуществляющих более глубокую минерализацию органического вещества. Высокую скорость превращения растворимых углеводов, крахмала выявили в опаде сосны, экспонируемого в почвах, сформировавшихся под молодыми 7-летними культурами сосны. Это, возможно, связано с “эффектом последствия” оставленных в почве гниющих дре-

весных остатков, многочисленные потеки органической массы которых обнаруживали повсеместно в почве.

Результаты микробиологических исследований показали, что диапазон численности микроорганизмов не выходит за границы природной вариабельности, характерной для микробных сообществ почв данной природно-климатической зоны (рис. 2). Присутствуют все важнейшие эколого-трофические группы в микробоценозе: гидролитики, олиготрофы, копитрофы. Заметное снижение их численности на наиболее нарушенных участках диагностирует увеличение степени вовлечения гумуса в круговорот веществ, его минерализацию. Можно отметить что, несмотря на изменение условий их существования, они способны к мобилизации энергетических ресурсов для синтеза прогумусовых веществ, осуществлять трансформацию органических и минеральных соединений, поддерживая гомеостаз всей экосистемы. Однако на данном этапе развития фитоценоза острая конкуренция за субстрат со стороны микроорганизмов может привести к резкому снижению жизнеспособного состояния хвойных деревьев, снижению их продуктивности, ослаблению, поэтому необходим мониторинг, проведение лесохозяйственных мероприятий, направленных на оптимизацию их состояния. Последнее имеет большое значение для формирования устойчивости всего биогеоценоза.

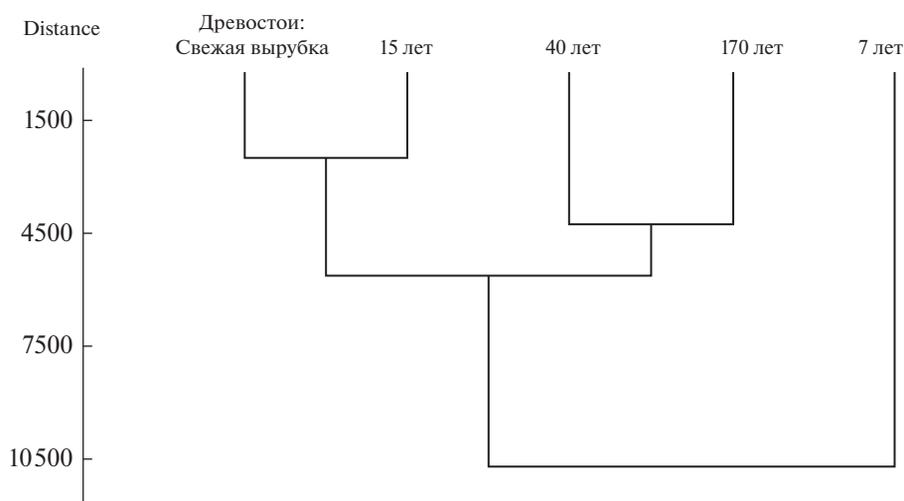


Рис. 2. Изменение микробиально-биохимических показателей в пространстве факторов среды.

Математико-статистический анализ выполненный на основе кластерного анализа показал, что деструкция хвойного опада зависит от стадии восстановления экосистемы (рис. 3). Наиболее выраженные изменения микробиально-биохимических свойств почв наблюдаются на участках 7-летней вырубке, тенденция однонаправленных изменений на свежей и 15-летней вырубке прослеживается. Вырубки 40- и 170-летние имеют также сходные эдафические условия, что подтверждает вышесказанное о стабилизации экосистемы и переход в устойчивое состояние древостоя с 40 лет. Разложение опада сосны идет менее интенсивно именно на участках, где произрастает данный древостой.

В целом конвергенция процесса трансформации органического вещества в почвах антропогенно трансформированных экосистем с ненарушенными почвами альфе-гумусового генезиса свидетельствует о возможном управлении их трофическим режимом. Это предполагает мероприятия по оптимизации состояния микробиоты для увеличения внутреннего потенциала лесной экосистемы, устойчивости к антропогенному воздействию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение свойств почв и происходящих в них процессов на фоне лесохозяйственных мероприятий приводит к нарушению темпа и направленности трансформации органического вещества. Наиболее выраженные изменения отмечаются в почвах, подвергшихся максимальному антропогенному воздействию — на свежей вырубке. Выявили снижение эффективности деструкции опада сосны, высвобождения элементов минерального питания, микробиологической активности

почв. По мере роста древостоя интенсивность минерализационных процессов увеличивается, достигая наибольших значений в почвах, сформировавшихся под 7-летними культурами сосны. В почвах, сформировавшихся под 15-летними культурами сосны, трансформация органической массы носит более устойчивый характер, отмечается стабилизация процессов выщелачивания макро- и микроэлементов. По прошествии 40 лет после вырубки древостоя интенсивность биотрансформации опада сосны и высвобождение элементов в процессе его минерализации в почвах замедляются и приобретают черты, характерные для почв нетронутых сосновых древостоев заповедных территорий. В связи с тем, что индикация состояния почв, находящихся в условиях искусственного облесения, может быть дана только на основании комплексных исследований, дальнейшая работа предполагает сопряженное изучение формирования гумусного состояния почв и состояния микроорганизмов, участвующих в этом процессе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Предоставленный материал был получен при выполнении государственного задания КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 491 с.
- Бабич Н.А., Клевцов Д.Н. Запасы энергии в культурах сосны // Лесной вестник. 2012. № 1. С. 38–41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zapasy-energii-v-kulturah-sosny> (дата обращения: 29.11.2021)
- Бабич Н.А. Актуальные проблемы лесовосстановления на Европейском Севере России в рамках перехода к интенсивной модели ведения лесного хозяйства // Известия вузов. Лесной журн. 2013. № 2(332). С. 74–83.

- Безкоровайна И.Н., Антонов Г.И., Иванов В.В., Семейкин Д.А. Биологическая активность почв после несплошных рубок в сосняках Красноярской лесостепи // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. 27. № 3–4. С. 238–242.
- Бореальные леса: состояние, динамика, экосистемные услуги: тезисы докладов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 60-летию Института леса Карельского научного центра РАН. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 338 с.
- Германова Н.И., Медведева М.В. Учебно-методическое пособие по исследованию микробсообществ естественных и антропогенно нарушенных почв. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 64 с.
- Дымов А.А., Лантеева Е.М., Милановский Е.Ю. Изменение почв и почвенного органического вещества в процессе естественного лесовозобновления после рубки сосняка бруснично-зеленомошного // Лесной вестник. 2012. С. 67–71.
- Звягинцев Д.Г. Почва и микроорганизмы. М.: МГУ, 1987. 256 с.
- Карпачевский Л.О., Воронин А.Д., Дмитриев Е.А., Строганова М.Н., Шоба С.А. Почвенно-биогеоценозические исследования в лесных биогеоценозах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 160 с.
- 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 опадов в модельном эксперименте // Лесоведение. 2017. № 2. С. 128–139.
- Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Галибина Н.А., Капица Е.А., Шорохова Е.В. Влияние температуры и минеральных добавок азота и фосфора на процессы разложения и состав почвенно-коровых субстратов // Почвоведение. 2021. № 1. С. 45–59.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21010081>
- Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: МГУ, 1987. 267с.
- Морозова Р.М. Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.
- Семенов В.М., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Хромычкина Д.П., Семенова Н.А., Лопес де Гереню В.О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве в модельном эксперименте // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1172–1184.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113>
- Софронова Г.И., Трубино Г.И., Шредерс С.М., Макаревский М.Ф. К методике количественного определения углеводов в вегетативных органах сосны обыкновенной // Физиолого-биохимические исследования сосны на Севере. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1978. С. 119–133.
- Федорец Н.Г., Солодовников А.Н., Ткаченко Ю.Н. Водно-физические и агрохимические показатели почв базисных питомников Карелии // Успехи современного естествознания. 2016. № 8. С. 139–144.
- Ястрембович Н.И., Калинин Ф.Л. Определение углеводов и растворимых соединений азота в одной навеске растительного материала // Науч. тр. Укр акад. с.-х. наук. 1962. Вып. 23. С. 119–126.
- Austin A., Ballaré C. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems // PNAS. 2010. V. 107. № 10. P. 4619–4622.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0909396107>
- Bakhmet O., Medvedeva M. Variations in soil properties upon artificial reforestation in Karelia // Contemporary Problems of Ecology. V. 8. № 7. 2015. P. 838–844.
<https://doi.org/10.1134/S1995425515070033>
- Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils // Forest Ecology and Management. 2000. № 133. P. 13–22.
- Cotrufo F., Soong J., Horton A., Campbe E., Haddix M., Wall D., Parton W. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss // Nature Geosciences. 2015. V. 8. P. 776–781.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2520>
- Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Denef K., Paul E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? Global Change Biology. 2013. V. 19. № 4. P. 988–995.
- Dickenson C.H., Pugh G.J.F. Biology of plant litter decomposition. United states Edition published by Academic press INC. London and N.Y. 1974. V. 1. 133 p.
- Powers J.S., Montgomery R., Adair E., Brearley F., DeWalt S., Castanho C., Chave J., Deinert E., Ganzhorn J., Gilbert M., González-Iturbe J., Bunyavejchewin S., Grau H.R., Harms K., Hiremath A., Iriarte-Vivar S., Manzane E., Oliveira A.A., Poorter L., Ramanamanjato J.-B., Carl Salk, Varela A., Weiblen G.D., Lerdau M.T. Decomposition in tropical forests: a pan-tropical study of the effects of litter type, litter placement and mesofaunal exclusion across a precipitation gradient // J. Ecology. 2009. V. 97. № 4. P. 801–811.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01515.x>
- Kotilainen T., Setälä H., Alatalo I., Vuorisalo T., Saloniemi I. Impacts of chitinase-transformed silver birch on leaf decomposition and soil organism. // European J. Soil Biology. 2004. № 40. P. 155–161.
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2005.03.001>
- Krishnal M. Litter decomposition in forest ecosystems: a review // Energy, Ecology and Environment. 2017. № 2(4). P. 236–249.
<https://doi.org/10.1007/s40974-017-0064-9>
- McGill W.B., Cole C.V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S, and P through soil organic matter // Geoderma. 1981. V. 26. P. 267–286.
- Qualls R., Richardson C. Phosphorus enrichment affects litter decomposition, immobilization and soil microbial phosphorus in wetland mesocosms // Soil Sci. Soc. Am. J. 2000. V. 64. № 2. P. 799–808.
- Vauramo S., Setälä H. Decomposition of labile and recalcitrant litter types under different plant communities in urban soils // Urban Ecosyst. 2011. № 14. P. 59–70.
<https://doi.org/10.1007/s11252-010-0140-9>
- Xue-Feng Li, Shi-Jie Han, Yan-Ling Hu, Yu-Tao Zhao. Decomposition of litter organic matter and its relations to C, N and P release in secondary conifer and broadleaf mixed forest in Changbai Mountains // The J. Applied Ecology. 2008. V. 19. P. 564–570.
- Zhang R.Q., Sun Z.J., Wang C., Ge Y., Li Y.L., Qiao Y.H., Pang J.Z., Zhang L.D. Eco-process of leaf litter decomposition in tropical rain forest in Xishuangbanna, China. I. Decomposition dynamic of mixed leaf litters. J Plant Ecol (Chin Vers). 2006. № 30. P. 780–790.

Pine Needles Litter Decomposition in Soils of the Eastern Fennoscandia's Pine Plantations

O. N. Bakhmet^{1, *} and M. V. Medvedeva²

¹*Department of Multidisciplinary Scientific Research, Karelian Research Centre of the RAS,
Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, 185910 Russia*

²*Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the RAS, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, 185910 Russia*

*E-mail: bakhmet@mail.ru

The studies were carried out in the Eastern Fennoscandia, with soils being represented by iron sandy podzols. The paper considers data on the pine needle litter decomposition in soils at various stages of artificial reforestation (fresh felling, 7-, 15-, and 40-year-old pine crops). A 170-year-old cowberry pine forest growing in a protected area was chosen as a control. The study included assessing the efficiency of pine needle litter decomposition in a model field experiment, as well as the change in the chemical elements content and biochemical parameters, as the process of litter's mineralization in the soil went on. The ecological and trophic structure of the soil microbial community was also assessed in each of the ecosystems. It has been established that the greatest changes in the organic matter transformation process occur in soils at the early stages of reforestation. In soils that have been formed under pine cultures older than 15 years, the intensity of mineralization processes and the content of hardly hydrolysable elements decreased, and upon reaching 40 years it became similar to the soils of undisturbed forest communities. Changes in the chemical elements content were noted in the pine litter exposed in the soil. The data obtained can be used in monitoring the natural environment.

Keywords: Karelian middle taiga, soil properties, pine crops, undisturbed forest ecosystems, organic matter transformation.

REFERENCES

- Arinushkina E.V., *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* (Handbook on chemical analysis of soils), Moscow: Izd-vo MGU, 1970, 487 p.
- Austin A., Ballarel C., Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems, *PNAS*, 2010, Vol. 107, No. 10, pp. 4619–4622.
doi/10.1073/pnas.0909396107
- Babich N.A., Aktual'nye problemy lesovosstanovleniya na Evropeiskom Severe Rossii v ramkakh perekhoda k intensivnoi modeli vedeniya lesnogo khozyaistva (Topical issues of reforestation in the European north of Russia in the context of switching to the intensive model of forest management), *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2013, No. 2(332), pp. 74–83.
- Babich N.A., Klevtsov D.N., Zapasy energii v kul'turakh sosny (Reserve of energy in pine cultures), *Lesnoi vestnik*, 2012, No. 1, pp. 38–41. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zapasy-energii-v-kulturah-sosny> (November 29, 2021).
- Bakhmet O., Medvedeva M., Variations in soil properties upon artificial reforestation in Karelia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2015, Vol. 8, No. 7, pp. 838–844.
doi 10.1134/S1995425515070033
- Berg B., Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils, *Forest Ecology and Management*, 2000, No. 133, pp. 13–22.
- Bezkorovainaya I.N., Antonov G.I., Ivanov V.V., Semenyakin D.A., Biologicheskaya aktivnost' pochv posle nesploshnykh rubok v sosnyakh Krasnoyarskoi lesostepi (Biological activity of soils after partial felling in pine forests of the Krasnoyarsk forest-steppe), *Khvoinye boreal'noi zony*, 2010, Vol. 27, No. 3–4, pp. 238–242.
- Boreal'nye lesa: sostoyanie, dinamika, ekosistemnye uslugi*, (Boreal forest: Health, dynamics and ecosystem services), Petrozavodsk: KarNTs RAN., Proc. of All-Russian Sci. Conf. with international participation, dedicated to the 60th anniversary of the Forest Institute of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017, 338 p.
- Cotrufo F., Soong J., Horton A., Campbe E., Haddix M., Wall D., Parton W., Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss, *Nature Geosciences*, 2015, Vol. 8, pp. 776–781.
doi.org/10.1038/ngeo2520
- Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Deneff K., Paul E., The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?, *Global Change Biolog.*, 2013, Vol. 19, No. 4, pp. 988–995.
- Dickenson C.H., Pugh G.J.F., *Biology of plant litter decomposition*, London, N.Y.: Academic press INC, 1974, Vol. 1, 133 p.
- Dymov A.A., Lapteva E.M., Milanovskiy E.Y., Izmenenie pochv i pochvennogo organicheskogo veshchestva v protsesse estestvennogo lesovozobnovleniya posle rubki sosnyaka brusnichno-zelenomoshnogo (Soil and soil organic matter changes during natural reforestation after felled cowberry-green moss pine forest), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoi vestnik*, 2012, No. 2(85), pp. 67–72.
- Fedorets N.G., Solodovnikov A.N., Tkachenko Y.N., Vodno-fizicheskie i agrokhimicheskie pokazateli pochv bazisnykh pitomnikov Karelii (Hydrophysical and agrochemical characteristics of soils in permanent nurseries in Karelia), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2016, No. 8, pp. 139–144.

- Germanova N.I., Medvedeva M.V., *Uchebno-metodicheskoe posobie po issledovaniyu mikrobootsenozov estestvennykh i antropogenno narushennykh pochv* (Study guide for the examination of natural and anthropogenically disturbed soils microbiocenoses), Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2010, 64 p.
- Karpachevskii L.O., Voronin A.D., Dmitriev E.A., Stroganova M.N., Shoba S.A., *Pochvenno-biogeotsenoticheskie issledovaniya v lesnykh biogeotsenozakh* (Soil and biogeocoenotic studies in forest biogeocoenoses), Moscow: Izd-vo MGU, 1980, 160 p.
- Kotilainen T., Setälä H., Alatalo I., Vuorisalo T., Saloniemi I., Impacts of chitinase-transformed silver birch on leaf decomposition and soil organism, *European J. Soil Biology*, 2004, No. 40, pp. 155–161.
doi 10.1016/j.ejsobi.2005.03.001
- Krishnal M., Litter decomposition in forest ecosystems: a review, *Energy, Ecology and Environment*, 2017, No. 2(4), pp. 236–249.
doi 10.1007/s40974-017-0064-9
- Larionova A.A., Kvitkina A.K., Bykhovets S.S., Lopes-De-Gerenyu V.O., Kolyagin Y.G., Kaganov V.V., Vliyanie azota na mineralizatsiyu i gumifikatsiyu lesnykh opadov v model'nom eksperimente (The contribution of nitrogen to mineralization and humification of forest litter in simulation study), *Lesovedenie*, 2017, No. 2, pp. 128–139.
- Lopes De Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Galibina N.A., Shorohova E.V., Kapitsa E.A., The effects of temperature and mineral nitrogen and phosphorus on the decay processes and composition of soil–bark substrates, *Eurasian Soil Science.*, 2021, Vol. 54, No. 1, pp. 49–62.
DOI 10.1134/S1064229321010087
- McGill W.B., Cole C.V., Comparative aspects of cycling of organic C, N, S, and P through soil organic matter, *Geoderma*, 1981, Vol. 26, pp. 267–286.
- Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii*, (Methods of soil biology and biochemistry), Moscow: MGU, 1987, 267 p.
- Morozova R.M., *Lesnye pochvy Karelii* (Forest soils in Karelia), Leningrad: Nauka, 1991, 184 p.
- Powers J.S., Montgomery R., Adair E., Brearley F., DeWalt S., Castanho C., Chave J., Deinert E., Ganzhorn J., Gilbert M., González-Iturbe J., Bunyavejchewin S., Grau H.R., Harms K., Hiremath A., Iriarte-Vivar S., Manzano E., Oliveira A.A., Poorter L., Ramanamanjato J.-B., Carl Salk, Varela A., Weiblen G. D., Lerdau M.T., Decomposition in tropical forests: a pan-tropical study of the effects of litter type, litter placement and mesofaunal exclusion across a precipitation gradient, *J. Ecology*, 2009, Vol. 97, No. 4, pp. 801–811.
doi 10.1111/j.1365-2745.2009.01515.x
- Qualls R.G., Richardson C., Phosphorus enrichment affects litter decomposition, immobilization and soil microbial phosphorus in wetland mesocosms; *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, Vol. 64, No. 2, pp. 799–808.
- Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Khromykhina 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, No. 10, pp. 1183–1194.
DOI 1110.1134/S1064229319100119
- Sofronova G.I., Trubino G.I., Shreders S.M., Makarevskii M.F., K metodike kolichestvennogo opredeleniya uglevodov v vegetativnykh organakh sosny obyknovЕННОI (On the method of quantitative determination of carbohydrates in the vegetative organs of Scotch pine), In: *Fiziologo-biokhimicheskie issledovaniya sosny na Severe* (Physiological and biochemical studies of pine in the North), Petrozavodsk: KarNTs RAN, 1978., pp. 119–133.
- Vauramo S., Setälä H., Decomposition of labile and recalcitrant litter types under different plant communities in urban soils, *Urban Ecosyst*, 2011, No. 14, pp. 59–70.
doi 10.1007/s11252-010-0140-9
- Xue-Feng Li, Shi-Jie Han, Yan-Ling Hu, Yu-Tao Zhao, Decomposition of litter organic matter and its relations to C, N and P release in secondary conifer and broadleaf mixed forest in Changbai Mountains, *The J. Applied Ecology*, 2008, Vol. 19, pp. 564–570.
- Yastrembovich N.I., Kalinin F.L., Opredelenie uglevodov i rastvorimyykh soedinenii azota v odnoi naveske rastitel'nogo materiala (Determination of carbohydrates and soluble nitrogen compounds in one sample of plant material), *Nauch. tr. Ukr akad. s.-kh. nauk*, 1962, Vol. 23, pp. 119–126.
- Zhang R.Q., Sun Z.J., Wang C., Ge Y., Li Y.L., Qiao Y.H., Pang J.Z., Zhang L.D., Eco-process of leaf litter decomposition in tropical rain forest in Xishuangbanna, China. I. Decomposition dynamic of mixed leaf litters, *J. Plant Ecol (Chin Vers)*, 2006, No. 30, pp. 780–790.
- Zvyagintsev D.G., *Pochva i mikroorganizmy* (Soil and microorganisms), Moscow: MGU, 1987, 256 p.

УДК 630*114.351+631.44.061

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЛЕСНЫХ ПОДСТИЛОК СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ¹

© 2022 г. Г. В. Ахметова*

Институт леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, Петрозаводск, Республика Карелия, 185910 Россия

**E-mail: akhmetovagv@gmail.com*

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 16.01.2022 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Лесная подстилка является важным компонентом таежных экосистем, и изучение трансформации ее характеристик, в том числе химического состава, представляет собой большой научный интерес в связи с ее высокой пространственной изменчивостью этого почвенного горизонта даже в пределах одного типа леса. Цель работы – выявление особенностей содержания макро- и микроэлементов в лесных подстилках и закономерностей изменения их химического состава на уровнях элементарных геохимических ландшафтов (ЭГХЛ) и растительных микрогруппировок (РМГ). Данное исследование проведено в среднетаежной подзоне Восточной Фенноскандии (республика Карелия) в Государственном заповеднике “Кивач”. В сосновом местообитании, сформированном на песчаных флювиогляциальных отложениях, заложена ландшафтно-геохимическая catena на пологом склоне озовой гряды. Проанализировано валовое содержание и содержание в подвижной форме макро- (K, Mg, Ca) и микроэлементов (Mn, Zn, Cu) в подгоризонтах лесной подстилки. Результат исследования показал, что содержание K, Mn, Zn и Cu подвержено сильному варьированию на всех изучаемых уровнях структурно-функциональной организации территории. Концентрация Mg и Ca варьирует менее значительно. Дисперсионный анализ полученных данных показал статистически значимое влияние ($p \leq 0.05$) выделенных факторов (ЭГХЛ и РМГ) на изменение содержания большинства макро- и микроэлементов. Динамика большинства изучаемых элементов с высокой степенью достоверности (R^2) описывается полиномиальной кривой второго порядка. Только для калия была выявлена обратная линейная зависимость от расположения в системе ЭГХЛ. Лесные подстилки водораздельных участков (элювиальный ЭГХЛ) и верхних частей склонов (трансэлювиальный ЭГХЛ) характеризуются накоплением калия, магния, цинка и меди по сравнению с подчиненными ЭГХЛ (трансаккумулятивный и аккумулятивный ЭГХЛ). Для кальция и марганца отмечается иная закономерность – максимальные их значения характерны для лесных подстилок почв, формирующихся на склонах в транзитных условиях, и высокое содержание данных элементов больше связано с высокими их концентрациями в доминирующем здесь виде растений – чернике.

Ключевые слова: лесная подстилка, среднетаежные экосистемы, макро- и микроэлементы, напочвенный покров, catena, элементарные геохимические ландшафты, растительная микрогруппировка.

DOI: 10.31857/S0024114822030020

Напочвенный растительный покров и лесная подстилка являются чрезвычайно важными элементами лесных биогеоценозов (Богатырев, 1990, 1997, 2013; Базилевич и др., 1986; Sayer, 2006; Hilli et al., 2010; Орлова и др., 2011, 2015; Титлянова, Шибарева, 2012). Подстилка является особым компонентом экосистемы, промежуточным звеном между растительностью, опадом и почвой (Богатырев, 1997), источником и хранилищем элементов минерального питания, средой обитания

живых организмов, основой первичного почвообразования и растительным субстратом (Лукина и др., 2010; Hilli et al., 2010; Телеснина и др., 2018; Lukina et al., 2019; Kuznetsova et al., 2021). Очень важно оценить направленность воздействия растительного покрова на почву, которое наиболее интенсивно проявляется в поверхностных органических горизонтах (Orlova et al., 2013; Семенюк и др., 2020). Как известно, неоднородность растительного покрова во многом определяет мозаичность и мелкоконтурность почвенного покрова, что наиболее четко отражается на свойствах их верхних горизонтов, формирующихся из растительного опада (Богатырев, Фомина, 1990; Vester-

¹ Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса).

dal, Raulund-Rasmussen, 1998; Tamminen, 2004; Nilsson, Wardle, 2005; Артемкина и др., 2018; Noreika et al., 2019). Роль живого напочвенного покрова и подстилки особенно значимы в таежных бореальных лесах, где фитомасса растительности подчиненных ярусов и ее ежегодный отпад сопоставимы с этими показателями древесного яруса (Hilli et al., 2010).

Подстилка служит интегральным показателем биологического круговорота, отражает основные направления функционирования экосистем, в своем строении и свойствах подчиняется биоклиматической зональности (Богатырев, 2013). Поэтому информация о различных характеристиках лесной подстилки также могут служить индикатором системы состояния лесных экосистем, что особенно значимо в условиях нарастания антропогенного влияния (Богатырев, 1990; Телесникова и др., 2018). Органогенные горизонты почвы, по сравнению с почвой, являются более лабильными компонентами таежных экосистем, варьирование их свойств на всех уровнях структурно-функциональной организации экосистемы чрезвычайно высоки, это создает определенные сложности при проведении исследований лесных почв (Семенюк и др., 2020). В последнее время увеличилось количество работ, направленных на выявление взаимосвязей растительного покрова и характеристик лесных подстилок на различных уровнях ее организации, начиная с элементарных биогеоценозов, так как именно на этом уровне происходит взаимодействие напочвенного покрова, опада и лесных подстилок (Лукина, 2010; Орлова, 2013; Орлова и др., 2015; Noreika et al., 2019; Семенюк и др., 2020). Большинство работ направлено на изучение морфологических признаков подстилок и особенностей накопления в ней органического вещества и азота, продуцирование CO_2 ; исследований, касающихся содержания других химических элементов недостаточно.

Изучение особенностей взаимосвязей в системе — «растение—лесная подстилка» в настоящее время также актуально в связи с тенденциями в изменении климатических показателей (Второй ..., 2014; Kuemmerle et al., 2015; Climate change ..., 2021) и растительного покрова (Epstein et al., 2004; Голубятников, Денисенко, 2009; Zellweger et al., 2020; Липка и др., 2021). Как известно, при повышении температуры ускоряются процессы разложения подстилки, происходит снижение их запасов (Попова, 2018), круговорот элементов-биогенов меняется — быстро освобождаются биогенные элементы и более активно вымывается калий в условиях промывного режима почв. Показано, что в зависимости от изменений климатических показателей будут меняться абсолютные величины аккумуляции и выщелачивания элементов (Шибарева, 2004).

Цель данной работы заключалась в выявлении особенностей содержания и закономерностей изменения химического состава лесных подстилок в зависимости от градиента расположения в ряду сопряженных почв и характера напочвенного покрова.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводились в Республике Карелия, в Государственном заповеднике «Кивач», который расположен в юго-восточной части Балтийского кристаллического щита в среднетаежной подзоне Восточной Фенноскандии. Кристаллическое основание и покрывающая его морена перекрыты мощными гравийно-галечными песчаными флювиогляциальными наносами, рельеф формируют высокие песчано-галечные гряды — озы, высота которых составляет 20 м. В понижениях рельефа формируются верховые и переходные болота и небольшие заболоченные лесные озера. Данный тип местности широко распространен на территории Карелии, он отличается средним и низким классом бонитета сосновых лесов (лишайниковых и зеленомошных), а также бедностью напочвенного растительного покрова.

Пробные площади заложены в ряду сопряженных элементарных геохимических ландшафтов (катене) — от элювиальных — на водоразделе, через транзитные (трансэлювиальные и трансэлювиально-аккумулятивные) — на склоне к подчиненным (аккумулятивные) элементам рельефа (рис. 1). На автоморфных позициях в элювиальных и трансэлювиальных ЭГХЛ под сосняками брусничными формируются подзолы иллювиально-железистые песчаные. Данные почвы широко распространены на территории Карелии и считаются фоновыми, имеют легкий гранулометрический состав, хорошо дренированы и имеют высокую степень аэрации. В нижней части склона оза неширокой полосой в периферийной части заболоченного участка леса под чернично-сфагновыми микрогруппировками подзолы иллювиально-железистые сменяются полугидроморфными почвами — торфяно-подзолами иллювиально-железистыми глеевыми. В подчиненных элементах рельефа в условиях заболоченного сосняка багульниково-сфагнового формируются торфяные и торфяно-глеевые почвы переходного типа. Более подробные описания почвенных условий даны в ранее вышедших работах (Ахметова, 2019, 2021).

Древостой представлен чистым сосновым насаждением (10С), возраст — 190 лет (до 220 лет), класс бонитета — III,4. Напочвенный покров отличается бедностью видового состава напочвенного покрова, что является характерным для песчаных флювиогляциальных ландшафтов (Крышень и др., 2006). Лишайниковые и брусничные растительные микрогруппировки отличаются

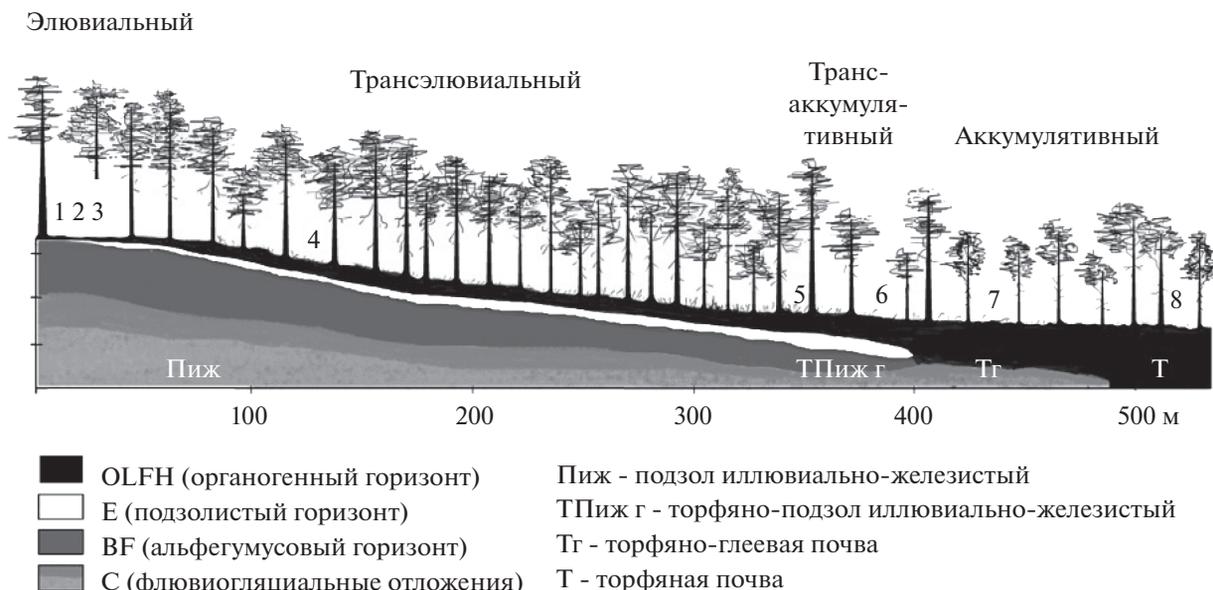


Рис. 1. Расположение пробных площадей в сопряженном ряду элементарных геохимических ландшафтов (1 – лишайниковая РМГ, 2 – зеленомошная РМГ, 3 – брусничная РМГ, 4 – черничная РМГ, 5 – черничная влажная РМГ, 6 – чернично-сфагновая РМГ, 7 – багульниково-сфагновая РМГ, 8 – сфагновая РМГ).

обилием и разнообразием лишайников, преобладают ягельные виды – кладония оленья (*Cladonia rangiferina*), цетрария исландская (*Cetraria islandica*). Среди зеленых мхов доминирует плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi*), реже встречаются гилокомиум блестящий (*Hylocomium splendens*) и птилиум гребенчатый (*Ptilium crista-castrensis*). В кустарничковом ярусе брусничных и черничных РМГ преобладают черника (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусника (*V. vitis-idaea* L.). На заболоченных участках широко распространены торфообразующие мхи – сфагнум магелланский (*Sphagnum magellanicum*) и политрихум обыкновенный (*Polytrichum commune*). Среди кустарничков, помимо черники и брусники, встречается багульник (*Lédum palústre*), реже голубика (*Vaccinium uliginósum*).

В элювиальном ЭГХЛ исследования проводились на трех выделенных растительных микрогруппировках (РМГ) – лишайниковой, зеленомошной, брусничной. В элювиально-транзитном изучались наиболее распространенные черничные микрогруппировки. В трансаккумулятивном ЭГХЛ выделены две растительные микрогруппировки – черничная влажная и чернично-сфагновая, в аккумулятивном – багульниково-сфагновая и сфагновая.

Отбор образцов лесной подстилки проводился в подкромовых позициях в 4–6-кратной повторности. Разделение подстилки на слои проводилось в зависимости от ее морфологии (Богатырев, Фомина, 1990; Tamminen et al., 2004; Орлова и др., 2015), фиксировались мощность каждого слоя и ее вес. Для оценки запасов подстилки использо-

вали почвенный бур диаметром 10 см. В лабораторных условиях было проведено определение абсолютной влажности образцов и рассчитан поправочный коэффициент. Содержание химических элементов (кальция, калия, магния, марганца, цинка, меди) определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААнаlyst 800 spectrometer). Определение содержания подвижных форм элементов проводили методом атомно-адсорбционной спектрометрии с извлечением ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4.8 (ААБ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лесная подстилка – один из наиболее динамичных элементов таежных экосистем, ее свойства подвержены существенным трансформациям в связи с изменениями условий произрастания фитоценозов (Богатырев, 1986; Орлова и др., 2011, 2015; Сергеева и др., 2020). Основные морфологические характеристики лесных подстилок: строение, мощность, запасы – существенно изменяются в соответствии с местоположением в системе ЭГХЛ и РМГ (рис. 2). Под лишайниковой растительностью формируется маломощная подстилка (0.5–1.5 см), и разделить ее на подгоризонты по степени гумификации не представлялось возможным. Для зеленомошно-кустарничковых РМГ характерна более мощная подстилка, она делилась на две части – опадочный ОЛ и ферментативный ОФ. Гумусированный слой ОН не выделялся из-за его дискретности и значительного количества включе-

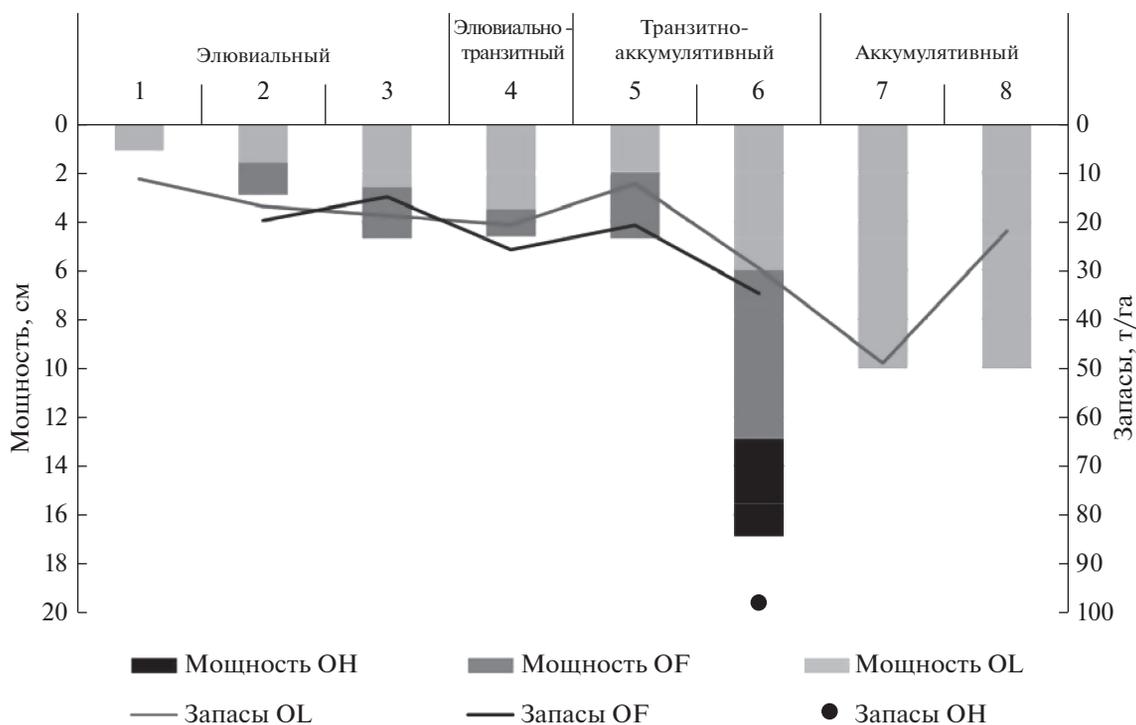


Рис. 2. Изменение мощности и запасов лесных подстилок, формирующихся в сопряженных элементарных ландшафтах под различными РМГ: 1 – лишайниковая РМГ, 2 – зеленомошная РМГ, 3 – брусничная РМГ, 4 – черничная РМГ, 5 – черничная влажная РМГ, 6 – чернично-сфагновая РМГ, 7 – багульниково-сфагновая РМГ, 8 – сфагновая РМГ.

ний минеральных частиц. В полугидроморфных позициях транзитного ландшафта формируется мощная оторфованная подстилка, где отчетливо выделяются OL, OF и OH слои. Торфяные почвы аккумулятивного ландшафта представляют собой мощный слой (40–60 см) слабо разложенного сфагнового мха, в процессе данного исследования расчеты велись для верхней 10-сантиметровой толщи торфа. Запасы лесной подстилки сильно варьируют в зависимости от растительного покрова и местоположения в рельефе. Наименьшие значения рассчитаны для подстилок, сформированных под лишайниковой растительностью – 6–16 т/га, в кустарничково-зеленомошных РМГ запасы подстилки в 2–3 раза выше. Максимальные значения характерны для полугидроморфных местообитаний – трансаккумулятивной ЭГХЛ (до 150 т/га).

Химический состав органогенных горизонтов исследуемых почв таежных экосистем характеризуется широким диапазоном данных. Рассчитаны статистические показатели содержания макро- и микроэлементов в лесных подстилках на разных уровнях организации исследуемой территории – от катены в целом и элементарных ландшафтов до изучения изменчивости внутри каждой выделенной РМГ (табл. 1).

Варьирование содержания макро- и микроэлементов в лесных подстилках изучаемых почв различается в зависимости от элемента и формы

его нахождения. Наименьшая изменчивость выявлена для магния и кальция, для них получены наименьшие значения коэффициентов вариации (10–40%) как внутри каждой выделенной РМГ, так и катены в целом. Содержание остальных изученных элементов подвержено более значительному варьированию, очень высокие коэффициенты вариации (до 100%) рассчитаны для данных валового содержания калия и микроэлементов – марганца, меди и цинка. Как известно, в подвижной форме содержание элементов характеризуется более сильным варьированием, наши данные это подтверждают отчасти. Диапазон разброса значений концентрации элементов в подвижной форме в целом для катены более широкий по сравнению с валовым содержанием, наибольшим коэффициентом вариации характеризуется подвижный марганец. Тогда как при расчете данных для отдельных ЭГХЛ выявлено, что содержание элементов в подвижной форме характеризуется таким же, а иногда и меньшим варьированием. Это может свидетельствовать о более сильных связях с характером растительного покрова.

В связи с тем, что при гумификации подстилки происходит изменение ее химического состава (Tamminen et al., 2004), слои лесных подстилок могут характеризоваться различным уровнем обеспеченности макро- и микроэлементами. Дисперсионный анализ (табл. 2) показал статистически

Таблица 1. Статистические показатели содержания макро- и микроэлементов в лесных подстилках почв на уровнях ЭГХЛ и РМГ

Уровень	Форма	Показатель	K	Mg	Ca	Mn	Zn	Cu
Катена	Вал.	ср ± ош.ср	680 ± 70	440 ± 22	3000 ± 250	234 ± 57	29.12 ± 3.1	4.7 ± 0.6
		CV, %	70	21	38	99	47	61
	Подв.	ср ± ош.ср	240 ± 44	131 ± 7	640 ± 34	44.1 ± 8.7	3.77 ± 0.44	0.42 ± 0.02
		CV, %	91	25	27	98	59	29
Элювиальный ЭГХЛ	Вал.	ср ± ош.ср	860 ± 87	470 ± 33	3384 ± 272	291 ± 54	34.69 ± 5.3	5.61 ± 1.21
		CV, %	31	21	24	56	47	66
	Подв.	ср ± ош.ср	307 ± 73	146 ± 8	674 ± 47	105.7 ± 17.3	5.26 ± 0.55	0.42 ± 0.03
		CV, %	83	18	24	57	36	26
Лишайни- ковая РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	860 ± 121	430 ± 19	3200 ± 400	180 ± 8	42.7 ± 12	5.1 ± 1.8
		CV, %	28	9	24	9	56	70
	Подв.	ср ± ош.ср	469 ± 210	138 ± 14	475 ± 44	11.3 ± 0.7	2.99 ± 0.28	0.44 ± 0.04
		CV, %	77	17	16	10	16	15
Зеленомошная РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	962 ± 80	461 ± 22	2870 ± 104	219 ± 27	33.8 ± 5.4	14.28 ± 6.2
		CV, %	14	8	6,3	60	28	76
	Подв.	ср ± ош.ср	428 ± 215	158 ± 16	864 ± 73	84.1 ± 7.7	6.43 ± 1.17	0.32 ± 0.04
		CV, %	87	18	15	16	31	21
Брусничная РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	541 ± 142	443 ± 70	4000 ± 790	328 ± 75	33.8 ± 5.4	14.28 ± 6.3
		CV, %	46	27	34	60	28	76
	Подв.	ср ± ош.ср	354 ± 39	149 ± 5	638 ± 11	148.4 ± 11.8	5.35 ± 0.93	0.48 ± 0.1
		CV, %	19	6	3	14	30	35
Транс-элюви- альный ЭГХЛ	Вал.	ср ± ош.ср	470 ± 132	417 ± 22	4000 ± 350	372 ± 138	26.4 ± 6.26	5.32 ± 1.7
		CV, %	48	9	15	78	41	54
Черничная РМГ	Подв.	ср ± ош.ср	166 ± 14	144 ± 26	680 ± 58	147.9 ± 8.2	5.40 ± 1.05	0.48 ± 0.05
		CV, %	15	32	15	10	34	17
Трансаккумуля- тивный ЭГХЛ	Вал.	ср ± ош.ср	410 ± 170	381 ± 81	2240 ± 508	135 ± 72	24.2 ± 4.87	3.50 ± 0.35
		CV, %	64	37	40	93	35	17
	Подв.	ср ± ош.ср	177 ± 29	126 ± 10	724 ± 62	60.6 ± 35	3.28 ± 1.3	0.37 ± 0.1
		CV, %	26	28	28	93	63	36
Черничная влажная РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	263 ± 18	350 ± 19	1550 ± 270	2.64 ± 4.3	17.1 ± 0.2	3.4 ± 0.46
		CV, %	12	9	30	28	1.3	24
	Подв.	ср ± ош.ср	189 ± 38	151 ± 18	904 ± 16	109.5 ± 15.0	4.84 ± 1.06	0.43 ± 0.08
		CV, %	35	21	3	24	38	30
Чернично- сфагновая РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	516 ± 21	400 ± 99	2930 ± 230	178 ± 50	31.3 ± 2.4	3.65 ± 0.36
		CV, %	24	57	14	28	11	17
	Подв.	ср ± ош.ср	165 ± 9	101 ± 8	543 ± 35	11.6 ± 1.8	1.72 ± 0.17	0.32 ± 0.08
		CV, %	9	13	11	27	17	43
Аккумулятив- ный ЭГХЛ	Вал.	ср ± ош.ср	638 ± 116	460 ± 32	2680 ± 246	25.3 ± 5.,2	19.9 ± 4.5	3.2 ± 0.2
		CV, %	31	12	16	36	11	11
	Подв.	ср ± ош.ср	45 ± 6	103 ± 11	510 ± 34	2.7 ± 1.0	1.70 ± 0.45	0.43 ± 0.06
		CV, %	35	25	16	92	65	31
Багульниково- сфагновая РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	73 ± 6	432 ± 3	2202 ± 190	25 ± 1	14.2 ± 1	3.3 ± 1
		CV, %	29	20	18	10	16	12
	Подв.	ср ± ош.ср	47 ± 12	87 ± 9	536 ± 61	1.9 ± 0.7	0.55 ± 0.22	0.44 ± 0.1
		CV, %	45	18	20	64	68	40
Сфагновая РМГ	Вал.	ср ± ош.ср	590 ± 150	471 ± 41	2900 ± 94	25.8 ± 2.6	22.7 ± 4.9	3.18 ± 0.27
		CV, %	44	15	5,6	12	37	15
	Подв.	ср ± ош.ср	35 ± 7	119 ± 15	483 ± 39	2.2 ± 0.9	1.82 ± 0.36	0.42 ± 0.07
		CV, %	35	22	14	69	34	28

Примечание: ср ± ош.ср – среднее арифметическое ± ошибка среднего, мг/кг; CV, % – коэффициент вариации.

Таблица 2. Дисперсионный анализ (ANOVA) влияния факторов на химический состав лесных подстилок (даны значение уровня значимости p , при $p \leq 0.05$ – влияние значимо, >0.05 – не значимо)

Фактор	Форма	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu
Степень разложения	Валовая	0.001	0.05	0.01	0.006	0.04	0.002
	Подвижная	0.002	0.04	0.01	0.033	0.002	0.02
ЭГХЛ	Валовая	0.001	0.1	0.07	0.0007	0.17	0.37
	Подвижная	7.8×10^{-7}	0.04	0.00002	2×10^{-6}	7×10^{-7}	0.33
РМГ	Валовая	0.0009	0.3	0.4	0.004	9.8×10^{-7}	0.3
	Подвижная	3.4×10^{-11}	1×10^{-10}	1.4×10^{-6}	1×10^{-14}	2.6×10^{-7}	0.006

значимое влияние ($p \leq 0.05$) на содержание большинства изучаемых макро- и микроэлементов степени разложения подстилки. Рассчитанные в ранее проведенных исследованиях (Ахметова, 2021) коэффициенты биологического поглощения этих элементов имеют высокие значения и показывают, что они относятся к группе элементов энергичного (Mn, K, Ca) и сильного (Mg, Zn, Cu) биогенного накопления, т.е. активно включаются в круговорот. Поэтому, в той или иной степени, с увеличением гумификации наблюдается снижение содержания элементов, наиболее быстро “теряется” из подстилки калий.

На химический состав лесных подстилок почв таежных экосистем влияет множество факторов (как природных, так и антропогенных), в данном исследовании изучалось влияние особенностей напочвенного растительного покрова (уровень РМГ), сопряженного с изменением в положении в рельефе и соответственного увеличения степени гидроморфизма (уровень ЭГХЛ). Дисперсионный анализ (табл. 2) показал статистически значимое влияние ($p \leq 0.05$) данных факторов в связи с изменением содержания большинства макро- и микроэлементов. Отмечается, что концентрация элементов в подвижной форме более чутко реагирует на смену растительного сообщества, в связи с этим рекомендуется для оценки экологической ситуации использовать доступные растениям соединения (Нечаева 1985, Lukina et al., 2019).

Регрессионный анализ дополнил информацию к полученным закономерностям и показал, что изменение содержания большинства изучаемых макро- и микроэлементов с высокой степенью достоверности (R^2) описывается полиномиальной кривой второго порядка (рис. 3). Только для калия была выявлена иная закономерность. Известно, что калий активно вымывается атмосферными осадками из крон древостоев, опада, лесной подстилки и верхней минеральной части почвы, его миграционная активность ослабевает на глубине почвы 20–40 см (Нечаева, 1985; Титлянова, 2014; Кожевникова и др., 2017). Анализ полученных данных показал достоверное влияние на содержание данного элемента в лесных

подстилках месторасположения почвы в ряду сопряженных ЭГХЛ – с нарастанием увлажнения (от элювиального к аккумулятивному ЭГХЛ) наблюдается существенное снижение содержания данного макроэлемента. Этот тренд особенно отчетливо прослеживается для подвижной формы калия, тогда как для валового калия эта закономерность больше характерна для подгоризонта OF. В вышележащем подгоризонте OL большее влияние на содержание калия оказывает характер напочвенной растительности. Отмечается, что в наиболее распространенном виде растений в сфагновых РМГ– сфагнума магелланского содержание калия высокое (Ахметова, 2021), поэтому концентрация валового калия в торфе довольно велика, однако в нижних слоях торфа его количество резко снижается на порядок. В связи с этим тренды зависимости содержания валового калия отличаются для разных подгоризонтов подстилки (рис. 2). Для подвижного калия данной взаимосвязи не выявлено, хорошо прослеживается тренд снижения содержания калия во всех подгоризонтах лесных подстилок в соответствии с увеличением увлажнения, который аппроксимируется обратной линейной зависимостью с очень высокой величиной достоверности аппроксимации ($R^2 = 0.7–0.9$).

Изменчивость уровня концентрации магния и кальция в подстилках изучаемых почв, по сравнению с калием, намного ниже. Также для данных макроэлементов выявлены иные закономерности варьирования их содержания в лесных подстилках. Магний и кальций, несмотря на то, что являются довольно активными водными мигрантами в почве, более устойчивы при разложении органических остатков (Артемкина и др., 2018) по сравнению с калием и медленнее выносятся из опада, подстилки и почвы в целом. Не выявлено четких закономерностей изменения валового содержания кальция и магния при смене состава напочвенного покрова и нарастания гидроморфизма. Есть тенденция к увеличению содержания кальция в подстилках почв, сформированных под черничными и, в меньшей мере, под брусничными РМГ, что может быть связано с повышенной концентрацией кальция в кустарничках, особенно в

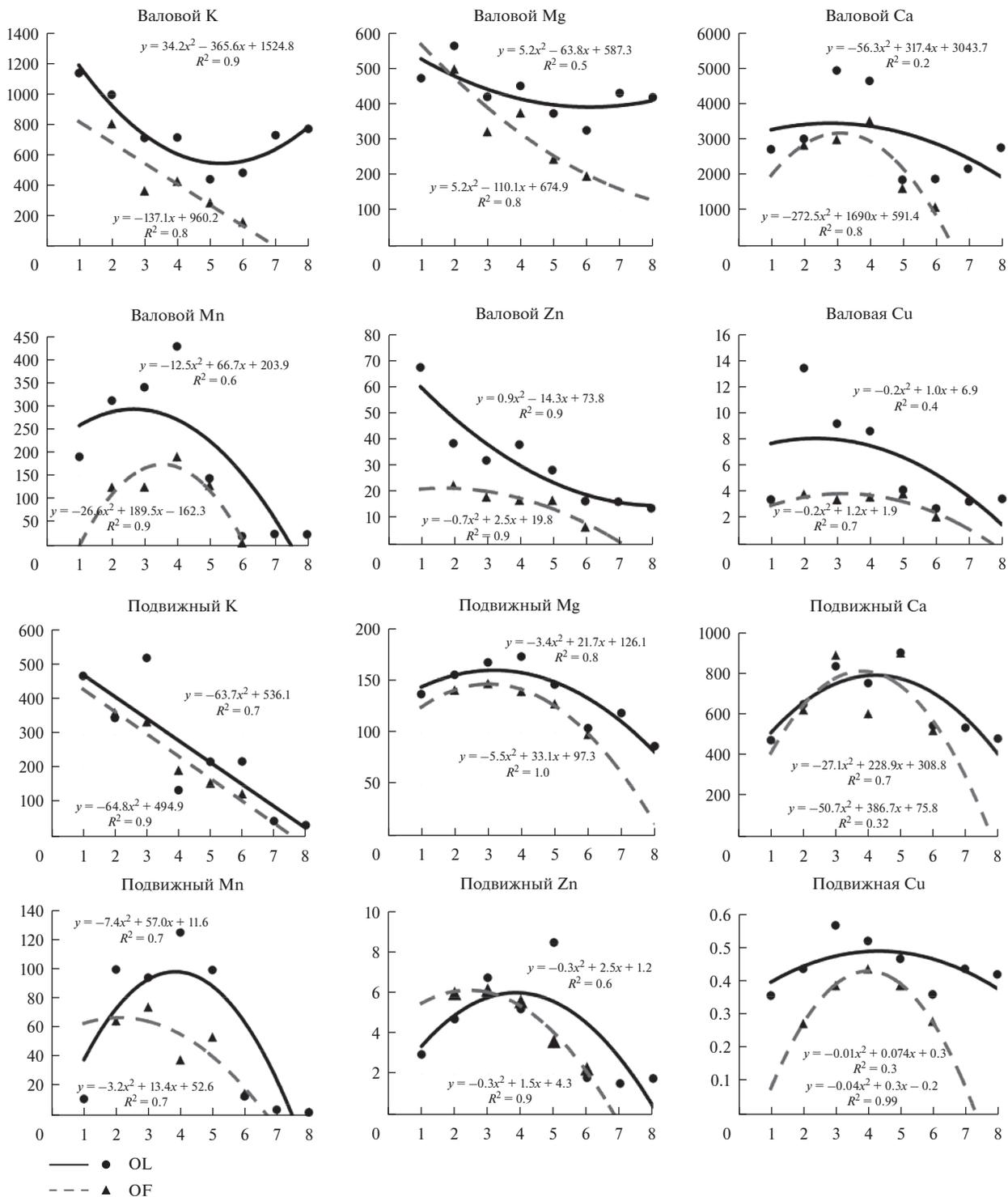


Рис. 3. Зависимость содержания (мг/кг) биогенных макро- и микроэлементов в подгоризонтах лесной подстилки от расположения в градиенте ЭГХЛ + РМГ (элювиальный ЭГХЛ: 1 — лишайниковая РМГ, 2 — зеленомошная РМГ, 3 — брусничная РМГ; трансэлювиальный: 4 — черничная РМГ; трансаккумулятивный: 5 — черничная влажная РМГ, 6 — чернично-сфагновая РМГ; аккумулятивный: 7 — багульниково-сфагновая РМГ, 8 — сфагновая РМГ).

чернике (Лукина и др., 2008). Однако наблюдается резкое снижение содержания кальция в подстилке черничной РМГ, сформированной в более влажных условиях — в трансэлювиальном ландшафте. Что

касается подвижных форм рассматриваемых макроэлементов, выявлена достоверная связь изменения их концентрации, особенно магния, связанная с нарастанием степени гидроморфизма и

изменения РМГ. Максимальные концентрации подвижных форм элементов отмечены в подстилках верхних склоновых участков, занятых брусничными и черничными РМГ. Выявленный тренд описывается полиномом второго порядка с высокой степенью достоверности – $R^2 = 0.7–0.9$.

Марганец характеризуется наибольшей биогенностью среди изучаемых элементов, он является индикатором биогеохимических циклов в таежных ландшафтах (Нечаева, 1985) в связи с изменением валентного состояния в зависимости от окислительно-восстановительных условий. Выявлены достоверные различия степени накопления в подстилках, связанные с характером растительного покрова, приуроченность данного микроэлемента к кустарничкам рода *Vaccinium* – чернике и бруснике известна (Нечаева, 1985; Лукина и др., 2008), особенно богаты марганцем листья черники. В связи с этим лесные подстилки черничных РМГ отличаются наиболее высокой концентрацией данного микроэлемента; как валовый, так и подвижный марганец содержится в подстилках кустарничковых РМГ в 3–4 и более раз больше, чем в остальных рассматриваемых РМГ. Очень низкие значения данного микроэлемента отмечены в оторфованных подстилках торфяных почв багульниково-сфагновых и сфагновых РМГ. Изменение содержания марганца в зависимости от РМГ и степени увлажнения хорошо аппроксимируется полиномиальной функцией с $R^2 = 0.6–0.7$.

Цинк и медь также относятся к группе с сильным биологическим накоплением, они активно участвуют в биогенном круговороте и накапливаются в подстилке, но закономерности изменения данных микроэлементов различаются.

Для цинка так же, как и для марганца, прослеживается тенденция к изменению его концентрации в подстилках в соответствии с изменением растительного сообщества, и в зависимости от степени гидроморфизма, выявленный тренд хорошо описывается полиномиальной функцией с R^2 более 0.9. Максимальные значения данного микроэлемента выявлены в лишайниковой РМГ, наименьшие – в оторфованной подстилке сфагновых РМГ. Характер изменения содержания подвижного цинка иной. Отмечена приуроченность его максимального количества, так же, как и марганца, в подстилках элювиальных и трансэлювиальных позиций, сформированных под брусничными и черничными РМГ, в оторфованных подстилках (чернично-сфагновой, багульниково-сфагновой и сфагновой РМГ) его концентрация резко снижается.

Варьирование содержания меди в лесных подстилках, даже внутри каждой выделенной РМГ, довольно высокое, особенно высокие значения коэффициентов вариации отмечены для подвижной формы элемента в подстилках элювиального

ЭГХЛ. Что касается роли растительного покрова и расположения в градиенте увлажнения в изменении валового содержания данного микроэлемента, достоверной закономерности выявлено не было. Для подвижной меди наблюдается связь его содержания с изменением характера растительности, выявлена наблюдаемая для кальция и марганца приуроченность наибольшей концентрации ее в подстилках черничных РМГ.

Таким образом, наблюдается отмечаемая Л.Г. Богатыревым для органического вещества подстилок таежных экосистем (Богатырев, 2013) приуроченность наибольшего содержания макро- и микроэлементов в органогенных горизонтах транзитных ландшафтах, что в значительной степени связано с характером растительного напочвенного покрова – преобладанием кустарничков рода *Vaccinium*, для которых характерна высокая биохимическая активность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в сопряженном ряду почв сосновых древостоев флювиогляциальных равнин, позволили оценить особенности строения и химического состава лесных подстилок и определить закономерности изменения их свойств в зависимости от расположения в градиенте увлажнения и растительного напочвенного покрова. Основные морфологические характеристики лесных подстилок: строение, мощность, запасы – подвержены значительному варьированию, мощность подстилки и ее запасы имеют наименьшие значения в элювиальной ЭГХЛ в лишайниковой РМГ, максимальных значений эти параметры достигают в оторфованной подстилке трансаккумулятивной ЭГХЛ под чернично-сфагновой РМГ.

Пространственная неоднородность содержания макро- и микроэлементов в подстилках различается в зависимости от элемента и формы его нахождения. Наименьшая изменчивость выявлена для магния и кальция, содержание остальных изученных элементов подвержено более значительному варьированию.

Дисперсионный анализ полученных данных показал статистически значимое влияние ($p \leq 0.05$) выделенных факторов (ЭГХЛ и РМГ) на содержание большинства макро- и микроэлементов в органогенных горизонтах почв. Динамика содержания большинства элементов с высокой степенью достоверности (R^2) описывается полиномиальной кривой второго порядка. Только для калия была выявлена обратная линейная зависимость от расположения в системе ЭГХЛ. В целом лесные подстилки водораздельных участков (элювиальный ЭГХЛ) и верхних частей склонов (трансэлювиальный ЭГХЛ) характеризуются

накоплением калия, магния, цинка и меди, по сравнению с подчиненными ЭГХЛ (трансаккумулятивным и аккумулятивным ЭГХЛ). Для кальция и марганца отмечается иная закономерность — максимальные значения характерны для лесных подстилок почв, формирующихся на склонах в транзитных условиях, и высокое содержание данных элементов связано с высокими их концентрациями в доминирующем здесь виде растений — чернике.

Данные были получены с использованием оборудования ЦКП “Аналитическая лаборатория” ИЛ КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артекина Н.А., Орлова М.А., Лукина Н.В.* Микромозаика растительности и вариабельность химического состава L-горизонтов подстилки северотаежных ельников кустарничково-зеленомошных // *Лесоведение*. 2018. № 2. С. 97–106.
<https://doi.org/10.7868/S002411481802002X>
- Ахметова Г.В.* Геохимические особенности почв волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины средне-таежной подзоны Карелии // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2019. № 100. С. 53–82.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-100-53-82>
- Ахметова Г.В.* Особенности распределения макро- и микроэлементов в системе “почва-растение” в среднетаежных условиях Восточной Фенноскандии // *Труды КарНЦ РАН*. 2021. № 5. С. 5–19.
<https://doi.org/10.17076/eco1228>
- Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.
- Богатырев Л.Г.* О классификации лесных подстилок // *Почвоведение*. 1990. № 3. С. 118–127.
- Богатырев Л.Г.* О роли гетерогенности подстилок в функционировании лесных биогеоценозов // *Общие проблемы биогеоценологии*. М.: АН СССР. 1986. С. 227–229.
- Богатырев Л.Г.* Образование подстилок — один из важнейших процессов в лесных экосистемах // *Почвоведение*. 1997. № 4. С. 501–512.
- Богатырев Л.Г., Фомина Т.В.* Диагностика нижних горизонтов лесных подстилок // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 1990. № 1. С. 54–56.
- Богатырев Л.Г.* Географические аспекты функционирования лесных подстилок // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2013. № 1. С. 30–36.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1006 с.
- Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А.* Влияние климатических изменений на растительный покров Европейской России // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2009. № 2. С. 57–68.
- Кожеевникова Н.К., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Лунаков С.Ю., Шамов В.В.* Водная миграция макроэлементов в хвойно-широколиственных лесах Сихотэ-Алиня // *Сибирский лесной журн*. 2017. № 3. С. 60–73.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20170306>
- Крышень А.М., Рудковская О.А., Преснухин Ю.В., Тимофеева В.В.* Морфоструктура напочвенного покрова основных типов лесных сообществ заповедника “Кивач” (средняя тайга) // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2006. Вып. 10. С. 54–62.
- Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолотчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М.* Роль лесов в адаптации природных систем к изменению климата // *Лесоведение*. 2021. № 5. С. 531–546.
<https://doi.org/10.31857/S0024114821050077>
- Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г.* Плодородие лесных почв как основа взаимосвязи почва-растительность // *Лесоведение*. 2010. № 5. С. 45–56.
- Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А.* Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 342 с.
- Нечаева Е.Г.* Ландшафтно-геохимический анализ динамики таежных геосистем. Иркутск: Институт географии СО АН РАН, 1985. 210 с.
- Орлова М.А.* Элементарная единица лесного биогеоценологического покрова для оценки эко системных функций лесов // *Тр. Карельского НЦ. Сер. Экологические исследования*. 2013. № 6. С. 126–132.
- Орлова М.А., Лукина Н.В., Камаев И.О., Смирнов В.Э., Кравченко Т.В.* Мозаичность лесных биогеоценозов и плодородие почв // *Лесоведение*. 2011. № 6. С. 39–48.
- Орлова М.А., Лукина Н.В., Смирнов В.Э.* Методические подходы к отбору образцов лесной подстилки с учетом мозаичности лесных биогеоценозов // *Лесоведение*. 2015. № 3. С. 214–221.
<https://doi.org/10.31857/S0033994620010045>
- Попова Н.В.* Типизация напочвенных органогенных горизонтов в основных почвенно-фитоценологических экосистемах и индикация их состояния по параметрам деструктивной ветви малого биологического круговорота: автореф. дис. д. биол. наук: 03.02.08. Владимир, 2018. 47 с.
- Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецов Я.Д.* Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // *Почвоведение*. 2020. № 1. С. 31–43.
- Сергеева О.В., Мухортова Л.В., Кривобоков Л.В.* Распределение запасов подстилки и биомассы живого напочвенного покрова в северной тайге центральной Эвенкии в зависимости от рельефа // *Сибирский лесной журн*. 2020. № 1. С. 38–46.
<https://doi.org/10.15372/SJFS20200104>
- Телеснина В.М., Семенюк О.В., Богатырев Л.Г. и др.* Особенности напочвенного покрова и лесных подстилок в искусственных липовых насаждениях в зависимости от характера ухода // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. 2018. № 2. С. 3–11.
- Титлянова А.А., Шибарева С.В.* Подстилки в лесных и травяных экосистемах. Новосибирск: СО РАН, 2012. 137 с.
- Шибарева С.В.* Запасы и элементный состав подстилок в лесных и травяных экосистемах Сибири: автореф. дис. ... к. биол. наук: 03.00.27. Новосибирск, 2004. 24 с.

- Choudhary D. K., Mishra Arti, Varma Ajit.* Climate Change and the Microbiome: Sustenance of the Ecosphere. Springer Nature, 2021. 748 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-76863-8>
- Epstein H.E., Calef M.P., Walker M.D., Chapin F.S., Starfield A.M.* Detecting changes in arctic tundra plant communities in response to warming over decadal time scales // *Global Change Biology*. 2004. № 10. P.1325–1334.
- Hilli S., Starka S., Derome J.* Litter decomposition rates in relation to litter stocks in boreal coniferous forests along climatic and soil fertility gradients // *Appl. Soil Ecol.* 2010. № 46. P. 200–208.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.012>
- Kuemmerle T., Kaplan J.O., Prishchepov A.V., Rylsky I., Chaskovskyy O., Tikunov V.S., Müller D.* Forest transitions in Eastern Europe and their effects on carbon budgets // *Global Change Biology*. 2015. V. 21. № 8. P. 3049–3061.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12897>
- Kuznetsova A.I., Geraskina A.P., Lukina N.V., Smirnov V.E., Tikhonova E.V., Shevchenko N.E., Gornov A.V., Ruchinskaya E.V., Tebenkova D.N.* Linking Vegetation, Soil Carbon Stocks, and Earthworms in Upland Coniferous–Broadleaf Forests // *Forests*. 2021. № 12. P. 1179.
<https://doi.org/10.3390/f12091179>
- Lukina N.V., Tikhonova E.V., Danilova M.A., Bakhmet O.N., Kryshen A.M., Tebenkova D.N., Kuznetsova A.I., Smirnov V.I., Braslavskaya T.Yu., Gornov A.V., Shashkov M.P., Knyazeva S.V., Kataev A.D., Isaeva L.G., Zukert N.V.* Associations between forest vegetation and the fertility of soil organic horizons in northwestern Russia // *Forest Ecosystems*. 2019. № 6. P. 34.
<https://doi.org/10.1186/s40663-019-0190-2>
- Nilsson M.-Ch., Wardle D.A.* Understorey vegetation as a forest ecosystem driver: evidence from the northern Swedish boreal forest // *Front. Ecol. Environ.* 2005. V. 3. № 8. P. 421–428.
- Noreika N., Helm A., Öpik M., Jairus T., Vasar M., Reier Ü., Kook E., Riibak K., Kasari L., Tullus H., Tullus T., Lutter R., Oja E., Saag A., Randlane T. and Pärtel M.* Forest biomass, soil and biodiversity relationships originate from biogeographic affinity and direct ecological effects // *Oikos*, 2019. № 128. P. 1653–1665.
<https://doi.org/10.1111/oik.06693>
- Orlova M.A., Lukina N.V., Tutubalina O.V. et al.* Soil nutrient's spatial variability in forest–tundra ecotones on the Kola Peninsula, Russia // *Biogeochemistry*. 2013. V. 113. № 1–3. P. 283–305.
- Sayer E.J.* Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems // *Biological Reviews*. 2006. № 81. P. 1–31.
- Tamminen P., Starr M., Kubin E.* Element concentrations in boreal, coniferous forest humus layers in relation to moss chemistry and soil factors// *Plant and soil*. 2004. V. 259. № 1–2. P. 51–58.
- Vesterdal L., Raulund-Rasmussen K.* Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient // *Canadian J. Forest Research*. 1998. V. 28. № 11. P. 1636–1647.
<https://doi.org/10.1139/cjfr-28-11-1636>
- Zellweger F., De Frenne P., Lenoir J., Vangansbeke P., Verheyen K., Bernhardt-Römermann M., Baeten L., Hédl R., Berki I., Brunet J., Van Calster H., Chudomelová M., Decocq G., Dirnböck T., Durak T., Heinken T., Jaroszewicz B., Kopecký M., Máliš F., Macek M., Marek M., Naaf T., Nagel T.A., Ortman-Ajkai A., Petřík P., Pielech R., Reczyńska K., Schmidt W., Standovár T., Świerkosz K., Teleki B., Vild O., Wulf M., Coomes D.* Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming // *Science*. 2020. V. 368. № 6492. P. 772–775.
<https://doi.org/10.1126/science.aba6880>

Spatial Heterogeneity of the Forest Litter's Chemical Composition in Pine Stands of the Eastern Fennoscandia's Middle Taiga

G. V. Akhmetova*

Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the RAS, Pushkinskaya st. 11, Petrozavodsk, 185910 Russia

**E-mail: akhmetovagv@gmail.com*

Forest litter is an important component of taiga ecosystems, and the study of its characteristics' transformation, including changes in its chemical composition, is an important scientific problem due to the high spatial variability of litter even within the same forest type. The aim of the work was to identify the features of the macro- and microelements contents and the patterns of their changes on the levels of elementary geochemical landscapes (EGCL) and plant microgroups (PMG). This study was carried out in the middle taiga subzone of the Eastern Fennoscandia (Republic of Karelia) in the Kivach State Reserve. In a pine habitat formed on sandy fluvioglacial deposits, a landscape-geochemical catena was established on the slight slope of the esker ridge. The total content of the mobile forms of macro- (K, Mg, Ca) and microelements (Mn, Zn, Cu) in the forest litter subhorizons was analysed. The result of the study showed that the content of K, Mn, Zn and Cu was subject to significant variation on all studied levels of the structural and functional territory organization. The concentrations of Mg and Ca varied less significantly. Dispersion analysis of the data obtained showed a statistically significant effect ($p \leq 0.05$) of the selected factors (EGCL and PMG) on changes in the most macro- and microelements contents. The dynamics of most of the studied elements could be described by a polynomial curve of the second order with a high degree of reliability (R^2). Only for potassium, an inverse linear dependence on the location in the EGCL system was revealed. Forest litters of watershed areas (eluvial EGCLs) and upper slopes (trans-eluvial EGCLs) were characterized by accumulation of potassium, magnesium, zinc and copper compared to subordinate EGCLs (trans-accumulative and accumulative EGCLs). For

calcium and manganese, a different pattern was noted: the maximum values were characteristic of the forest litter of soils formed on slopes under transit conditions, and the high content of these elements is more associated with their high concentrations in the local dominant plant species, a bilberry.

Keywords: forest litter, ecosystems of middle taiga, macro- and microelements, ground cover, catena, elementary geochemical landscapes, plant microgroups.

Acknowledgements: The study was financed from the Federal budget within the framework of a State contract with the Karelian Research Centre of the RAS (Forest Research Institute).

REFERENCES

- Akhmetova G.V., Geokhimiicheskie osobennosti pochv volnistoi ozerno-lednikovoi peschanoi ravniny srednetaezhnoi podzony Karelii (Geochemical features of soils in an undulating glaciolacustrine sandy plain in the middle taiga subzone of Karelia), *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2019, No. 100, pp. 53–82.
DOI 10.19047/10136-11694-12019-19100-19053-19082
- Akhmetova G.V., Osobennosti raspredeleniya makro- i mikroelementov v sisteme "pochva-rastenie" v srednetaezhnykh usloviyakh Vostochnoi Fennoskandii (Distribution patterns of macro- and microelements in the "soil-plant" system in the middle taiga of Eastern Fennoscandia), *Trudy KarNTs RAN*, 2021, No. 5, pp. 5–19.
DOI 10.17076/eco11228.
- Artemkina N.A., Orlova M.A., Lukina N.V., Micromosaic structure of vegetation and variability of the chemical composition of L layer of the litter in dwarf shrub–green moss spruce forests of the northern taiga, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 7, pp. 754–761.
- Bazilevich N.I., Grebenshchikov O.S., Tishkov A.A., *Geograficheskie zakonomernosti struktury i funktsionirovaniya ekosistem* (Geographic patterns of ecosystems' structure and functioning), Moscow: Nauka, 1986, 296 p.
- Bogatyrev L.G., Fomina T.V., Diagnostika nizhnikh gorizontov lesnykh podstilok (Diagnostics of the lower horizons of forest litter), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 1990, No. 1, pp. 54–56.
- Bogatyrev L.G., Geograficheskie aspekty funktsionirovaniya lesnykh podstilok (Geographical aspects of the litter), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*, 2013, No. 1, pp. 30–36.
- Bogatyrev L.G., O klassifikatsii lesnykh podstilok (On forest litter classification), *Pochvovedenie*, 1990, No. 3, pp. 118–127.
- Bogatyrev L.G., O roli geterogenosti podstilok v funktsionirovaniy lesnykh biogeotsenozov (On the role of litter heterogeneity in the forest biogeocenoses functioning), In: *Obshchie problemy biogeotsenologii* (General issues of biogeocenology), Moscow: AN SSSR, 1986, pp. 227–229.
- Bogatyrev L.G., Obrazovanie podstilok - odin iz vazhneyshikh protsessov v lesnykh ekosistemakh (Litters formation as one of the most important processes in forest ecosystems), *Pochvovedenie*, 1997, No. 4, pp. 501–512.
- Choudhary D.K., Mishra Arti, Varma Ajit., *Climate Change and the Microbiome: Sustenance of the Ecosphere*, Springer Nature, 2021, 748 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-76863-8>
- Epstein H.E., Calef M.P., Walker M.D., Chapin F.S., Starfield A.M., Detecting changes in arctic tundra plant communities in response to warming over decadal time scales, *Global Change Biology*, 2004, No. 10, pp. 1325–1334.
- Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A., Vliyaniye klimaticheskikh izmeneniy na rastitel'nyi pokrov Evropeiskoi Rossii (Influence of climate changes on the vegetation of European Russia), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2009, No. 2, pp. 57–68.
- Hilli S., Starka S., Derome J., Litter decomposition rates in relation to litter stocks in boreal coniferous forests along climatic and soil fertility gradients, *Appl. Soil Ecol.*, 2010, No. 46, pp. 200–208.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.012>
- Kozhevnikova N.K., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G., Lupakov S.Y., Shamov V.V., Vodnaya migratsiya makroelementov v khvoino-shirokolistvennykh lesakh Sikhote-Alinya (Water migration of macroelements in coniferous broad-leaved forests of Sikhote-Alin), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 3, pp. 60–73.
DOI 10.15372/SJFS20170306.
- Kryshen' A.M., Rudkovskaya O.A., Presnukhin Y.V., Timofeeva V.V., Morfostruktura napochvennogo pokrova osnovnykh tipov lesnykh soobshchestv zapovednika "Kivach" (srednyaya taiga) (Morphostructure of the ground cover in major forest community types in the "Kivach" strict nature reserve (middle taiga)), *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN.*, 2006, Vol. 10, pp. 54–62.
- Kuemmerle T., Kaplan J.O., Prishchepov A.V., Rylsky I., Chaskovskyy O., Tikunov V.S., Müller D., Forest transitions in Eastern Europe and their effects on carbon budgets, *Global Change Biology*, 2015, Vol. 21, No. 8, pp. 3049–3061.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12897>
- Kuznetsova A.I., Geraskina A.P., Lukina N.V., Smirnov V.E., Tikhonova E.V., Shevchenko N.E., Gornov A.V., Ruchinskaya E.V., Tebenkova D.N., Linking Vegetation, Soil Carbon Stocks, and Earthworms in Upland Coniferous–Broadleaf Forests, *Forests*, 2021, No. 12, pp. 1179.
<https://doi.org/10.3390/f12091179>
- Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.Y., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Y., Semenov S.M., Rol' lesov v adaptatsii prirodnykh sistem k izmeneniyam klimata (A role of forests in natural systems' adaptation to climate change), *Lesovedenie*, 2021, No. 5, pp. 531–546.
DOI 10.31857/S0024114821050077
- Lukina N.V., Orlova M.A., Isaeva L.G., Forest soil fertility: the base of relationships between soil and vegetation, *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, Vol. 4, No. 7, pp. 725–733.
- Lukina N.V., Polyanskaya L.M., Orlova M.A., *Pitatel'nyi rezhim pochv severotaezhnykh lesov* (Nutritional regime of the north taiga soils), Moscow: Nauka, 2008, 342 p.

- Lukina N.V., Tikhonova E.V., Danilova M.A., Bakhmet O.N., Kryshen A.M., Tebenkova D.N., Kuznetsova A.I., Smirnov V.I., Braslavskaya T. Yu., Gornov A.V., Shashkov M.P., Knyazeva S.V., Kataev A.D., Isaeva L.G., Zukert N.V. Associations between forest vegetation and the fertility of soil organic horizons in northwestern Russia, *Forest Ecosystems*, 2019, No. 6, pp. 34.
<https://doi.org/10.1186/s40663-019-0190-2>
- Nechaeva E.G., *Landshaftno-geokhimicheskii analiz dinamiki taezhnykh geosistem* (Landscape-geochemical analysis of the dynamics of taiga geosystems), Irkutsk: Institut geografii SO AN RAN, 1985, 210 p.
- Nilsson M.-Ch., Wardle D. A., Understorey vegetation as a forest ecosystem driver: evidence from the northern Swedish boreal forest, *Front. Ecol. Environ*, 2005, Vol. 3, No. 8, pp. 421–428.
- Noreika N., Helm A., Öpik M., Jairus T., Vasar M., Reier Ü., Kook E., Riibak K., Kasari L., Tullus H., Tullus T., Lutter R., Oja E., Saag A., Randlane T. and Pärtel M., Forest biomass, soil and biodiversity relationships originate from biogeographic affinity and direct ecological effects, *Oikos*, 2019, No. 128, pp. 1653–1665.
<https://doi.org/10.1111/oik.06693>
- Orlova M.A., Elementarnaya edinitsa lesnogo biogeotsenoticheskogo pokrova dlya otsenki ekosistemnykh funktsii lesov (Elementary unit of the forest biogeocenotic cover for investigation of forest ecosystem functions), *Trudy Kar-el'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2013, No. 6, pp. 126–132.
- Orlova M.A., Lukina N.V., Kamaev I.O., Smirnov V.E., Kravchenko T.V., Mozaichnost' lesnykh biogeotsenozov i plodorodie pochv (Forest ecosystem mosaics and soil fertility), *Lesovedenie*, 2011, No. 6, pp. 39–48.
- Orlova M.A., Lukina N.V., Smirnov V.E., Metodicheskie podkhody k otboru obraztsov lesnoi podstilki s uchetom mozaichnosti lesnykh biogeotsenozov (Methodology of forest litter sampling taking into account the patchiness of forest biogeocoenoses), *Lesovedenie*, 2015, No. 3, pp. 214–221.
DOI 10.31857/S0033994620010045
- Orlova M.A., Lukina N.V., Tutubalina O.V. et al., Soil nutrient's spatial variability in forest–tundra ecotones on the Kola Peninsula, Russia, *Biogeochemistry*, 2013, Vol. 113, No. 1–3, pp. 283–305.
- Popova N.V., *Tipizatsiya napochvennykh organogennykh gorizontov v osnovnykh pochvenno-fitosenoticheskikh ekosistemakh i indikatsiya ikh sostoyaniya po parametram destruktivnoi vetvi malogo biologicheskogo krugovorota*. Avtoref. diss. d. biol. nauk (Typification of ground organic horizons in the main soil-phytocoenotic ecosystems and indication of their state according to the parameters of the destructive branch of the small biological cycle. Extended abstract of Doctor's biol. sci. thesis), Vladimir, 2018, 47 p.
- Sayer E.J., Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems, *Biological Reviews*, 2006, No. 81, pp. 1–31.
- Semenyuk O.V., Telesnina V.M., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Kuznetsova Y.D., Assessment of intra-biogeocenotic variability of forest litters and dwarf shrub–herbaceous vegetation in spruce stands, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 1, pp. 27–38.
- Sergeeva O.V., Mukhortova L.V., Krivobokov L.V., Raspre-delenie zapasov podstilki i biomassy zhivogo napochvennogo pokrova v severnoi taige tsentral'noi Evenkii v zavisimosti ot rel'efa (Distribution of forest litter and live ground cover biomass in northern taiga of the Central Evenkia depending on relief), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2020, No. 1, pp. 38–46.
DOI 10.15372/SJFS20200104
- Shibareva S.V., *Zapasy i elementnyi sostav podstilok v lesnykh i travyanykh ekosistemakh Sibiri*. Avtoref. diss. k. biol. nauk (Reserves and elemental composition of litter in forest and grass ecosystems of Siberia. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Novosibirsk: 2004, 24 p.
- Tamminen P., Starr M., Kubin E., Element concentrations in boreal, coniferous forest humus layers in relation to moss chemistry and soil factors, *Plant and soil*, 2004, Vol. 259, No. 1–2, pp. 51–58.
- Telesnina V.M., Semenyuk O.V., Bogatyrev L.G., Benediktova A.I., Osobennosti napochvennogo pokrova i lesnykh podstilok v iskusstvennykh lipovykh nasazhdeniyakh v zavisimosti ot kharaktera ukhoda (Features of a ground cover and forest litter of artificial lime plantations depending on the nature of care), *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 17. Pochvovedenie*, 2018, No. 2, pp. 3–11.
- Titlyanova A.A., Shibareva S.V., *Podstilki v lesnykh i travyanykh ekosistemakh* (Litter in forest and grass ecosystems), Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012, 135 p.
- Vesterdal L., Raulund-Rasmussen K., Forest floor chemistry under seven tree species along a soil fertility gradient, *Canadian J. Forest Research*, 1998, Vol. 28, No. 11, pp. 1636–1647.
DOI 10.1139/cjfr-28-11-1636
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation), Moscow: Rosgidromet, 2014, 1008 p.
- Zellweger F., De Frenne P., Lenoir J., Vangansbeke P., Verheyen K., Bernhardt-Römermann M., Baeten L., Hédli R., Berki I., Brunet J., Van Calster H., Chudomelová M., Decocq G., Dirnböck T., Durak T., Heinken T., Jaroszewicz B., Kopecký M., Máliš F., Macek M., Marek M., Naaf T., Nagel T.A., Ortmann-Ajkai A., Petřík P., Pielech R., Reczyńska K., Schmidt W., Standovář T., Świerkosz K., Teleki B., Vild O., Wulf M., Coomes D., Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming, *Science*, 2020, Vol. 368, No. 6492, pp. 772–775.
DOI 10.1126/science.aba6880

УДК 574.9;551.58;631.46

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТА НА ФЕРМЕНТАТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ ЛЕСНЫХ ПОЧВ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА¹

© 2022 г. Ю. С. Козунь^а*, К. Ш. Казеев^а, С. И. Колесников^а^аАкадемия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского ЮФУ,
пр-кт Стачки, д. 194/1, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

*E-mail: Kuz.yuliya@mail.ru

Поступила в редакцию 22.10.2021 г.

После доработки 23.11.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Рассматривается влияние климатических факторов на ферментативную активность зональных почв Северо-Западного Кавказа: бурую лесную, серую лесную и серую лесостепную. Проведен корреляционный анализ тесноты связи климатических показателей и почвенных ферментов (каталазы, дегидрогеназы, инвертазы, пероксидазы и полифенолоксидазы). Среди климатических параметров выбраны среднегодовая температура, среднемесячные температуры января и июля, среднегодовая амплитуда температур, среднегодовое количество осадков, количество осадков за вегетационный период, а также индексы и коэффициенты, отражающие сочетанное действие факторов климата (коэффициент увлажнения Иванова, индекс аридности де Мартона и индекс континентальности Горчинского). Установлена тесная корреляционная связь активностей каталазы и пероксидазы со всеми показателями климата. Активность дегидрогеназы определяется показателями влажности, а активность инвертазы, наоборот, в большей степени зависит от температурных показателей климата. Для активности полифенолоксидазы верхних горизонтов почв не установлено связи с климатом, при этом суммарная активность всего профиля имеет от него тесную корреляционную зависимость. Значения интегрального показателя биологического состояния (ИПБС) по профилю почв снижаются по мере увеличения количества осадков и снижения температуры. Климат оказывает влияние не только на верхние горизонты почв, которые непосредственно подвергаются действию среды, но и на весь почвенный профиль.

Ключевые слова: лесные почвы, биологические свойства почв, ферментативная активность почв, интегральный показатель биологического состояния, биодиагностика, климат.

DOI: 10.31857/S002411482203010X

Климат зависит от географического положения территории, которое определяет приток солнечной энергии и количество осадков. Основные составляющие климата – температура воздуха, количество осадков, наличие ветра и многолетней мерзлоты. Осадки и температура определяют водный и тепловой режимы почвы, ее влажность, скорость и характер превращения органических остатков, минерализацию гумуса, разрушение минеральной части почвы.

Почвенные и климатические характеристики находятся в тесной связи. Известны работы в области экологии почв по установлению закономерных связей в широком географическом плане между климатическими показателями и различными почвенными свойствами (Волобуев, 1956; Ковда, 1973), в частности ферментативной активности (De Oliveira et al., 2020).

Так как климат играет значительную роль в образовании почвы, то она, в свою очередь, является источником познания исторического изменения климата, сохраняя в себе свойства прошлых эпох (Каширская и др., 2013). Среди компонентов биотопа наибольшей скоростью изменения под влиянием климата обладают режимы температуры и влажности, газовый состав и биотические параметры почв (Кудеяров и др., 2009). Причем по происходящим сейчас процессам в почве можно судить о будущих глобальных изменениях климата. Почва и ее свойства являются индикаторами глобальных изменений климата (Рожков, 2009).

Ожидается, что изменение климата приведет к повышению средней температуры в ближайшее десятилетие более чем на 2°C и к изменению характера распределения осадков (Brown and Caldeira, 2017). Особое влияние эти изменения окажут на лесные экосистемы, приведут к изменению видового состава деревьев (Фонти, Прокушкин, 2021), повлияют на микробные почвенные сообщества (Bouskill et al., 2016). Вследствие чего изменятся

¹ Исследование выполнено при государственной поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ 449.2022.5).

Таблица 1. Климатические параметры исследуемых участков

Участок	Почва	Географические координаты		Высота над уровнем моря, м
		с.ш.	в.д.	
п. Гузерипль, лес	Бурая лесная	44°01	40°09	689
п. Даховская, лес	Серая лесная	44°12	40°11	502
г. Майкоп, лес	Серая лесостепная	44°07	40°07	289

такие процессы в экосистемах, как разложение, круговорот веществ и активность внеклеточных ферментов. Знание о зависимости почвенных процессов от климата дает возможность спрогнозировать эволюцию почвенного покрова при глобальном изменении климата.

Представляемая работа является частью цикла научных исследований по изучению влияния факторов среды, в том числе климата, на биологические свойства почв Юга России (Колесников и др., 2000; Казеев и др., 2002; Казеев и др., 2004; Казеев, Кузнецова, 2010; Кузнецова, Казеев, 2010; Горобцова и др., 2021). Цель настоящего исследования – изучение и описание воздействия отдельных климатических характеристик и их совокупности на ферментативную активность почв Северного Кавказа. В качестве исследуемых ферментов выбраны активности каталазы, дегидрогеназы, инвертазы, пероксидазы и полифенолоксидазы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В данной работе изучены зональные почвы Северо-Западного Кавказа: бурая лесная, серая лесная и серая лесостепная. Объекты исследования расположены на территории республики Адыгеи (табл. 1). Высота над уровнем моря варьирует в пределах 250–700 м. Бурая лесная почва изучена в окрестностях поселка Гузерипль. Участок представлен пихтово-буковым лесом с мощной листовый подстилкой. Мощность почвы составляет 40 см. Бурые лесные почвы широко распространены на Северном Кавказе. Формируются в теплом, хорошо увлажненном климате. Осадки, выпадающие круглогодично, обеспечивают глубокое промачивание почвы. Почвы характеризуются высокой биологической активностью верхнего горизонта и резким ее снижением вниз по профилю. Серая лесная почва отобрана на участке буково-грабового леса в окрестностях поселка Даховская. Мощность почвы составляет 60 см. Поверхность почвы покрыта опадом лишь на 20–30%. Главное экологическое отличие серых лесных почв Северного Кавказа от почв других регионов состоит в том, что они не промерзают в течение всего года. На исследуемой территории не наблюдается сплошной полосы серых лесных почв, они встречаются отдельными участками между буры-

ми лесными и различными подтипами слитых почв лесостепей. Серая лесостепная почва отобрана в окрестностях города Майкоп. Мощность почвы 80 см. Участок представлен буково-дубовым лесом. Территория характеризуется меньшим количеством осадков и более высокой температурой по сравнению с горными районами (Вальков и др., 2008).

При передвижении на север, с уменьшением высоты над уровнем моря, наблюдается снижение среднегодового количества осадков, увеличение среднегодовой температуры и среднегодовой амплитуды. Снижается коэффициент увлажнения и индекс аридности де Мартона, климат становится более аридным. Лесные районы заменяются лесостепью, что оказывает значительное влияние на почвенный покров. Мелкопрофильные горные лесные почвы заменяются на более мощные лесостепные.

Для установления зависимостей ферментативной активности от климата выбраны следующие климатические характеристики: среднегодовое количество осадков, сумма осадков за вегетационный период, среднемесячные температуры января и июля, среднегодовая амплитуда температур. Для рассмотрения сочетанного влияния факторов на ферменты использованы климатические коэффициенты и индексы: коэффициент увлажнения Иванова, индекс аридности де Мартона, индекс континентальности Горчинского (табл. 2).

Индекс аридности де Мартона: $I_a = P / (T + 10)$, где P – годовое количество осадков, T – среднегодовая температура.

Индекс континентальности по Горчинскому: $K = 1.74A / \sin \varphi$, где A – годовая амплитуда температуры, φ – широта местности.

Коэффициент увлажнения Иванова: $K = P / E \times 100$, где P – годовое количество осадков, E – годовая испаряемость.

При получении аналитических данных, используемых в настоящей работе, применялась разработанная и апробированная методология исследования биологической активности (Вальков и др., 2008) с использованием общепринятых в почвоведении и биологии методов (Казеев, Колесников, 2012; Хазиев, 1990).

В основу исследований был положен системный подход к познанию природных объектов и

Таблица 2. Основные климатические показатели и климатические индексы исследуемой территории (aisori-m.meteo.ru)

Почва	Среднегодовое количество осадков, мм	Сумма осадков за вегетационный период, мм	Среднегодовая температура, °С	Средняя температура июля, °С	Средняя температура января, °С	Средняя годовая амплитуда температур	Индекс аридности де Маргона	Индекс континентальности по Горчинскому	Коэффициент увлажнения по Иванову
Серая лесостепная	702	453	10.5	22.1	-1.7	23.8	34.2	59.5	81
Серая лесная	738	492	9.0	19.6	-2.0	21.6	38.8	53.9	120
Бурая лесная	1132	646	8.2	18.2	-2.2	20.4	62.2	51.1	221

явлений. Изучение биологической активности почв проводилось в двух аспектах: сравнительно-географическом и профилно-генетическом. Изучена ферментативная активность верхних горизонтов и рассчитана суммарная активность для всего профиля.

Для изучения профилей почв и отбора почвенных образцов для последующих лабораторных работ были заложены полнопрофильные разрезы и прикопки к ним на типичных по рельефу и растительности ключевых участках. Географические координаты определены GPS навигатором Garmin. Были определены активность каталазы, инвертазы, дегидрогеназы, пероксидазы и полифенолоксидазы (Казеев и др., 2012). В связи с тем, что ферментативная активность почв отличается значительным природным варьированием, почвенные образцы отобраны в сходных погодных условиях в течение одного дня.

Активность каталазы определяли волюметрическим методом по выделению кислорода при разложении 3% раствора перекиси водорода, дегидрогеназы – фотоколориметрическим методом с использованием в качестве субстрата 2,3,5-трифенилтетразолий хлористый. Активность инвертазы определяли колориметрическим методом с использованием реактива Фелинга по концентрации глюкозы, инвертированной при разложении 3% раствора сахарозы. Для определения активностей пероксидазы и полифенолоксидазы использовали колориметрические методы, в которых ферментными субстратами служит гидрохинон. Активность почвенных ферментов изучали при естественной рН почвы. Для определения различий в уровне биогенности и биологической активности разных почв определяли интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы (Казеев и др., 2012). Для этого максимальное значение каждого из показателей принимали за 100% и по отношению к нему в процентах вы-

ражали значение этого же показателя в остальных образцах:

$$B_1 = \frac{Bx}{B_{\max}} \times 100\%,$$

где B_1 – относительный балл показателя; Bx – фактическое значение показателя; B_{\max} – максимальное значение показателя.

После этого рассчитывали средний оценочный балл изученных показателей для образца (варианта), абсолютные значения которых не могут быть суммированы, так как имеют разные единицы измерения. ISBI почвы рассчитывали аналогично формуле (1):

$$ISBI = \frac{B_m}{B_{m\max}} \times 100\%,$$

где B_m – средний оценочный балл всех показателей; $B_{m\max}$ – максимальный оценочный балл всех показателей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования установлено, что изучаемые почвы по активности каталазы и инвертазы в верхних горизонтах относятся к среднеобогатенным (Звягинцев, 1978). По активности дегидрогеназы серая лесная и серая лесостепная относятся к богатым, в то время как бурая лесная – к среднеобогатенным. Что касается профилного распределения ферментов, то выявлен убывающий характер распределения в профиле активностей каталазы и инвертазы во всех почвах (рис. 1). Отмечена наименьшая активность дегидрогеназы в верхнем горизонте бурой лесной почвы. Максимальную активность дегидрогеназы в верхнем горизонте и по всему профилю имеет серая лесная почва. В профилном распределении активностей пероксидазы и полифенолоксидазы наблюдаются инверсии.

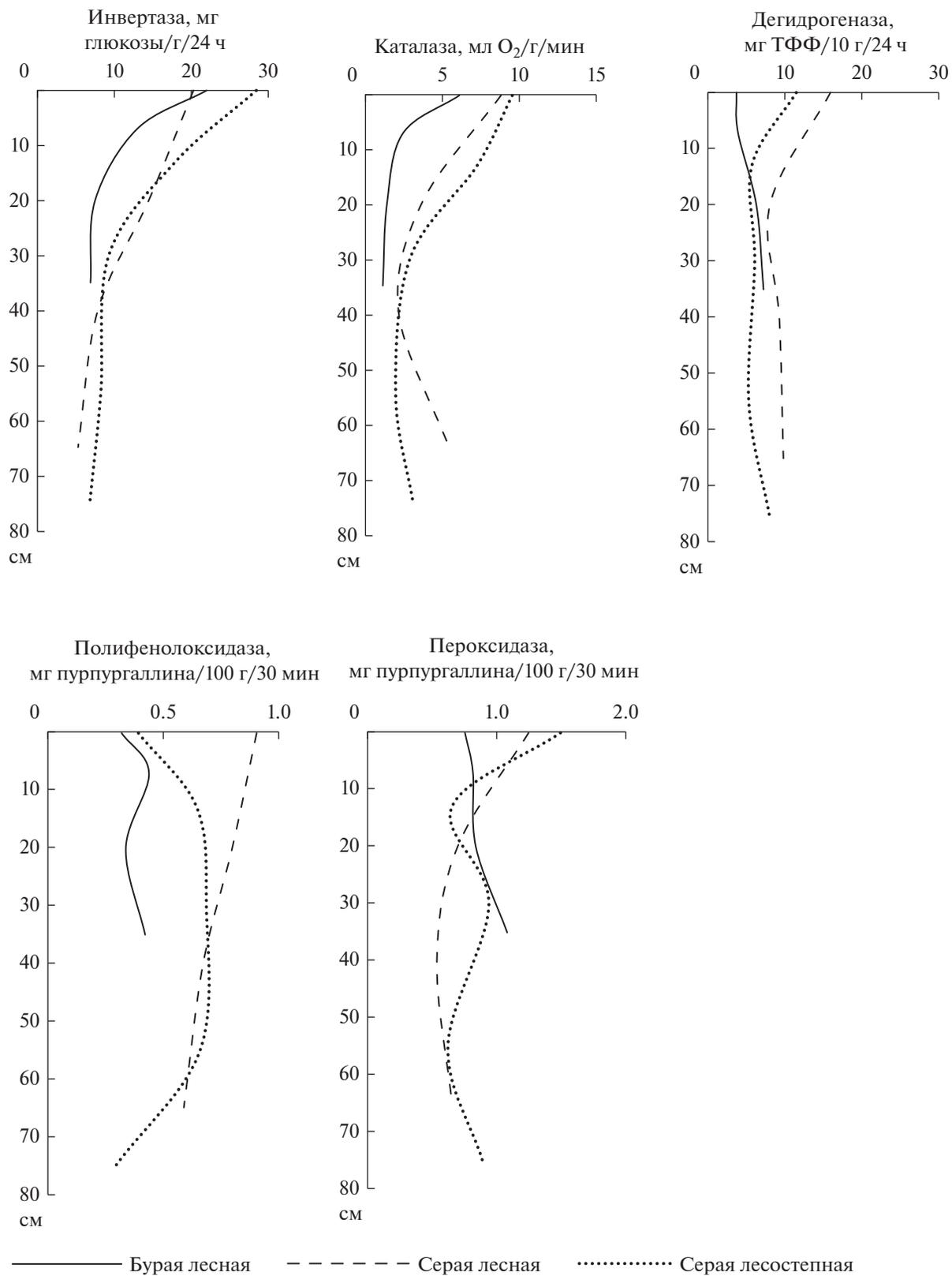


Рис. 1. Распределение ферментативной активности в профилях лесных почв.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции зависимости ферментативной активности от климатических показателей

	Каталаза	Инвертаза	Дегидрогеназа	Полифенолоксид аза	Пероксидаза	ИПБС
Среднегодовое количество осадков	-0.99 -1.00	-0.39 -0.94	-0.90 -0.97	-0.53 -0.99	-0.97 -0.89	-0.97 -1.00
Сумма осадков за вегетационный период	-1.00 -0.99	-0.49 -0.97	-0.85 -0.93	-0.43 -0.97	-0.99 -0.93	-0.93 -1.00
Среднегодовая температура	0.88 0.80	0.85 0.96	0.48 0.64	-0.06 0.72	0.93 0.99	0.64 0.84
Средняя температура июля	0.89 0.80	0.85 0.96	0.50 0.65	-0.05 0.73	0.94 0.99	0.65 0.85
Средняя температура января	0.91 0.83	0.82 0.98	0.54 0.68	0.00 0.76	0.95 1.00	0.69 0.87
Средняя годовая амплитуда температур	0.88 0.80	0.85 0.96	0.49 0.64	-0.05 0.72	0.94 0.99	0.65 0.84
Индекс аридности де Мартона	-1.00 -0.99	-0.46 -0.97	-0.87 -0.94	-0.47 -0.97	-0.98 -0.92	-0.95 -1.00
Индекс континентальности по Горчинскому	0.87 0.79	0.86 0.96	0.47 0.63	-0.08 0.71	0.93 0.99	0.63 0.83
Коэффициент увлажнения по Иванову	-1.00 -0.97	-0.56 -0.99	-0.80 -0.90	-0.36 -0.94	-1.00 -0.96	-0.90 -0.99

Примечание. Верхние значения приведены для поверхностных горизонтов, нижние — с учетом всего профиля. Жирным выделены значения при $p < 0.05$.

Температура является одним из ведущих факторов, оказывающих влияние на биологическую активность почв. Но если для степных аридных районов характерна обратная зависимость активности ферментов со среднегодовой температурой и среднегодовой амплитудой температур (Казеев и др., 2015), то для лесных гумидных районов установлена тесная прямая зависимость (Baldrian et al., 2013). В лесных почвах лимитирующим фактором для ферментативной активности является тепло, в то время как в степных: черноземах и каштановых почвах — количество осадков.

Проведенный корреляционный анализ показал (табл. 3), что ферментативная активность имеет тесную связь с климатическими факторами. Для активностей каталазы, инвертазы и пероксидазы установлена тесная положительная корреляционная связь со среднегодовой температурой, средней температурой июля и января, амплитудой температур. Изменения активности ферментов с повышением температуры могут быть связаны с усилением столкновения между субстратом и ферментом, вызванным температурным ускорением броуновского движения (Blagodatskaya et al., 2016), а также с изменением стабильности и сродства фермента к субстрату (Datta et al., 2017; Davidson et al., 2006). Увеличение среднегодового количества осадков приводит к уменьшению активностей каталазы и пероксидазы. Количество осадков оказывает влияние

только на суммарную активность инвертазы, на активность верхних горизонтов не установлено достоверного воздействия.

Выявлено влияние показателей климата на суммарную активность полифенолоксидазы, при этом климат не влияет на распределение фермента в верхних горизонтах. Полифенолоксидаза более чувствительна к гидротермическим показателям почвы по сравнению с другими исследуемыми ферментами, поэтому ее активность в верхних горизонтах обуславливается в большей степени значениями температуры и влажности в конкретный период (Lia et al., 2022). Что касается активности дегидрогеназы, то не установлено влияния температурных показателей на активность фермента. При этом исследования зависимости активности дегидрогеназы от термических показателей в лабораторных условиях показывают высокую чувствительность фермента к температуре, особенно в диапазоне 5–15°C (Li et al., 2022).

Использование климатических коэффициентов и индексов позволяет рассмотреть сочетанное действие климатических факторов. Как и при индивидуальном рассмотрении климатических показателей, активности каталазы и пероксидазы имеют сильную корреляционную связь со всеми рассматриваемыми коэффициентами. Для дегидрогеназы установлена связь только с индексом аридности де Мартона и коэффициентом увлажнения Иванова, т. к. при их расчете используется

среднегодовое количество осадков. Индекс континентальности Горчинского, при расчете которого учитывается географическое положение участка, имеет связь с активностями каталазы, инвертазы, пероксидазы и суммарной активностью полифенолоксидазы.

Для обобщения влияния климатических показателей на биологические свойства почв использовали интегральный показатель биологического состояния (ИПБС). При расчете ИПБС учитывались все исследуемые биологические показатели. Расчет ИПБС проводили в двух аспектах: ИПБС верхних горизонтов почв, где учитывались значения биологических показателей только для верхних горизонтов, и ИПБС профиля, где учитывали биологическую активность по всему профилю почвы до горизонта С. В результате вычислений было выявлено, что ИПБС верхних горизонтов в меньшей степени зависит от значений климатических показателей. Отмечена более тесная связь ИПБС верхних горизонтов со среднегодовым количеством осадков и суммой осадков за вегетационный период, чем с температурными показателями. ИПБС профиля имеет высокую и очень высокую степень зависимости от всех показателей климата. Таким образом, при изучении воздействий климата на почву необходимо учитывать его влияние на весь почвенный профиль, а не только на верхние горизонты, которые непосредственно соприкасаются с окружающей средой, и их биологическое состояние определяется в большей степени конкретными погодными условиями. Если температура климата возрастет согласно прогнозам, то активность ферментов в данных экосистемах существенно возрастет.

Из приведенных выше результатов можно сделать следующие выводы: климатические условия оказывают значительное влияние на ферментативную активность почв Северо-Западного Кавказа. Из всех исследуемых показателей наиболее зависимыми от климата оказались каталазы и пероксидазы. Активность дегидрогеназы определяется в большей степени показателями влажности климата. Климат оказывает воздействие не только на верхние “соприкасающиеся” с окружающей средой горизонты, но и на нижележащие. Так, для суммарной биологической активности полифенолоксидазы выявлена тесная зависимость от климата, в то время как для верхних горизонтов связи не установлено. Именно почвенный профиль в большей степени отражает действие климата, в то время как верхние горизонты подвержены краткосрочным воздействиям погоды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы юга России. Ростов-на-Дону: Эверест, 2008. 276 с.

Волобуев В.Р. Климатические условия и почвы // Почвоведение. 1956. № 4. С. 25–37.

Горобцова О.Н., Улигова Т.С., Гедгафова Ф.В., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М. Биологическая активность почв в поясе широколиственных лесов Центрального Кавказа // Лесоведение. 2021. № 1. С. 78–92.

Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.

Казеев К.Ш., Козин В.К., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологические особенности почв влажных субтропиков России // Почвоведение. 2002. № 12. С. 1474–1478.

Казеев К.Ш., Козунь Ю.С., Колесников С.И. Использование интегрального показателя для оценки пространственной дифференциации биологических свойств почв юга России в градиенте аридности климата // Сибирский экологический журн. 2015. Т. 22. № 1. С. 112–120.

Казеев К.Ш., Колесников С.И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. Ростов-на-Дону: ЮФУ. 2012. 380 с.

Казеев К.Ш., Кузнецова Ю.С. Эколого-биологические особенности аридных почв Прикаспийской низменности // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2010. № 5. С. 83–85.

Казеев К.Ш., Фомин С.Е., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологические свойства локально переувлажненных почв Ростовской обл. // Почвоведение. 2004. № 3. С. 361–372.

Каширская Н.Н., Хомутова Т.Э., Демкина Т.С., Салманова К.А., Кузнецова Ю.С., Демкин В.А. Биологическая активность современной и погребенной каштановых почв сухих степей // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 2(55). С. 64–72.

Ковда В.А. Основы учения о почвах. М.: Наука, 1973. Т. 1–2.

Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на эколого-биологические свойства чернозема обыкновенного // Экология. 2000. № 3. С. 193–201.

Кудеяров В.Н., Демкин В.А., Гиличинский Д.А., Горячкин С.В., Рожков В.А. Глобальные изменения климата и почвенный покров // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1027–1042.

Кузнецова Ю.С., Казеев К.Ш. Влияние засоления на биологические свойства гидроморфных почв Ильменей Астраханской области // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2010. № 1. С. 90–93.

Рожков В.А. Почвы и почвенный покров — свидетели и индикаторы глобальных изменений климата // Почвоведение. 2009. № 2. С. 134–143.

Фонти М.В., Прокушкин А.С. Климатически обусловленная изменчивость радиального прироста березы пушистой в криолитозоне средней Сибири // Лесоведение. 2021. № 5. С. 460–471.

Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 1990. 189 с.

Baldrian P., Šnajdr J., Valášková V. Responses of the extracellular enzyme activities in hardwood forest to soil temperature and seasonality and the potential effects of climate

change // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. V. 56. P. 60–68.

Blagodatskaya E., Blagodatsky S., Khomyakov N., Myachina O., Kuzyakov Y. Temperature sensitivity and enzymatic mechanisms of soil organic matter decomposition along an altitudinal gradient on Mount Kilimanjaro // *Scientific Reports*. 2016. № 6. P. 1–11, doi.org/https://doi.org/10.1038/srep22240

Bouskill N.J., Wood T.E., Baran R., Ye Z., Bowen B.P., Lim H., Zhou J., J.D. van Nostrand, Nico P., Northen T.R., Silver W.L., Brodie E.L. Belowground response to drought in a tropical forest soil. I. changes in microbial functional potential and metabolism // *Frontiers in Microbiology*. 2016. № 7. P. 525.

Brown P., Caldeira K. Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget. *Nature*. 2017. № 552. P. 45–50. https://doi.org/10.1038/nature24672

Datta R., Anand S., Moulick A., Baraniya D., Pathan S.I., Rejsek K., Vranova V., Sharma M., Sharma D., Kelkar A., Formanek P. How enzymes are adsorbed on soil solid phase and factors limiting its activity: a review // *International Ag-*

rophysics. 2017. V. 31. № 2. P. 287–302. https://doi.org/10.1515/intag-2016-0049

Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y.Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q (10) // *Global Change Biology*. 2006. V. 12. № 2. P. 154–164. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x

De Oliveira T.B., de Lucas R.C., de Moraes Polizeli M.L.T. Effects of multiple climate change factors on exoenzyme activities and CO₂ efflux in a tropical grassland // *Soil Biology and Biochemistry*. 2020. V. 148.

Li H., Tian H., Wang Z., Liu C., Nurzhan A., Megharaj M., He W. Potential effect of warming on soil microbial nutrient limitations as determined by enzymatic stoichiometry in the farmland from different climate zones // *Science of The Total Environment*. 2022. V. 802. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149657

Lia Q., Jiab W., Zhang Q., Cheng X. Localized plant-soil-microbe interactions regulate spatial variations of soil oxidase activities within afforested systems in a subtropical area // *Geoderma*. 2022. V. 406. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115499

Climate's Affect on the Northern Caucasian Forest Soils' Enzymatic Activity

Yu. S. Kozun^{1, *}, K. Sh. Kazeev¹, and S. I. Kolesnikov¹

¹*Ivanovsky's Academy of Biology and Biotechnology, Stachki ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344006 Russia*

*E-mail: Kuz.yuliya@mail.ru

The study considers the influence of climatic factors on the enzymatic activity of zonal soils of the North-western Caucasus: brown forest soils, grey forest soils and grey forest-steppe soils. A correlation analysis of the relationship strength between climatic parameters and the soil enzymes (catalase, dehydrogenase, invertase, peroxidase, and polyphenol oxidase) was carried out. Among the climatic parameters, the following were chosen: the average annual temperature, the average monthly temperatures of January and July, the average annual temperatures range, the average annual precipitation and the amount of precipitation during the growing season, as well as indices and coefficients reflecting the combined effect of climatic factors (Ivanov's humidification coefficient, de Marton's aridity index and the Gorchinsky's continentality index). A close correlation was established between the activities of catalase and peroxidase and all the climatic indicators. The dehydrogenase activity was found to be determined by humidity indicators, while the invertase activity, on the contrary, depends to a greater extent on temperature indicators of the climate. The activity of polyphenol oxidase in the upper soil horizons was not found to be related to climate, while the total activity of the entire profile had a close correlation dependence on it. The values of the biological state integral indicator (BSII) in the soil profile decreased as the amount of precipitation was increasing and the temperature was decreasing. The climate affects not only the upper soil horizons, which are directly exposed to the environment, but the entire soil profile.

Keywords: forest soils, soil biological properties, soil enzymatic activity, biological state integral indicator, biagnostics, climate.

Acknowledgements: The study has been carried out with a support from the leading scientific school of the Russian Federation (NSh-2511.2020.11).

REFERENCES

Baldrian P., Šnajdr J., Valášková V., Responses of the extracellular enzyme activities in hardwood forest to soil temperature and seasonality and the potential effects of climate change, *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, Vol. 56, pp. 60–68.

Blagodatskaya E., Blagodatsky S., Khomyakov N., Myachina O., Kuzyakov Y., Temperature sensitivity and en-

zymatic mechanisms of soil organic matter decomposition along an altitudinal gradient on Mount Kilimanjaro, *Scientific Reports*, 2016, No. 6, pp. 1–11, doi.org/10.1038/srep22240

Bouskill N.J., Wood T.E., Baran R., Ye Z., Bowen B.P., Lim H., Zhou J., J.D. van Nostrand, Nico P., Northen T.R., Silver W.L., Brodie E.L., Belowground response to drought in a tropical forest soil. I. changes in microbial functional

- potential and metabolism, *Frontiers in Microbiology*, 2016, No. 7, pp. 525.
- Brown P., Caldeira K., Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget, *Nature*, 2017, No. 552, pp. 45–50.
doi 10.1038/nature24672
- Datta R., Anand S., Moulick A., Baraniya D., Pathan S.I., Rejsek K., Vranova V., Sharma M., Sharma D., Kelkar A., Formanek P., How enzymes are adsorbed on soil solid phase and factors limiting its activity: a review, *International Agrophysics*, 2017, Vol. 31, No. 2, pp. 287–302.
doi 10.1515/intag-2016-0049
- Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y.Q., On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q (10), *Global Change Biology*, 2006, Vol. 12, No. 2, pp. 154–164.
doi 10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x
- De Oliveira T.B., de Lucas R. C., de Moraes Polizeli M.L.T., Effects of multiple climate change factors on exoenzyme activities and CO₂ efflux in a tropical grassland, *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, Vol. 148.
DOI 10.1016/j.soilbio.2020.107877
- Fonti M.V., Prokushkin A.S., Klimaticheski obuslovlennaya izmenchivost' radial'nogo prirosta berezy pushistoi v kriolitozone srednei Sibiri (Climat-induced variations in radial growth of downy birch in the middle Siberia cryolithozone), *Lesovedenie*, 2021, No. 5, pp. 460–471.
- Gorobtsova O.N., Uligova T.S., Gedgafova F.V., Tembotov R.K., Khakunova E.M., Biologicheskaya aktivnost' pochv v poyase shirokolistvennykh lesov Tsentral'nogo Kavkaza (Biological activity of soils of the deciduous forests belt in Central Caucasus), *Lesovedenie*, 2021, No. 1, pp. 78–92.
- Kashirskaya N.N., Khomutova T.E., Demkina T.S., Demkin V.A., Salmanova K.A., Kuznetsova Y.S., Biological activity of modern and buried dry-steppe chestnut soils, *Arid Ecosystems*, 2013, Vol. 3, No. 2, pp. 106–112.
- Kazeev K.S., Fomin S.E., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F., Biological properties of locally hydromorphic soils in Rostov oblast, *Eurasian Soil Science*, 2004, Vol. 37, No. 3, pp. 310–320.
- Kazeev K.S., Kolesnikov S.I., *Biodiagnostika pochv: metodologiya i metody issledovaniya* (Biodiagnostic of soils: the methodology and methods of researches), Rostov-on-Don: YuFU, 2012, 380 p.
- Kazeev K.S., Kozin V.K., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F., Biologicheskie osobennosti pochv vlazhnykh subtropikov Rossii (Biological features of soils in humid subtropics of Russia), *Pochvovedenie*, 2002, No. 12, pp. 1474–1478.
- Kazeev K.S., Kozun' Y.S., Kolesnikov S.I., Applying an integral index to evaluate the spatial differentiation of biological properties of soils along an aridity gradient in the south of Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2015, Vol. 8, No. 1, pp. 91–98.
- Kazeev K.S., Kuznetsova Y.S., Ekologo-biologicheskie osobennosti aridnykh pochv Prikaspiiskoi nizmennosti (Ecological and biological features of arid soils of Caspian lowland), *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2010, No. 5, pp. 83–85.
- Khaziev F.K., *Metody pochvennoi enzimologii* (Methods of soil enzymology), Moscow: Nauka, 1990, 189 p.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Val'kov V.F., Effects of heavy metal pollution on the ecological and biological characteristics of common chernozem, *Russian J. Ecology*, 2000, Vol. 31, No. 3, pp. 174–181.
- Kovda V.A., *Osnovy ucheniya o pochvakh* (Basics of soils science), Moscow: Nauka, 1973. Vol. 1–2.
- Kudeyarov V.N., Demkin V.A., Gilichinskii D.A., Goryachkin S.V., Rozhkov V.A., Qlobal climate changes and the soil cover, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 9, pp. 953–966.
- Kuznetsova Y.S., Kazeev K.S., Vliyanie zasoleniya na biologicheskie svoistva gidromorfnykh pochv il'menei Astrakhanskoi oblasti (Salinification influence on biological properties of hydromorphic soils of the Astrakhan region), *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2010, No. 1, pp. 90–93.
- Li H., Tian H., Wang Z., Liu C., Nurzhan A., Megharaj M., He W., Potential effect of warming on soil microbial nutrient limitations as determined by enzymatic stoichiometry in the farmland from different climate zones, *Science of The Total Environment*, 2022, Vol. 802. 10.1016/j.scitotenv.2021.149657
- Lia Q., Jiab W., Zhanc Q., Cheng X., Localized plant-soil-microbe interactions regulate spatial variations of soil oxidase activities within afforested systems in a subtropical area, *Geoderma*, 2022, Vol. 406.
doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115499
- Rozhkov V.A., Soils and the soil cover as witnesses and indicators of global climate change, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 2, pp. 118–128.
- Val'kov V.F., Kazeev K.S., Kolesnikov S.I., *Pochvy yuga Rossii: genezis, geografiya, klassifikatsiya, ispol'zovanie i okhrana* (Soils of the South of Russia: genesis, geography, classification, usage and protection), Rostov-on-Don: Izd-vo Everest, 2008, 276 p.
- Volobuev V.R., Klimaticheskie usloviya i pochvy (Climatic conditions and soils), *Pochvovedenie*, 1956, No. 4, pp. 25–37.
- Zvyagintsev D.G., Biologicheskaya aktivnost' pochv i shkaly dlya otsenki nekotorykh ee pokazatelei (Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators), *Pochvovedenie*, 1978, No. 6, pp. 48–55.

УДК 630*232+631.46

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ ПОЧВ ЛЕСНЫХ ПОСАДОК В ШИРИНСКОЙ СТЕПИ¹

© 2022 г. И. Д. Гродницкая^а, *, В. А. Сенашова^а, Г. И. Антонов^а, Э. О. Пашкеева^а

^аИнститут леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, д. 50/28, Красноярск, 660036 Россия

*E-mail: igrod@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 15.12.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Для борьбы с деградацией земель и опустыниванием на эрозионно-опасных землях степных экосистем создаются устойчивые долгодетные защитные лесные насаждения, выполняющие водоохранную и почвозащитную функции. В Ширинской сухой озерно-котловинной степи (Р. Хакасия) в прибрежной зоне оз. Ши́ра сотрудниками ИЛ СО РАН созданы искусственные посадки лесных (сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* L.), вяза приземистого (*Ulmus humilis* L.)) и географических культур (сосны сибирской (*P. sibirica* Du Tour), сосны обыкновенной). Вследствие пожара в 2015 г. были повреждены прибрежные 40-летние лесные культуры, выгорел приземный почвенный слой. Агротехнические приемы при посадке географических культур (2017 г.) и пожар в лесных культурах повлияли на состояние почвенных микробиомов в них. Цель исследований – с помощью микробиологических индикаторов дать оценку скорости восстановления биологических свойств почвы в посадках лесных насаждений после антропогенных нарушений (пожара и агротехнических воздействий) в прибрежной сухостепной зоне оз. Ши́ра. Объектами исследований были участки “Гари и Пожарища” и “Географические культуры”. С помощью микробных индикаторов установлено, что почвенные микробиомы участков “Гари и Пожарища” восстанавливаются с разной интенсивностью. На пожарищах восстановление идет значительно быстрее, чем в гаях, о чем свидетельствуют высокие значения ОЧМ, МБ, ФА и K_r , которые приближаются к контрольным. Удельное микробное дыхание (qCO_2) находится в пределах природной вариабельности. В почве гарей отмечено увеличение доли гидrolитиков, активно участвующих в разложении полусгоревших растительных остатков. В географических культурах под саженцами сосны обыкновенной идет процесс формирования специфических ризосферных микробиомов, обусловленный влиянием корневых выделений климатипов. Значения ОЧМ, ЭТГМ, МБ, ФА, qCO_2 меняются то в большую, то в меньшую сторону, состояние микробных сообществ не достигает своей эко-физиологической нормы.

Ключевые слова: сухая озерно-котловинная степь, почвенные микробиомы, искусственные посадки, географические культуры, антропогенные воздействия, микробные индикаторы.

DOI: 10.31857/S002411482203007X

Степные территории юга Красноярского края, республик Хакасии и Тывы в той или иной степени подвержены деградации земель и опустыниванию. Важнейшей задачей в степных экосистемах является создание устойчивых долгодетных защитных лесных насаждений, выполняющих водоохранную, почвозащитную, санитарно-гигиеническую и эстетическую функции, поддерживающие агроэкологические свойства почв на оптимальном уровне (Кулик, 2007; Шарагин, 2011). Разные виды древесных растений могут оказывать специфическое воздействие на почвообразовательные процессы и свойства почв, фор-

мирование в них соответствующих микробиоценозов, тем самым способствуя продуктивности таких почв (Лобанов, 2007). Особое внимание уделяется исследованиям ризосферных микробных комплексов древесных пород, играющих важную роль не только в процессах роста и развития растения, но и в поддержании почвенного гомеостаза, реализации почвой своих экологических функций (Bulgarelli et al., 2013; Schlaeppli, Bulgarelli, 2015).

Раннюю диагностику биологического потенциала почв и устойчивости лесных насаждений можно оценить по структуре, динамике и функциональной активности микробных комплексов, тесно связанных с агрохимическими показателями почв (Сорокин и др., 2017). Исследова-

¹ Работы выполнены в рамках базового проекта ФИЦ КНЦ РАН ИЛ СО РАН № 0287-2021-0011.

ния почвенных микробиоценозов неустойчивых аридных (степных) экосистем являются актуальными, поскольку с помощью микробиологических индикаторов можно оценить состояние почвенного плодородия и развитие искусственных фитоценозов, а также скорость их восстановления после антропогенных воздействий с получением количественных характеристик. Как биоиндикатор, микробное сообщество является самым чутким показателем почвенно-химических условий, способным дать интегральную оценку состояния почвенного покрова и экосистемы в целом (Звягинцев, 1987; Ананьева, 2003; Сорокин, 2009).

В Ширинской сухой озерно-котловинной степи (Республика Хакасия) в прибрежной зоне оз. Ши́ра на эрозионно-опасных землях в 1975–1978 гг. сотрудниками ИЛ СО РАН были созданы искусственные посадки лесных культур для борьбы с деградацией земель и опустыниванием (Сорокин, Молоков, 1985). В 2017 г. в степном массиве были высажены географические культуры (климатипы) *Pinus* sp. разных видов. Все посадки были проведены на одном типе почв, которые идентифицируются как агрозоны аккумулятивно-карбонатные темные легко- и среднесуглинистые (Классификация ..., 2004; Сорокин и др., 2017). На протяжении многих лет на базе Ширинского опытно-экспериментального пункта ФИЦ КНЦ СО РАН осуществляются комплексные исследования, изучаются выживаемость, устойчивость интродуцированных древесных пород, а также проводится оценка лесорастительных свойств почв и трансформации их плодородия под воздействием насаждений (Сорокин и др., 2017; Сенашова и др., 2020; Гродницкая и др., 2021). Пожар, прошедший в 2015 г. в Ширинском районе, повредил прибрежные посадки лесных культур, достигшие к этому времени 40-летнего возраста, повлиял на состояние почвенной биоты в них. Возникла необходимость оценить состояние микробных сообществ в недавно поврежденных почвах, степень их деградации и способности к продукционным процессам.

Ежегодный мониторинг состояния микробных сообществ на антропогенно нарушенных участках почвы в сухой Ширинской степи (агротехнические воздействия, пожар) позволяет с помощью микробных индикаторов оценивать и прогнозировать лесорастительный (биологический) потенциал почв под посадками лесных культур с получением количественных характеристик.

Целью исследований являлось с помощью микробиологических индикаторов дать оценку скорости восстановления и формирования биологических свойств почвы в посадках лесных насаждений после антропогенных нарушений (пожара и агротехнических воздействий) в прибрежной сухостепной зоне оз. Ши́ра (Ширинская степь).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Объекты исследований. Объектами исследований являлись почвенные микробиомы, ассоциированные с искусственными насаждениями: 1) взрослыми древостоями лесных культур (посадки 1975–1978 гг.), состоящих из лиственницы сибирской, вяза приземистого, сосны обыкновенной и 2) саженцами географических культур различных популяций (климатипы) (посадки 2017 г.) *Pinus sibirica* (далее сосна кедровая, К) и *Pinus sylvestris* (далее сосна обыкновенная, С).

Посадку чистых культур хвойных (лиственницы сибирской и сосны обыкновенной) осуществляли на подготовленной почве под меч Колесова, размещение шахматно-групповое. На ромбовидные площадки с длиной диагоналей 4 × 6 м высаживали 50 саженцев. При высадке саженцев вяза (*Ulmus humilis*) использовали механизированную посадку (ширина междурядий 1.5 м, шаг посадки – 1 м (Сорокин, Молоков, 1985; Сорокин, Сорокина, 2009). В 2015 г. в пос. Ши́ра был сильный пожар и все приозерные посадки лесных культур были в разной степени повреждены. Пробные площади выбрали по степени повреждения насаждений огнем (“Гари и Пожарища”), согласно терминологии Н.П. Курбатского (1972) – гари (полностью сгоревшие, Г) и пожарища (поврежденные огнем, но продолжающие вегетировать, П). С учетом вышеприведенных особенностей исследуемых участков использовали следующую аббревиатуру (коды участков): ГЛР – гарь лиственница ризосфера, ГЛМ – гарь лиственница междурядье; ГСР – гарь сосна ризосфера, ГГС – контроль гарь сосна, ПЛМ – пожарище лиственница междурядье, ПЛР – пожарище лиственница ризосфера, ПВМ – пожарище вяз междурядье, ПВР – пожарище вяз ризосфера, КЛВ – контроль для лиственницы и вязов. Поскольку пожар повредил все лесные культуры, в качестве относительного контроля для участков лиственницы и вязов (КЛВ) были взяты образцы почвы целины (старая залежь), граничащей с этими посадками (верхняя часть макросклона), для участков сосны (КГС) – из целины, прилегающей к посадкам сосны, менее всего затронутой пожаром (нижняя часть макросклона). Образцы почвы для микробиологических и биохимических анализов отбирали из зоны ризосферы и между рядами посадок (междурядье) с глубины 5–10 см с 2018 по 2020 гг. в начале, середине и конце вегетационного периода.

В мае 2017 г. на территории ОЭП “Ширинский” ФИЦ КНЦ СО РАН в рамках многолетнего эксперимента сотрудниками ИЛ СО РАН был распахан участок степи и заложена опытная плантация (участок “Вузовский”) с географическими культурами *Pinus* sp. В подготовленную почву под меч Колесова высаживали географические культуры 5- и 3-летних саженцев двух видов

сосен (*P. sibirica* Du Tour, К и *P. sylvestris* Ledeb, С) различного происхождения (климатипы): КМ – *P. sibirica* “Монгольский”, КБ – *P. sibirica* “Байкальский”; СУ – *P. sylvestris* “Усть-кут”, СБ – *P. sylvestris* “Богучаны”, СП – *P. sylvestris* “Пудож”. Шаг посадки – 1 м, расстояние между рядами – 3 м. Плантация климатипов заложена рядовым способом на склоне западной экспозиции, на бывшей пашне. Микрорельеф выражен слабо, чередуются блюдцеобразные микрозападины и потяжины. При этом саженцы климатипов СУ, КМ, КБ, СБ высажены в блюдцеобразной западине у подножия склона, а саженцы климатипа СП – на верхней части склона. Контрольный участок (К), невозделанный участок степи, граничивший с посадками географических культур, заложен на выположенной верхней части склона западной экспозиции. Образцы почвы для микробиологических и биохимических (энзиматических) анализов отбирали в начале, середине и в конце вегетационного периода из зоны ризосферы саженцев (5–10 см) с 2017 по 2020 гг.

Почвы под всеми искусственными посадками и на контрольных участках являются генетически однородными – это агрозоны аккумулятивно-карбонатные, темные маломощные легкосуглинистые на лессовидном карбонатном суглинке (Классификация почв ..., 2004).

Методы исследований. В образцах почвы всех исследуемых участков стандартными методами определяли влажность (ГОСТ 28268-89) и pH (портативным потенциометром Аквилон–410) почвы. Для оценки и прогнозирования скорости восстановления почвенного плодородия после антропогенных воздействий (пожар, агротехническая обработка) на участках “Гари и Пожарища” и “Географические культуры” в течение нескольких лет проводили ежегодный мониторинг состояния микробных сообществ в лесных насаждениях с помощью следующих микробных индикаторов: общей численности микроорганизмов (ОЧМ), микробной биомассы (МБ), базального (БД) и удельного дыхания микроорганизмов (qCO_2), а также ферментативной активности (ФА). Помимо этого, на участках с географическими культурами в ризосфере саженцев сосны кедровой и сосны обыкновенной регистрировали этапы формирования специфических микробных сообществ, характерных для конкретных видов и климатипов растений.

Классическими микробиологическими методами определяли общую численность (ОЧМ) культивируемых микроорганизмов и экологотрофических групп (ЭТГМ), согласно Практикуму ..., 2005. Посев почвенной суспензии (0.05 мл) производили на следующий день после отбора образцов из разведений 1 : 10³ на поверхность питательных сред в чашках Петри в трехкратной по-

вторности. Засеянные чашки Петри инкубировали при температуре 27–28°C. Подсчет численности колоний бактерий проводили на 3–5 сут, а грибов – на 5–7-е сут. Число колониеобразующих единиц (КОЕ) высчитывали по формуле:

$$M = a \times 10^n / V,$$

где M – количество клеток в 1 мл;

a – среднее число колоний, выросшее при высеве из данного разведения;

10ⁿ – коэффициент разведения;

V – объем суспензии (мл), взятый для посева (Практикум ..., 2005).

Данные количественного учета пересчитывали на 1 г сухой почвы. Таксономическую принадлежность (до рода) бактерий и грибов проводили по культуральным и морфологическим характеристикам (Методы ..., 1991; Watanabe, 2002) с помощью микроскопа МИКМЕД-2 (ОАО Ломо).

Дыхательную (респирометрическую) активность микроорганизмов определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД) с использованием газового хроматографа Agilent 6890 N (США). По количеству выделяемого почвенными микроорганизмами CO₂ определяли микробную биомассу, МБ (С_{мик}) (Anderson, Domsch, 1978; Методы ..., 1991; Sparling et al., 1995), базальное дыхание (БД) и микробный метаболический коэффициент (qCO_2) (Anderson, Domsch, 1978; Anderson, Domsch, 1990; Ананьева, 2003).

Ферментативную активность почвы определяли методами А.Ш. Галстяна и Т.А. Щербаковой (Хазиев, 2005). Колориметрическими методами с использованием фотоэлектроколориметра КФК-3 определяли активность ферментов: инвертазы (И), уреазы (У), фосфатазы (Ф) с предварительным компостированием в течение 24 ч, активность пероксидазы (ПО) и полифенолоксидазы (ПФО) – с предварительным компостированием в течение 30 мин в термостате при температуре 30–38°C. Активность инвертазы выражали в мг глюкозы/г почвы, уреазы – в мг N-NH₄/г почвы, фосфатазы – в мг P₂O₅/г почвы, пероксидазы и полифенолоксидазы – в мг бензохинона/г почвы. По соотношению активности полифенолоксидазы и пероксидазы (ПФО/ПО) высчитывался коэффициент гумификации (K_r), позволяющий судить об интенсивности процесса минерализации гумуса (Хазиев, 2005).

Статистическая обработка результатов проведена с помощью пакета программ Excel–2003, Excel–2013. Для выявления зависимостей между микробиологической и ферментативной активностью исследуемых участков (гари, пожарища, географические культуры), pH, и влажности почвы были проведены дисперсионный и корреляционный анализы; коэффициенты корреляции (r) были значимы при p < 0.05 (p < 0.01).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Участки “Гари и Пожарища”. В 2015 г. все посадки 40–42-летних лесных культур были охвачены пожаром. На момент пожара средняя высота деревьев лиственницы и сосны составляла 7–12 м, вяза – 4 м (Сорокин и др., 2017; Коновалова и др., 2020).

Анализ почвы под нарушенными пожарами посадками лесных насаждений в течение нескольких лет исследований (2018–2020 гг.) показал, что на эколого-физическое состояние почвенных микробиомов оказывали влияние влажность и рН почвы. С 2018 г. по 2020 г. значения рН в среднем увеличились в щелочную сторону на 0.89 единиц (табл. 1), а влажность почвы понизилась в 1.2 и 1.3 раза по сравнению с 2018 г., что повлияло на численность микроорганизмов. Так, в 2019 г. отмечено снижение общей численности микроорганизмов (ОЧМ) в среднем на 18% по сравнению с 2018 г. и на 13% – с 2020 г. (рис. 1). На исследуемых участках (опытных и контрольных) преимущественно доминировали актиномицеты (р. *Streptomyces*), типичные представители степных ландшафтов, доля которых от общего количества бактерий в 2018 г. достигала 52.10% (ПЛР), в 2020 – 73.58% (ГСП), содоминантами выступали неспоровые бактерии – до 40.5–46.9% (ГЛР). Споровые бактерии р. *Bacillus* также регулярно обнаруживались в почвенных образцах, их доля в разные годы составляла от 11.7 до 37.2% общей численности. Самой малочисленной группой были микроскопические грибы, среди которых наиболее часто встречались зигомикетовые (*Zygomycota* MOREAU) из рода *Mortierella* Coem, предпочитающие некислые почвы и являющиеся классическими сапротрофами, активно участвующими в разложении органических веществ. Их доля в некоторых случаях достигала 80% от суммарной численности выявленных грибов. Также встречались грибы родов *Penicillium* Link, *Mucor* Fresen, *Cladosporium* Link, *Acremonium* Link., *Trichoderma* Pers. На протяжении исследований в почве под посадками доминировали представители олиготрофно-копиотрофного комплекса. Однако в 2020 г. на участках с погибшей лиственницей (ГЛР, ГЛМ) отмечали увеличение содержания гидролитиков до 37% по сравнению с 2018 г. за счет увеличения численности споровых бактерий (табл. 2). По-видимому, со временем разложение грубых растительных остатков (корневая система, в частности), оставшихся после пожара, становится доступным для освоения большому разнообразию микробных групп.

Содержание микробной биомассы (МБ) менялось в зависимости от породы древостоя по годам и месяцам вегетации (май–сентябрь). В течение наблюдений максимальные значения МБ отмечены в пожарищах лиственницы (ПЛМ – 1385 и

Таблица 1. Средние значения влажности (W) и рН почвенных образцов на участках “гари Пожарища” и “Географические культуры”

Код образца	Годы исследований							
	2017		2018		2019		2020	
	W, %	рН	W, %	рН	W, %	рН	W, %	рН
Участок “Гари и Пожарища”*								
ПЛМ	–	–	21	6.94	17.7	8.12	12	8.0
ПЛР	–	–	20.4	7.02	19.9	7.84	12	7.93
ГЛМ	–	–	22.1	7.17	20.1	7.94	14	8.35
ГЛР	–	–	20.3	7.08	19.6	7.4	18	7.25
ПВМ	–	–	19.7	6.97	21	8.39	19	8.63
ПВР	–	–	20.8	7.0	21	8.29	18	8.57
КЛВ	–	–	18.8	7.03	16.7	7.63	14.3	7.22
ГСП	–	–	12.7	7.1	8.7	7.5	10.7	7.92
КГС	–	–	13.6	7.13	10	7.5	9.5	7.59
Участок “Географические культуры”**								
К	10.2	7.06	12	7.01	12.3	8.42	6.9	8.38
КМ	15.7	6.98	15.8	7.04	14.2	8.3	12	7.97
КБ	16.7	6.75	20	7.03	14.6	7.97	12	7.96
СУ	13.9	6.85	16.5	7.21	16.3	8.52	12.6	8.08
СБ	23.5	6.84	21.9	7.11	17.4	8.56	12.7	8.19
СП	17.3	6.87	15.9	6.99	16.7	8.19	12.8	8.73

Примечание. Прочерк (–) – измерения не выполнялись;
 * ПЛМ – пожарище лиственница междурядье, ПЛР – пожарище лиственница ризосфера, ГЛМ – гарь лиственница междурядье, ГЛР – гарь лиственница ризосфера, ПВМ – пожарище вяз междурядье, ПВР – пожарище вяз ризосфера, КЛВ – контроль для лиственницы и вязов, ГСП – гарь сосна ризосфера, КГС – контроль гарь сосна;
 ** К – контроль (нераспаханный участок, прилегающий к посадкам); КМ – сосна кедровая “Монголия”; КБ – сосна кедровая “Байкал”; СУ – сосна обыкновенная “Усть-Кут”; СБ – сосна обыкновенная “Богучаны”; СП – сосна обыкновенная “Пудож”.

ПЛР – 1018 мкг С/г почвы) и вязов (ПВМ – 1298 и ПВР – 1226 мкг С / г почвы) (рис. 2а). Удельное микробное дыхание микроорганизмов в 2018 и 2020 гг. находилось в пределах эколого-физиологической нормы (qCO_2 – 5.6–6.0 мкг С- CO_2 /мг С/ч), в то время как в 2019 г при более низких значениях МБ наблюдали повышенное базальное и удельное дыхание (qCO_2 – 14.7 мкг С- CO_2 /мг С/ч) (рис. 2б), что свидетельствовало о стрессе микробиоценозов, вызванном снижением влажности. Высокие коэффициенты корреляции в 2018 г между влажностью и МБ ($r = 0.70$), в 2019 г. – между влажностью и МБ, и БД ($r = 0.50$ и 0.50) подтверждают наше предположение.

Согласно ряду данных, исследования даже 3–4 ферментов (оксидоредуктаз и гидролаз) достаточно, чтобы дать адекватную биохимическую ха-

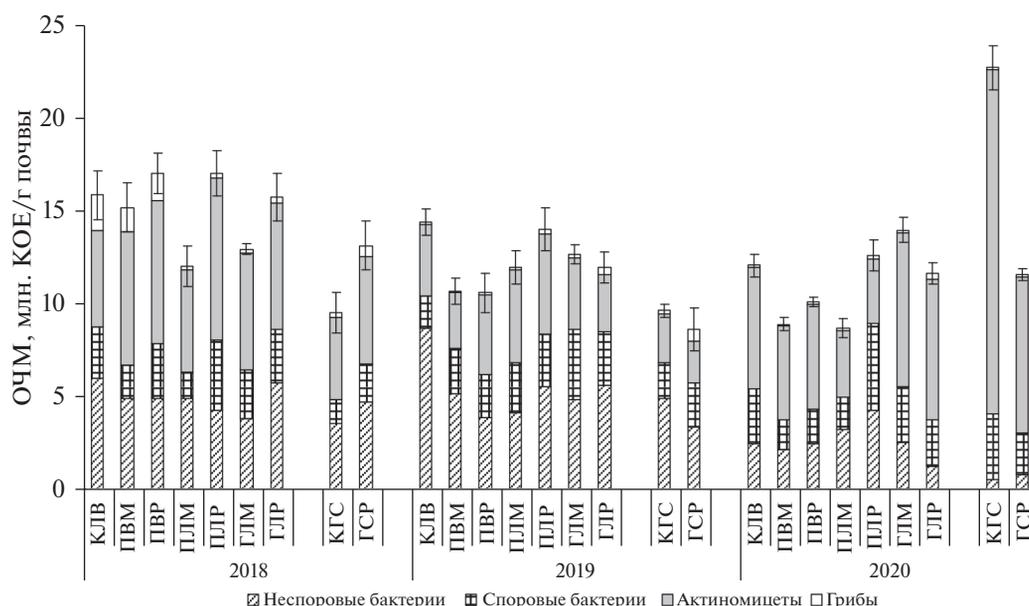


Рис. 1. Динамика общей численности микроорганизмов (ОЧМ) на участках “Гари и Пожарища” за вегетационные периоды 2018–2020 гг. (усредненные данные).

рактическую характеристику почвенному покрову (Казеев и др., 2003, 2004).

Активность гидролитических ферментов под разными культурами варьировала в течение года и сезона. На гарях под сосной (в наиболее сильно горевших участках) в 2019 г. отмечены самые низкие показатели активности инвертазы (29.2 мг/г) и фосфатазы (0.26 мг/г), а активность уреазы наоборот была высокой (до 1.87 мг/г.) (табл. 3). Такая ситуация свидетельствует о том, что активность углеродного и фосфорного метаболизма почвы участка ГСР замедлена при оптимизации напряженности азотного обмена. Ранее, при исследовании южно-таежных сосняков Средней Сибири, А.В. Богородская (2006) отмечала положительное действие низкоинтенсивных пожаров на биогенность почвы, которая выражалась в небольшом повышении активности гидролитических ферментов. К 2020 г. в среднем активность уреазы снизилась в 1.4 раза, а инвертазы и фосфатазы

увеличилась в 1.2 и 2 раза соответственно по сравнению с 2019 г. Максимальную активность фосфатазы (1.13–1.34 мг/г) регистрировали в междурядьях пожарищ лиственницы и вяза (ПЛМ и ПВМ). Высокие коэффициенты корреляции отмечены: в 2019 г. – между гидролитическими ферментами и влажностью₁ (от $r_1 = -0.50$ (У) до $r_1 = 0.79$ (Ф) и $r_1 = 0.88$ (И)) и рН₂ ($r_2 = 0.46$ (Ф) и $r_2 = 0.60$ (И)); в 2020 г. – между влажностью и Ф ($r_1 = 0.70$), и И ($r_1 = 0.60$).

Окислительно-восстановительный потенциал почвы участков гари и пожарищ диагностировали по активности оксидоредуктаз – полифенолоксидазы и пероксидазы. Полифенолпероксидазам отводится важная роль в формировании гумусовых веществ, устойчивых к разложению, участвующих в превращении соединений ароматического ряда. Они катализируют окисление моно-, ди-, трифенолов до хинонов в присутствии кислорода либо перекиси водорода (Хазиев, 2005;

Таблица 2. Соотношение эколого-трофических групп микроорганизмов (ЭТГМ) на участках “Гари и Пожарища”, %

ЭТГМ, %	КЛВ		ПВМ		ПВР		ПЛМ		ПЛР		ГЛМ		ГЛР		КГС		ГСР	
	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020	2018	2020
Гидролитики	18.55	11.53	20.74	15.84	13.63	16.98	17.73	18.53	24.02	18.62	17.36	54.91	19.37	20.29	13.36	21.54	16.83	21.35
Олиготрофы	59.89	53.98	54.73	62.25	64.56	60.71	60.45	53.21	54.9	50.05	57.98	32.77	60.9	58.96	58.49	50.98	61.58	59.46
Копиотрофы	21.56	34.49	24.53	21.91	21.81	22.31	21.82	28.26	21.08	31.33	24.65	12.32	19.73	20.76	28.15	27.48	21.59	19.19

Примечание. ПЛМ – пожарище лиственница междурядье, ПЛР – пожарище лиственница ризосфера, ГЛМ – гарь лиственница междурядье, ГЛР – гарь лиственница ризосфера, ПВМ – пожарище вяз междурядье, ПВР – пожарище вяз ризосфера, КЛВ – контроль для лиственницы и вязов, ГСР – гарь сосна ризосфера, КГС – контроль гарь сосна

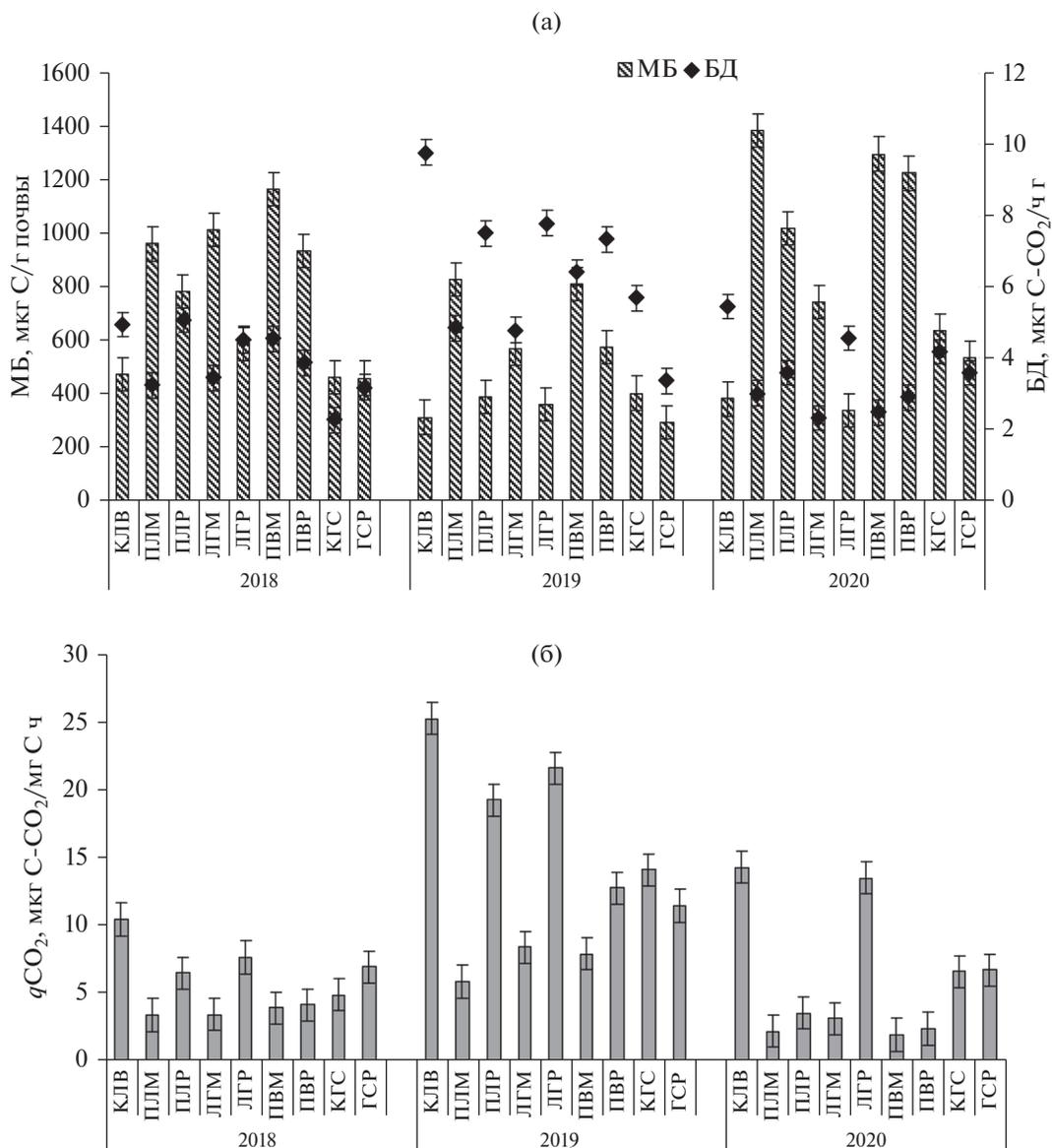


Рис. 2. (а) – Содержание микробной биомассы (МБ) и интенсивность базального дыхания (БД) микроорганизмов, (б) – значения микробного метаболического коэффициента (qCO_2) на участках “Гари и Пожарища” за вегетационные периоды 2018–2020 гг. (усредненные данные).

Якушев и др., 2014). В наших исследованиях максимум активности полифенолоксидазы и пероксидазы приходится в основном на гари (ЛГМ и ЛГР) и пожарища лиственницы (ПЛМ и ПЛР) – до 1.56–1.58 мг/г (табл. 3). Не менее важным показателем, указывающим на характер протекающих в почве процессов (минерализация гумуса или его новообразование), является коэффициент гумификации (K_g). И если в гарях сосны (ГСР) данный коэффициент в течение года остается достаточно низким, то в пожарищах лиственницы (ПЛМ и ПЛР) и вяза (ПВР и ПВР) он намного превышал 1 (табл. 3), что свидетельствует об удовлетворительных условиях для процес-

сов гумусонакопления и гумусообразования (Казеев, 2004; Якушев и др., 2014).

Участки “Географические культуры”

Создание плантации географических культур в условиях Ширинской степи вызвано необходимостью испытания климатических экотипов (популяций), отобранных после многолетних исследований в географических культурах в Богучанском и Ермаковском лесничествах Красноярского края (Кузьмина, Кузьмин, 2017). Испытание перспективных климатипов по комплексу лесохозяйственных показателей в новых лесорастительных услови-

Таблица 3. Ферментативная активность участков “Гари и Пожарища” за период 2019–2020 гг. (усредненные данные), $n = 3$

Код образца	Уреаза (У), мг N-NH ₄ /г почвы	Фосфатаза (Ф), мг P ₂ O ₅ /г почвы	Инвертаза (И), мг глюкозы/г почвы	Полифенол- оксидаза (ПФО)	Пероксидаза (ПО)	Коэффициент гумификации, K _г
				мг 1.4 – бензохинона/г почвы		
2019 г.						
КЛВ	2.01 ± 0.002	0.39 ± 0.02	61.24 ± 22.00	0.75 ± 0.02	0.80 ± 0.07	0.93
КГС	2.45 ± 0.40	0.22 ± 0.02	38.38 ± 4.95	0.47 ± 0.07	1.19 ± 0.42	0.43
ГСР	1.87 ± 0.14	0.26 ± 0.03	29.18 ± 12.69	0,54 ± 0.07	1.21 ± 0.04	0.44
ЛГМ	1.45 ± 0.53	0.49 ± 0.01	51.61 ± 9.44	1.16 ± 0.15	1.15 ± 0.18	1.01
ЛГР	1.81 ± 0.03	0.74 ± 0.16	60.27 ± 13.86	0.82 ± 0.11	1.03 ± 0.11	0.82
ПЛМ	1.59 ± 0.20	0.76 ± 0.21	66.29 ± 8.56	1.09 ± 0.11	0.86 ± 0.04	1.27
ПЛР	1.17 ± 0.04	0.63 ± 0.18	66.27 ± 2.24	1.23 ± 0.06	0.90 ± 0.04	1.36
ПВМ	1.79 ± 0.52	0.67 ± 0.02	68.81 ± 9.17	0.99 ± 0.13	0.79 ± 0.08	1.25
ПВР	2.11 ± 0.48	0.51 ± 0.01	60.56 ± 8.10	0.97 ± 0.13	0.77 ± 0.01	1.25
2020 г.						
КЛВ	1.54 ± 0.46	1.10 ± 0.75	79.91 ± 3.34	1.16 ± 0.44	0.90 ± 0.17	1.24
КГС	1.85 ± 1.01	0.59 ± 0.40	55.24 ± 11.91	0.82 ± 0.27	1.23 ± 0.39	0.82
ГСР	1.51 ± 0.51	0.87 ± 0.64	40.75 ± 24.25	0.95 ± 0.34	1.12 ± 0.14	0.90
ЛГМ	0.74 ± 0.17	1.29 ± 0.78	50.14 ± 7.98	1.58 ± 0.27	1.29 ± 0.03	1.23
ЛГР	1.35 ± 0.42	1.06 ± 0.48	64.49 ± 9.63	1.22 ± 0.50	1.16 ± 0.01	1.05
ПЛМ	1.26 ± 0.13	1.19 ± 0.63	69.66 ± 5.19	1.43 ± 0.22	1.07 ± 0.17	1.33
ПЛР	0.99 ± 0.14	0.83 ± 0.38	65.83 ± 2.68	1.56 ± 0.27	1.25 ± 0.31	1.27
ПВМ	1.20 ± 0.07	1.34 ± 0.69	79.54 ± 1.56	1.39 ± 0.27	1.07 ± 0.20	1.31
ПВР	1.38 ± 0.24	1.13 ± 0.62	73.54 ± 21.08	1.37 ± 0.26	1.05 ± 0.26	1.33

Примечание. КЛВ – Контроль для лиственницы и вяза, КГС – сосна гарь контроль; ГСР – сосна гарь ризосфера; ЛГМ – лиственница гарь междурядье; ЛГР – лиственница гарь ризосфера; ПЛМ – пожарище лиственница междурядье; ПЛР – пожарище лиственница ризосфера; ПВМ – пожарище вяз междурядье; ПВР – пожарище вяз ризосфера.

ях региона является одним из требований сортоиспытания. Результаты испытания в условиях Ширинской степи позволят получить полезную информацию по адаптации климатипов *Pinus* sp., вопросам перемещения семян и посадочного материала, а также для объективной оценки сортов-популяций, корректировки лесосеменного районирования сосны обыкновенной и сосны кедровой в Сибири.

Известно, что растения в процессе развития (филлосфера и ризоплана) выделяют в окружающую среду продукты вторичного метаболизма, многие из которых обладают фитонцидными свойствами. При этом наблюдается видоспецифичность этих выделений, что приводит к формированию микробного сообщества, характерного для конкретного вида растения при равных других гидротермических факторах (Рощина, 2012). Особый интерес вызывало формирование специфических микробных сообществ под разными видами и климатическими экотипами *Pinus* sp. с первого года после высадки саженцев.

Исследования 2017–2020 гг. показали, что под посадками географических культур проявились первые признаки изменения нативного почвенного микробиоценоза. Несмотря на то, что все климатипы формируют схожие по таксономическому составу микробные сообщества, отмечены тенденции их изменения в сторону формирования специфических для видов хвойных микробиомов, обусловленных особенностями качественного состава экзометаболитов корневой системы.

Кроме того, за период наблюдений (2017–2020 гг.) значения pH в среднем существенно увеличались в щелочную сторону на 1.33 единицы, а влажность почвы понизилась в 1.2 и 1.6 раза по сравнению с 2018 г. (табл. 1), что повлияло на численность микроорганизмов (рис. 4). Под климатипами сосны кедровой за весь период исследования отмечена более низкая общая численность микроорганизмов (ОЧМ), чем в контроле и под климатипами сосны обыкновенной. По-видимому, корневые выделения сосны кедровой форми-

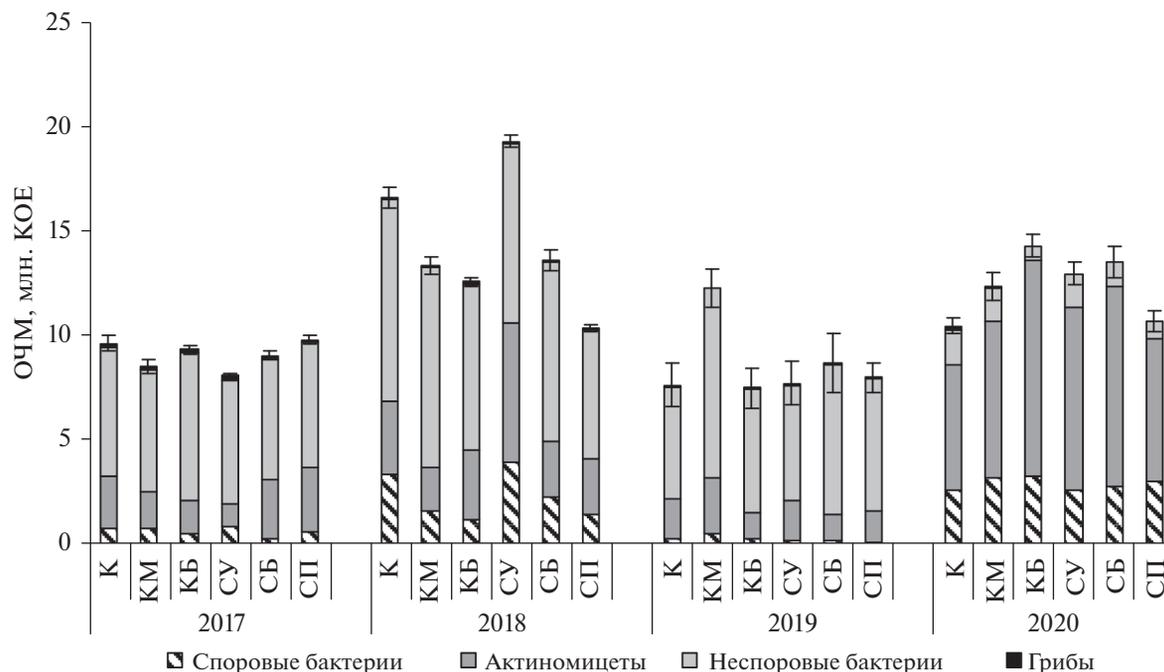


Рис. 3. Динамика общей численности микроорганизмов (ОЧМ) на участках “Географические культуры” (усредненные значения) за вегетационные периоды 2017–2020 гг.

руют более специфические микробоценозы, чем сосны обыкновенной. В среднем ОЧМ в 2020 г. превышала таковую в 2017 в 1.4, в 2019 – в 1.5 раза, и была ниже, чем в 2018 г. в 1.4 раза. В 2020 г. значительно увеличилось число спорных бактерий (актиномицетов в том числе) и снизилось количество грибов и неспорных форм (рис. 3).

В ризосферной почве климатипов в течение 4-х лет выявляли типичных и специфичных представителей микробного сообщества для сосны кедровой и сосны обыкновенной, оказывающих влияние на рост саженцев. В основном это неспорные (рр. *Pseudomonas* Migula, *Xanthomonas* Dowson) и спорные бактерии (рр. *Actinobacteria* Goodfellow, *Streptomyces* Waksman and Henrici и *Bacillus* Coch.). Грибы были самой малочисленной группой, преимущественно микромицеты, дрожжевые формы находили только в варианте СБ. Среди микромицетов доминировали представители родов *Mortierella* (до 60% от всех выделенных грибов) и *Penicillium*. Также выделяли грибы родов *Mucor*, *Cladosporium*, *Trichoderma* и *Fusarium* Link.

За период исследований в почве под саженцами отмечены изменения в соотношении экологотрофических групп микроорганизмов (табл. 4). Под саженцами климатипов преобладали олиготрофные группы микроорганизмов, их доля колебалась в пределах 50.6–68.3%, содоминантами выступали копиотрофы. В почве климатипов кедр сибирского (КБ и КМ) доля гидролитиков не-

сколько выше, чем в остальных вариантах (табл. 4). В целом же, согласно усредненным данным за 2017–2020 гг., во всех вариантах наблюдалась тенденция к уменьшению доли гидролитиков (в 1.3 раза) и увеличению доли копиотрофов. Подобные изменения мы связываем с тем, что растительные остатки, попавшие в почву при вспашке участка и являвшиеся дополнительным субстратом для гидролитиков, деструктурировались, а корневая система укоренившихся саженцев стала выделять экзометаболические вещества в ризосферную зону, что обусловило рост численности копиотрофной группы микроорганизмов. Олиготрофная составляющая микробного комплекса в ряде вариантов либо оставалась на прежнем уровне (СБ, КБ), либо имела тенденцию к снижению численности, однако данное явление было отмечено и в контроле, что, возможно, обусловлено погодными условиями.

Динамика микробной биомассы (МБ) в первый вегетационный период во всех вариантах опыта и в контроле развивалась однотипно. На второй, третий и четвертый годы посадки под саженцами заметно проявлялось влияние корневых выделений на содержание МБ. В период 2018–2019 гг. корневые выделения сосны кедровой и сосны обыкновенной формируют большие, по сравнению с контролем, значения МБ, причем под сосной кедровой значения МБ выше (в среднем в 1.3 раза), чем под сосной обыкновенной. В 2020 г. общее содержание МБ под климатипами снизилось в 1.2 раза по сравнению с 2017 и 2019 гг.,

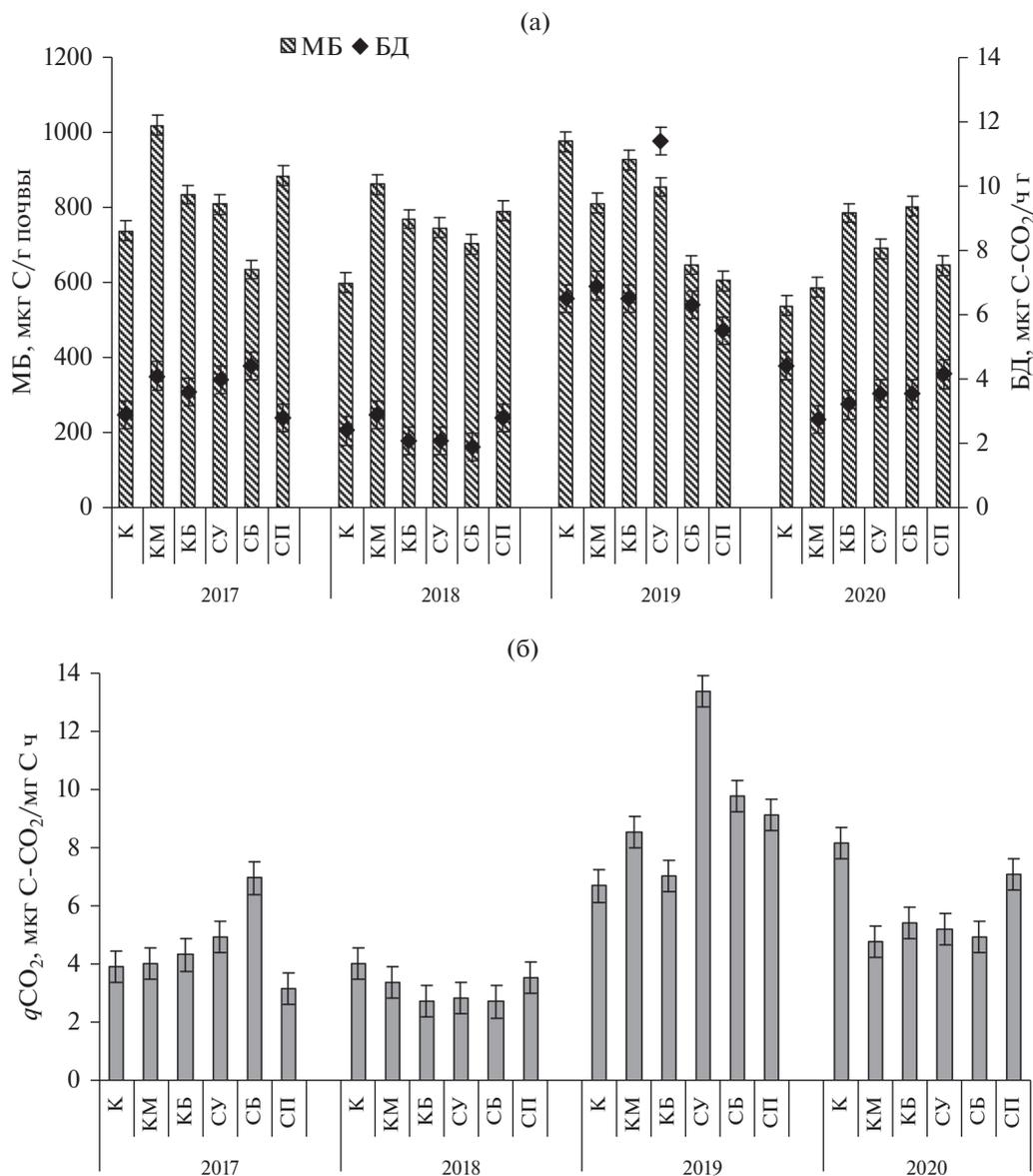


Рис. 4. (а) – Содержание микробной биомассы (МБ) и интенсивность базального дыхания (БД) микроорганизмов, (б) – значения микробного метаболического коэффициента ($q\text{CO}_2$) на участках “Географические культуры” за период 2017–2020 гг. (усредненные данные).

Таблица 4. Соотношение эколого-трофических групп микроорганизмов (ЭТГМ) за 2017–2020 гг. в ризосфере климатипов *Pinus* sp.

ЭТГМ, %	К		СУ		СБ		СП		КМ		КБ	
	2017	2020	2017	2020	2017	2020	2017	2020	2017	2020	2017	2020
Гидролитики	11.37	9.55	14.75	10.91	15.32	7.97	16.69	14.10	17.85	14.07	16.59	16.00
Копиотрофы	25.26	32.71	16.93	24.37	20.02	26.24	27.81	35.32	19.98	26.51	22.98	22.28
Олиготрофы	63.37	57.74	68.32	64.72	64.67	65.79	55.49	50.58	62.17	59.41	60.43	61.71

Примечание. К – контроль (нераспаханный участок, прилегающий к посадкам); КМ – сосна кедровая “Монголия”; КБ – сосна кедровая “Байкал”; СУ – сосна обыкновенная “Усть-Кут”; СБ – сосна обыкновенная “Богучаны”; СП – сосна обыкновенная “Пудож”.

Таблица 5. Ферментативная активность и коэффициенты гумификации участка “Географические культуры” за период 2017–2020 гг. (усредненные данные), $n = 3$

Код образца	Уреаза (У), мг N-NH ₄ /г почвы	Фосфатаза (Ф), мг P ₂ O ₅ /г почвы	Инвертаза (И), мг глюкозы/г почвы	Полифенолоксидаза (ПФО)	Пероксидаза (ПО)	Коэффициент гумификации (K _г)
				мг 1,4 – бензохинона/г почвы		
2017 г.						
К	0.95 ± 0.02	0.52 ± 0.12	34.11 ± 3.22	0.69 ± 0.03	0.56 ± 0.08	1.25
КМ	1.77 ± 0.12	0.71 ± 0.08	26.80 ± 3.07	0.68 ± 0.05	0.64 ± 0.04	1.06
КБ	1.86 ± 0.26	0.65 ± 0.08	27.03 ± 2.04	0.69 ± 0.08	0.62 ± 0.04	1.14
СУ	1.58 ± 0.12	0.64 ± 0.03	24.70 ± 0.04	0.77 ± 0.05	0.59 ± 0.09	1.36
СБ	1.89 ± 0.18	0.74 ± 0.10	26.89 ± 2.34	0.63 ± 0.09	0.56 ± 0.08	1.13
СП	1.66 ± 0.02	0.52 ± 0.05	27.94 ± 1.68	0.63 ± 0.03	0.64 ± 0.01	0.99
2018 г.						
К	0.90 ± 0.02	0.59 ± 0.08	37.84 ± 2.44	0.49 ± 0.16	0.40 ± 0.08	1.23
КМ	1.63 ± 0.25	0.73 ± 0.13	30.36 ± 2.39	0.58 ± 0.19	0.48 ± 0.14	1.10
КБ	1.76 ± 0.16	0.66 ± 0.12	30.82 ± 1.85	0.51 ± 0.28	0.42 ± 0.11	1.15
СУ	1.65 ± 0.15	0.68 ± 0.07	30.50 ± 2.46	0.47 ± 0.21	0.44 ± 0.09	1.23
СБ	1.49 ± 0.15	0.77 ± 0.11	30.89 ± 2.04	0.62 ± 0.17	0.52 ± 0.12	1.14
СП	1.52 ± 0.01	0.61 ± 0.10	32.11 ± 0.85	0.63 ± 0.21	0.48 ± 0.12	1.11
2019 г.						
К	1.61 ± 0.22	0.43 ± 0.17	63.15 ± 4.49	0.48 ± 0.05	0.42 ± 0.01	1.22
КМ	1.38 ± 0.46	0.65 ± 0.25	44.65 ± 9.85	0.56 ± 0.08	0.43 ± 0.12	1.15
КБ	1.44 ± 0.37	0.54 ± 0.24	47.51 ± 5.19	0.55 ± 0.02	0.35 ± 0.07	1.26
СУ	1.10 ± 0.27	0.55 ± 0.07	35.96 ± 11.17	0.55 ± 0.05	0.47 ± 0.02	1.22
СБ	1.57 ± 0.49	0.29 ± 0.07	35.33 ± 13.32	0.56 ± 0.07	0.40 ± 0.08	1.21
СП	1.53 ± 0.51	0.51 ± 0.07	52.29 ± 1.09	0.49 ± 0.11	0.40 ± 0.04	1.15
2020 г.						
К	2.03 ± 0.32	0.91 ± 0.14	65.49 ± 3.41	0.50 ± 0.05	0.50 ± 0.10	0.99
КМ	1.52 ± 0.30	1.55 ± 0.32	44.31 ± 4.75	0.71 ± 0.08	0.47 ± 0.05	1.49
КБ	1.24 ± 0.08	2.21 ± 0.71	55.24 ± 1.27	0.56 ± 0.02	0.50 ± 0.06	1.13
СУ	0.87 ± 0.02	1.27 ± 0.32	43.77 ± 9.49	0.55 ± 0.03	0.49 ± 0.05	1.13
СБ	1.24 ± 0.08	1.01 ± 0.39	48.55 ± 13.27	0.64 ± 0.02	0.50 ± 0.07	1.28
СП	2.83 ± 0.39	1.05 ± 0.23	56.80 ± 2.81	0.63 ± 0.09	0.53 ± 0.06	1.18

Примечание. К – контроль (нераспаханный участок, прилегающий к посадкам); КМ – сосна кедровая “Монголия”; КБ – сосна кедровая “Байкал”; СУ – сосна обыкновенная “Усть-Кут”; СБ – сосна обыкновенная “Богучаны”; СП – сосна обыкновенная “Пудож”.

предполагаем, что это связано с формированием специфических для видов *Pinus* sp. ризосферных сообществ. Наибольшие значения МБ отмечены под климатипами КБ и СБ – 785 и 803 мкг С/г почвы соответственно (рис. 4а). Интенсивность микробного дыхания (БД и qCO_2) снизилась, приблизившись к эко-физиологической норме. На содержание МБ, БД и qCO_2 оказывали влияние влажность, температура и рН почвы. Так, в 2019 г. при пониженной влажности почвы (табл. 1) наблюдали повышенное базальное и удельное дыхание (в среднем qCO_2 – 9.1 мкг С- CO_2 /мг С/ч) (рис. 4б).

Отмечены высокие коэффициенты корреляции между влажностью и МБ ($r = 0.64$), и qCO_2 ($r = -0.74$), а также между рН и БД ($r = 0.82$), и qCO_2 ($r = 0.74$).

Активность гидролитических ферментов на всех участках была низкой по сравнению с контролем (пашней) на всем протяжении исследования (2017–2020 гг.). Активность инвертазы (фермента, ответственного за гидролиз сахаров) под всеми климатипами повышалась с 2017 по 2020 гг. с 34 до 65.5 мг/г, однако не превышала таковую на контроле (пашня), где она составляла в среднем 45 мг/г почвы (табл. 5). Возможно, это связано с тем, что в процессе зарастания пашни увеличиваются запасы корней в верхнем слое почвы, и это в целом влияет на напряженность биологических процессов, а также положительным образом сказывается на общей биохимической обстановке пахотного слоя. Наибольшая средняя активность уреазы в основном была зарегистрирована под

климатипами кедров байкальского и монгольского (КБ и КМ) – до 1.5 мг/г, а активность инвертазы под климатипом СП до 42.3 мг/г. Наиболее высокая активность фосфатазы была отмечена под КБ – до 1 мг/г почвы (табл. 5). В течение 2017–2018 г. активность гидролаз под саженцами зависела больше от влажности, чем от рН. Отмечены высокие коэффициенты корреляции в 2017 г. между ферментами, влажностью₁ ($r_1 = 0.81$ (У), $r_1 = 0.63$ (Ф), $r_1 = -0.82$ (И)) и рН₂ ($r_2 = -0.75$ (У) и $r_2 = 0.69$ (И)); в 2018 г. между влажностью₁ и У ($r_1 = 0.65$), Ф ($r_1 = 0.71$), И ($r_1 = -0.70$). С рН коррелировала только фосфатаза ($r_2 = 0.50$). В 2019 г. и 2020 г. наибольшее значение на активность гидролитических ферментов оказывали рН₂ и t₃ почвы: ($r_2 = 0.89$ (У), $r_2 = -0.66$ (Ф), $r_2 = 0.56$ (И)); ($r_3 = 0.61$ (У), $r_3 = -0.67$ (Ф), $r_3 = 0.80$ (И)).

Активность оксидоредуктаз была существенно выше, чем гидролаз. Наибольшие значения ПФО проявляла под климатипом СУ – до 0.77 мг/г почвы, в то время как пероксидаза под КМ и СП увеличилась до 0.63 мг/г почвы. С самым высоким коэффициентом гумификации (K_г) оказалась почва под климатипом кедра байкальского (1.25) и кедра монгольского (до 1.5), причем коэффициенты гумификации растут с 2017 по 2020 год под всеми климатипами, за исключением СУ, в то время как на контроле он снизился с 1.25 до 0.99.

Следует отметить, что K_г везде в основном оставался больше единицы, что говорит об удолетворительных условиях минерализации органического вещества черноземов. Причем в начале исследований (2017 г.) данный коэффициент имел тренд к увеличению в конце вегетационного периода, в процессе зарастания пашни мы видим обратное явление: в сентябре 2018–2019 гг. данный коэффициент снижается до 0.85–1.0. А.В. Якушев (2014) отмечал, что при потеплении климата изменение запасов почвенного гумуса зависит от температурной чувствительности полифенолоксидаз, что подтверждают высокие коэффициенты корреляции между температурой почвы и ПО ($r_3 = 0.53$), ПФО ($r_3 = -0.52$) и K_г ($r_3 = -0.45$) в 2020 г. Они играют важную роль в разложении лигнина, минерализации и образовании гумуса. За период исследований наблюдается “выравнивание” коэффициента гумификации по сравнению с контролем и его небольшое повышение (табл. 5).

Отмечено, что по имеющимся шкалам энзимологической активности (Гапонюк, Малахов С.В, 1985; Звягинцев, 1987) активность гидролитических ферментов считается низкой, в то время как активность пероксидазы и полифенолоксидазы на протяжении 3-х лет исследований остается высокой. Cusack с соавторами (Cusack et al., 2010) отмечали, что при потеплении климата наблюдается снижение активности гидролаз, а активность

оксидоредуктаз не изменяется. Также активность всех ферментов снижается в конце вегетационного периода (сентябрь), но остается высокой в мае-июне на всем протяжении исследования. Wallenstein и Weintraub (2008) доказали, что активность ферментов возрастает с повышением температуры (до некоторого оптимума) и из-за потепления климата, по крайней мере, теоретически, должна увеличиваться скорость ферментативных реакций. С другой стороны, микробы могут снизить синтез фермента и его секрецию в ответ на потепление (Allison, 2005; Wallenstein et al., 2012; Henry, 2013).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На участках “Тари и Пожарища” численность основных групп почвенных микробных сообществ (ОЧМ), содержание микробной биомассы (МБ) и интенсивность дыхания микроорганизмов (БД) изменялись в большей степени в зависимости от влажности почвы, в меньшей – от температуры и рН. На восстановившихся пожарищах отмечены большие значения общей микробной численности (ОМЧ) и биомассы (МБ). На пожарищах вяза и лиственницы наибольшие значения ОЧМ зарегистрированы в ризосфере, а МБ – между рядами посадок. В целом за 3 года исследований изменилось соотношение ЭТГМ в сторону увеличения гидролитико-копиотрофных групп и уменьшение олиготрофов, о чем свидетельствует снижение их численности в 2.2 и увеличение гидролитиков в 1.2 раза. Ферментативная активность почвы в гарях и пожарищах увеличивается в течение периода вегетации, что может отражать как сезонные климатические изменения, так и повышение интенсивности почвенных биологических процессов, связанных с восстановлением лесорастительной способности горевшей почвы. На пожарищах вязов (в ризосфере и между рядами) состояние почвенных микробиомов близко таковым контрольным участкам, что отражает большинство микробиологических индикаторов. В гарях лиственницы, и особенно сосны, почвенные микробные сообщества еще не достигли своей эко-физиологической нормы.

На участках “Географические культуры” под саженцами *Pinus* sp. формируются специфические ризосферные микробные сообщества, обусловленные влиянием не только абиотических факторов, но и корневых выделений, о чем свидетельствуют значения общей микробной численности и перегруппировка эколого-трофической структуры микробных сообществ, микробная биомасса и энзиматическая активность под климатипами. После четырех лет вегетации отмечены достоверные различия значений общей численности микроорганизмов ризосферной зоны среди климатипов сосны кедровой и сосны обыкновенной.

новенной (СП), что говорит о способности корневых выделений растений одного вида, но различного географического происхождения формировать специфические микробценозы. В ризосферной почве климатипов выявили бактерии, оказывающих влияние на рост саженцев. В основном это неспоровые (pp. *Pseudomonas*, *Xanthomonas*) и споровые бактерии (pp. *Actinobacteria* и *Bacillus*). Самой малочисленной группой были грибы, преимущественно микромицеты, среди которых доминировали представители рода *Mortierella* Coem (до 60% от всех выявленных грибов). Отмечено снижение микромицетов из р. *Penicillium* (на 10–15%). На участках с географическими культурами идет процесс формирования микробных сообществ под саженцами *Pinus* sp., который далек от завершения, об этом свидетельствуют все микробные индикаторы.

Адекватными универсальными микробиологическими индикаторами для диагностики и мониторинга состояния почвы сухой озерно-котловинной Ширинской степи в исследуемых фитоценозах являлись: соотношение эколого-трофических групп микроорганизмов (ЭТГМ), содержание микробной биомассы (МБ), коэффициент удельного микробного дыхания (qCO_2). Специфическими индикаторами являлись: для участков “Гари и Пожарища” — увеличение доли популяций споровых бактерий из родов *Bacillus* и *Streptomyces*, грибов р. *Trichoderma*; для участков “Географические культуры” — увеличение доли популяции ризосферных грибов из родов *Mortierella* и *Mucor* и снижение доли грибов из рода *Penicillium*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Н.Д. Микробиологические аспекты самоочищения и устойчивости почв. М.: Наука, 2003. 222 с.
- Богородская А.В. Влияние пожаров на микробные комплексы почв сосновых лесов Средней Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук (спец. 03.00.16; 03.00.07). Красноярск. 2006. 21 с.
- Гапонюк Э.И., Малахов С.В. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Труды 4-го Всесоюз. совещ. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. С. 3–10.
- ГОСТ 28268-89 Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений.
- Гродницкая И.Д., Сенашова В.А., Пашкеева О.Э., Антонов Г.И. Микробиологическая индикация почв зоны сухой степи в искусственных фитоценозах после пожара и агротехнических воздействий (Р. Хакасия) // Электронное издание. Материалы IX Всероссийской научной конференции с международным участием “Лесные почвы и изменение климата”. М.: ЦЭПЛ РАН, 2021. С. 52–56. https://forestsoil.ru/wp-content/uploads/2021/09/SBORNIK_LESNYE_POCHVY_I_IZMENENIE_KLIMATA_2021.pdf
- Звягинцев Д.Г. Почва и микроорганизмы. М.: Из-во МГУ, 1987. 256 с.
- Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.
- Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 2003. 204 с.
- Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биология почв Юга России. Ростов-на-Дону: Изд-во ЦВВР, 2004. 350 с.
- Коновалова А.Е., Коновалова М.Е., Пименов А.В. Особенности роста по диаметру красно- и желтопыльничковой форм сосны обыкновенной // Сибирский лесной журн. 2020. № 3. С. 63–72.
- Кузьмина Н.А., Кузьмин С.Р. Анализ динамики роста климатипов сосны обыкновенной в географических культурах в Средней Сибири // Сибирский лесной журн. 2017. № 2. С. 31–39.
- Кулик К.Н. Опустынивание земель и защитное лесоразведение в Российской Федерации // Опустынивание земель и борьба с ним. Абакан. 2007. С. 25–29.
- Курбатский Н.П. Терминология лесной пирологии // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР. 1972. С. 171–231.
- Лобанов А.М. Роль защитных лесных насаждений Ширинской степи в предотвращении опустынивания // Опустынивание земель и борьба с ним. Абакан. 2007. С. 87–94.
- Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во Моск. университета, 1991. 303 с.
- Мишустин Е.Н. Микробные ассоциации почвенных типов. В кн.: Проблемы и методы биологической диагностики и индикации почв. М.: Наука, 1976. С. 19–42.
- Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 603 с.
- Рощина В.В., Рощина В.Д. Выделительная функция высших растений. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 476 с.
- Сенашова В.А., Гродницкая И.Д., Пашкеева О.Э., Антонов Г.И. Формирование почвенных микробных сообществ под географическими культурами *Pinus* sp. в аридных условиях // Экосистемы Центральной Азии: исследование, сохранение, рациональное использование: материалы XV Убсунурского Международного симпозиума. Кызыл (5-8 июля 2020 г.) / Под ред. Ч.Н. Самбыла. Красноярск: Изд-во “Офсет”, 2020. С. 161–165. ISBN 978-5-6044448-0-1
- Сорокин Н.Д., Молоков В.А. Повышение приживаемости культур лиственницы в степных районах Хакасии // Лес. хоз-во. 1985. № 5. С. 55–57.
- Сорокин Н.Д., Сорокина О.А. Опыт повышения жизнеспособности лиственницы (*Larix sibirica*) в условиях сухостепных почв Ширинского заповедника (Хакасия) // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2009. Т. 18. № 2. С. 64–69.
- Сорокин Н.Д., Сенашова В.А., Сорокина О.А. Биогенность почв как показатель устойчивости искусственных лесных насаждений в сухостепных условиях Хакасии // Известия РАН. Серия биологическая. 2017. № 3. С. 329–336. <https://doi.org/10.7868/S0002332917030092>

- Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
- Шарагин А.М. Влияние лесных пожаров на экологическую ситуацию // Успехи современного естествознания. 2011. № 7. С. 236.
- Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Якушев А.В., Кузнецова И.Н., Благодатская Е.В., Благодатский С.А. Зависимость активности полифенолпероксидаз и полифенолоксидаз в современных и погрешенных почвах от температуры // Почвоведение. 2014. № 5. С. 590–596.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14050268>
- Allison S.D. Cheaters, diffusion and nutrients constrain decomposition by microbial enzymes in spatially structured environments // Ecology Letters. 2005. V. 8. № 6. P. 626–635.
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biology and Biochemistry. 1978. V. 10. № 3. P. 314–322.
- Anderson T.H., Domsch K.H. Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomass from soils of different cropping histories // Soil Biology and Biochemistry. 1990. V. 22. P. 251–255.
- Bulgarelli D., Schlaeppi K., Spaepen S., Ver Loren van Themaat E., Schulze-Lefert P. Structure and function of bacterial microbiota of plants // Annual Review of Plant Biology. 2013. V. 64. P. 807–838.
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120106>
- Cusack D.F., Torn M.S., McDowell W.H., Silver W.L. The response of heterotrophic activity and carbon cycling to nitrogen additions and warming in two tropical soils // Global Change Biology. 2010. V. 16. № 9. P. 2555–2572.
- Henry H.A.L. Soil extracellular enzyme dynamics in a changing climate // Soil Biology and Biochemistry. 2013. № 47. P. 53–59.
- Sparling G.T. The substrate-induced respiration method // Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Acad. Press, London. 1995. P. 397–404.
- Schlaeppi K., Bulgarelli D. The plant microbiome at work // Mol. Plant-Microbe Interact. 2015. V. 28. № 3. P. 212–217.
<https://doi.org/10.1094/MPMI-10-14-0334-FI>
- Wallenstein M.D., Haddix M.L., Lee D.D., Conant R.T., Paul E.A. A litter-slurry technique elucidates the key role of enzyme production and microbial dynamics in temperature sensitivity of organic matter decomposition // Soil Biology and Biochemistry. 2012. № 47. P. 18–26.
- Wallenstein M.D., Weintraub M.N. Emerging tools for measuring and modeling the in situ activity of soil extracellular enzymes // Soil Biology and Biochemistry. 2008. V. 40. № 9. P. 2098–2106.
- Watanabe T. Pictorial atlas of soil and seed fungi: morphologies of cultured fungi and key to species. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, Inc., 2002. 506 p.

Soils' Microbiological Indication in Forest Plantations of the Shirinskaya Steppe

I. D. Grodnitskaya¹*, V. A. Senashova¹, G. I. Antonov¹, and O. E. Pashkeeva¹

¹Institute of Forest of SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

*E-mail: igrod@ksc.krasn.ru

To combat the land degradation and desertification, sustainable long-term protective forest plantations are being created on the erosion-prone lands of steppe ecosystems, performing water and soil protection functions. In the Shirinskaya dry lake-basin steppe (Khakassia) in the coastal zone of the Shira lake the staff of Sukachev Forest Institute SB RAS has created artificial plantings of forest cultures (*Pinus sylvestris* L., *Larix sibirica* L., *Ulmus humilis* L.) and the provenance trials (*P. sibirica* Du Tour, *P. sylvestris*). All the plantings were carried out on the same soil type – agrozems of accumulative-carbonate dark light and medium loamy. As a result of a fire in 2015, the coastal 40-year-old forest cultures were damaged, and the surface soil layer was burnt out. Agrotechnical soil cultivation for planting provenance trials (2017) and fire in forest cultures affected the state of soil microbiomes in them. The aim of the research was to assess the rate of recovery and formation of biological soil properties in forest plantations after anthropogenic disturbances (fire and agrotechnical influences) in the coastal dry-steppe zone of the Shira lake with the help of microbiological indicators. The research objects were the “Fire and conflagration scenes” and “Provenance trials” sites. With the help of microbial indicators, it was found that the soil microbiomes on the “Fire and conflagration scenes” were being restored with different intensities. The recovery of soil microbiomes on conflagration scenes was much faster than in burnt areas, as evidenced by high values of total number of microorganisms (TNM), microbial biomass (MB), enzymatic activity (EA) and humification coefficient (Ch), that are approaching the control values. Specific microbial respiration (qCO₂) was within the range of natural variability. In the burnt soil there was an increase in proportion of the hydrolytic microorganisms, actively participating in the decomposition of half-burnt plant residues. On the provenance trial sites under the *Pinus* sp. seedlings the process of specific rhizosphere microbiomes formation is underway, due to the influence of climatotypes' root exudates. The values of TNM, ETGM, MB, EA, qCO₂ change either upwards or downwards, the state of microbial communities has not reached its eco-physiological norm.

Keywords: dry lake-basin steppe, soil microbiomes, artificial plantings, provenance trials, anthropogenic impact, microbial indicators.

Acknowledgements: The study has been carried out within the framework of the basic project of the Forest Institute, Siberian Branch of the RAS № 0287-2021-0011.

REFERENCES

- Allison S.D., Cheaters, diffusion and nutrients constrain decomposition by microbial enzymes in spatially structured environments, *Ecology Letters*, 2005, No. 8, pp. 626–635.
- Anan'eva N.D., *Mikrobiologicheskie aspekty samoochishcheniya i ustoichivosti pochv* (Microbiological aspects of self-cleaning and soil stability), Moscow: Nauka, 2003, 222 p.
- Anderson J.P.E., Domsch K.H., A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils, *Soil Biol. Biochem*, 1978, Vol. 10, No. 3, pp. 314–322.
- Anderson T.H., Domsch K.H., Application of eco-physiological quotients qCO_2 and qD on microbial biomass from soils of different cropping histories, *Soil Biol. Biochem*, 1990, Vol. 22, pp. 251–255.
- Baldrian P., Merhautova V., Petrakova M., Cajthaml T., Snajdr J., Distribution of microbial biomass and activity of extracellular enzymes in a hardwood forest soil reflect soil moisture content, *Applied Soil Ecology*, 2010, No. 46, pp. 177–182.
- Bogorodskaya A.V., *Vliyaniye pozharov na mikrobnyye komplekxy pochv sosnovykh lesov Srednei Sibiri: avtoref. diss. kand. biol. nauk* (The influence of fires on microbial complexes of soils in pine forests. Extended abstract of Candidate's biol. sci. thesis), Krasnoyarsk, 2006, 21 p.
- Bulgarelli D., Schlaeppi K., Spaepen S., Ver Loren van Themaat E., Schulze-Lefert P., Structure and function of bacterial microbiota of plants, *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2013, Vol. 64, pp. 807–838.
doi 10.1146/annurev-arplant-050312-120106
- Cusack D.F., Torn M.S., McDowell W.H., Silver W.L., The response of heterotrophic activity and carbon cycling to nitrogen additions and warming in two tropical soils, *Global Change Biology*, 2010, No. 16, pp. 2555–2572.
- Gaponyuk E.I., Malakhov S.V., Kompleksnaya sistema pokazatelei ekologicheskogo monitoringa pochv (Integrated system of indicators for environmental monitoring of soils), *Migratsiya zagryaznyayushchikh veshchestv v pochvakh i so-predel'nykh sredakh*, Proc. of The Fourth All-Union meeting, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, pp. 3–10.
- GOST 28268-89.
- Grodnitskaya I.D., Senashova V.A., Pashkeeva O.E., Antonov G.I., Mikrobiologicheskaya indikatsiya pochv zony sukhoy stepi v iskusstvennykh fitotsenozakh posle pozhara i agrotekhnicheskikh vozdeystvii (R. Khakasiya) (Microbiological indication of soils in the dry steppe zone in artificial phytocenoses after fire and agrotechnical impacts (R. Khakassia), *Lesnye pochvy i izmenenie klimata* (Forest soils and climate change), Proc. of the IX All-Russian. scientific conf. with international participation, *Russia, online meetings*, 2021, pp. 52–56, available at: https://forestsoil.ru/wp-content/uploads/2021/09/SBORNIK_LESNOYE_POCHVY_I_IZMENENIE_KLIMATA_2021.pdf
- Henry H.A.L., Soil extracellular enzyme dynamics in a changing climate, *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, No. 47, pp. 53–59.
- Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F., *Biologicheskaya diagnostika i indikatsiya pochv: metodologiya i metody issledovaniy* (Biological diagnostics and indication of soils: methodology and research methods), Rostov-on-Don: Izd-vo Rost. un-ta, 2003, 204 p.
- Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F., *Biologiya pochv Yuga Rossii* (Soil biology of the South of Russia), Rostov-on-Don: Izd-vo TsVVR, 2004, 350 p.
- Khaziev F.Kh., *Metody pochvennoi enzimologii* (Soil Enzymology Methods), Moscow: Nauka, 2005, 252 p.
- Konovalova A.Ye., Konovalova M.Ye., Pimenov A.V., Osobennosti rosta po diametru krasno- i zheltopyl'nikovoy form sosny obyknovnoy (Specifics of growth by diameter of red male cones and yellow male cones forms of Scots pine), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2020, No. 3, pp. 63–72.
- Kulik K.N., Opustynivaniye zemel' i zashchitnoye lesorazvedeniye v Rossiiskoi Federatsii (Land desertification and protective afforestation in the Russian Federation), In: *Opustynivaniye zemel' i bor'ba s nim* (Desertification and its control), Abakan, 2007, pp. 25–29.
- Kurbatskii N.P., *Terminologiya lesnoi pirologii. Voprosy lesnoi pirologii* (Terminology of forest pyrology. Questions of forest pyrology.), Krasnoyarsk: ILiD SO AN SSSR, 1972, pp. 171–231.
- Kuz'mina N.A., Kuz'min S.R., Analiz dinamiki rosta klimatipov sosny obyknovnoy v geograficheskikh kul'turakh Sredney Sibiri (Analysis of Scots pine climatypes growth dynamics in the provenance trial in Central Siberia), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 2, pp. 31–39.
- Lobanov A.M., Rol' zashchitnykh lesnykh nasazhdenii Shirinskoy stepi v predotvrashchenii opustynivaniya (The role of protective forest plantations of the Shirinskaya steppe in the prevention of desertification), In: *Opustynivaniye zemel' i bor'ba s nim* (Desertification and its control), Abakan, 2007, pp. 87–94.
- Mishustin E.N., Mikrobnyye assotsiatsii pochvennykh tipov (Microbial associations of soil types), In: *Problemy i metody biologicheskoi diagnostiki i indikatsii pochv* (Problems and methods of biological diagnostics and indication of soils), Moscow: Nauka, 1976, pp.19–42.
- Netrusov A.I., *Praktikum po mikrobiologii* (Workshop on Microbiology), Moscow: Academia, 2005, 603 p.
- Roshchina V.V., Roshchina V.D., *Vydelitel'naya funktsiya vysshikh rastenii* (The excretory function of higher plants.), LAP Lambert Academic Publishing, 2012, 476 p.
- Schlaeppi K., Bulgarelli D., The plant microbiome at work, *Mol. Plant-Microbe Interact.*, 2015, Vol. 28, No. 3, pp. 212–217.
doi 10.1094/MPMI-10-14-0334-FI
- Senashova V.A., Grodnitskaya I.D., Pashkeyeva O.E., Antonov G.I. Formirovaniye pochvennykh mikrobnyykh soobshchestv pod geograficheskimi kul'turami Pinus sp. v aridnykh usloviyakh (Formation of soil microbial communities under geographic cultures of Pinus sp. in arid conditions), *Ekosistemy Tsentral'noy Azii: issledovaniye, sokhraneniye, ratsional'noye ispol'zovaniye* (Ecosystems of Central Asia: research, conservation, rational use), Proc. of XV Ubsunur International Symposium, Kyzyl, July 5–8, 2020, Krasnoyarsk: Izd-vo "Ofset". 2020, pp. 161–165.
- Sharagin A.M., Vliyaniye lesnykh pozharov na ekologicheskuyu situatsiyu (Influence of forest fires on the ecological situation), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2011, No. 7, pp. 236.
- Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Oikomena, 2004, 342 p.

- Sorokin N.D., Molokov V.A., Povyshenie prizhivaemosti kul'tur listvennitsy v stepnykh raionakh Khakasii (Increasing the survival rate of larch crops in the steppe regions of Khakassia), *Les. khoz-vo*, 1985, No. 5, pp. 55–57.
- Sorokin N.D., Senashova V.A., Sorokina O.A., Biogenost' pochv kak pokazatel' ustoichivosti iskusstvennykh lesnykh nasazhdenii v sukhostepnykh usloviyakh Khakasii (Soil biogenecity as an indicator of sustainability of artificial forest plantations under dry-steppe conditions in Khakassia), *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*, 2017, No. 3, pp. 329–336.
DOI 10.7868/S0002332917030092
- Sparling G.T., The substrate-induced respiration method, In: *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*, London: Acad. Press, 1995, pp. 397–404.
- Wallenstein M.D., Haddix M.L., Lee D.D., Conant R.T., Paul E.A., A litter slurry technique elucidates the key role of enzyme production and microbial dynamics in temperature sensitivity of organic matter decomposition, *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, No. 47, pp. 18–26.
- Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Emerging tools for measuring and modeling the in situ activity of soil extracellular enzymes, *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, No. 40, pp. 2098–2106.
- Watanabe T., *Pictorial atlas of soil and seed fungi: morphologies of cultured fungi and key to species*, Boca Raton: CRC Press. Inc., 2002, 506 p.
- Yakushev A.V., Kuznetsova I.N., Blagodatskaya E.V., Blagodatsky S.A., Temperature dependence of the activity of polyphenol peroxidases and polyphenol oxidases in modern and buried soils, *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47, No. 5, pp. 459–465.
DOI 10.1134/S1064229314050263
- Zvyagintsev D.G., Biologicheskaya aktivnost' pochv i shkaly dlya otsenki nekotorykh ee pokazatelei (Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators), *Pochvovedenie*, 1978, No. 6, pp. 48–54.
- Zvyagintsev D.G., *Pochva i mikroorganizmy* (Soils and microorganisms), Moscow: Iz-vo MGU, 1987, 256 p.
- Zvyagintseva D.G., *Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii* (Methods of soil microbiology and biochemistry), Moscow: Izd-vo Mosk. Universitet, 1991, 303 p.

УДК 630*232.4

ПУЛЫ ПИРОГЕННОГО УГЛЕРОДА ЛЕСНЫХ ПОЧВ ВЕРХНЕГО ПРИАМУРЬЯ¹

© 2022 г. С. В. Бряннин^а, *, А. В. Данилов^а, Е. С. Сулопарова^а, А. В. Иванов^а^аИнститут геологии и природопользования ДВО РАН, пер. Рёлочный, д. 1, Благовещенск, 675000 Россия

*E-mail: bruanin@gmail.com

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Актуальность. Леса России удерживают самый значительный пул углерода С среди экосистем суши и подвержены периодическим пожарам. Продукты горения сохраняются в почвах тысячелетиями и на сегодняшний день считаются наиболее долговременным пулом С. Однако размер этого пула в почвах до сих пор остается пробелом в знаниях о структуре запасов С в лесах России. **Цель.** Определить содержание и структуру запасов общих и высокостабильных форм пирогенного С (РуС), оценить долю выделяемых форм РуС в составе С почв и изучить взаимосвязь РуС с характеристиками насаждения и свойствами почв периодически прогорающих лиственничных лесов Верхнего Приамурья. **Объекты и методы.** В работе представлены данные первой полевой оценки пула общих и устойчивых форм пирогенного С в почвах регулярно прогорающих лиственничников Верхнего Приамурья по трансекте 500 км с севера на юг. Изучали общие и устойчивые формы пирогенного углерода, определяли запасы и мощность подстилок, плотность почв, влажность, рН, Сорг, N. **Результаты.** В верхнем слое почвы общая концентрация РуС изменяется в пределах от 1 до 2.2%, а запасы достигают 3.3 т га⁻¹. Доля общего РуС в пуле органического С почвы достигает 21%, а доля высокоустойчивых форм РуС не превышает 4%. Анализ главных компонент выявил, что концентрация и запасы общего РуС в почвах не зависят от почвенных свойств, однако имеют тенденцию к увеличению на север. При этом содержание и запасы высокостабильных форм РуС, являющиеся признаками пожаров высокой интенсивности, положительно и достоверно коррелируют с долей лиственницы в составе древостоя. **Выводы.** Наши результаты свидетельствуют о преобладании низовых пожаров низкой интенсивности, при которых не образуется большого количества высокостабильных форм РуС. Сила пожара, вероятно, положительно коррелирует с возобновлением лиственницы.

Ключевые слова: пожары, пирогенный углерод, лесные почвы, лиственничники, Дальний Восток.

DOI: 10.31857/S0024114822030044

В свете современного изменения климата и учащения природных пожаров остро стоит вопрос долговременной консервации углерода (С). Наиболее значимый вклад в стабилизацию С вносят экосистемы северного полушария (Dixon et al., 1994; Gauthier et al., 2015). Среди них леса boreального пояса России все еще удерживают самый значительный пул С по большей части в почвах. Недавние оценки показывают, что потенциал секвестрации С лесами России почти на 50% выше, чем считалось ранее (Schepaschenko et al., 2021).

Лиственничники — это самая представительная формация в лесном фонде России, они занимают около 40% лесопокрытой территории (Уткин и др., 2003). Эти леса регулярно подвергаются

горению, а в последние десятилетия наблюдается тренд возрастания площади пожаров (Лупян и др., 2017). Лесные пожары в северных лесах исторически являлись драйверами их развития, а цикл лесов в лиственничных экосистемах и вовсе невозможен без пожаров (Цветков, 2004). Однако за последние два столетия пожары из фактора динамики превратились в фактор деградации этих лесов (Sato et al., 2016). Очевидно, что при высокой пирогенной нагрузке в этих лесах сформировался существенный пул высокоуглеродистых продуктов горения, которые на сегодняшний день считаются наиболее устойчивым пулом С.

Постпирогенный углерод (РуС) представляет собой совокупность веществ от частично обугленных растительных остатков до угля, сажи и отдельных полициклических соединений (Bird et al., 2015; Preston and Schmidt, 2006). В процессе горе-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект 19-05-00305.

ния около 5% пиролизуемой биомассы преобразуется в PyC (DeLuca et al., 2020), а доля PyC в общих запасах почвенного органического вещества (Сорг) оценивается на уровне 2–5% в глобальном масштабе (Bird et al., 2015). Однако в почвах бореальной зоны, испытывающих высокие пирогенные нагрузки, его доля может быть значительно выше. Так доля PyC в органогенных горизонтах лесных почв Европы достигает 45% от пула Сорг (Schmidt et al., 1999). В почвах сосновых лесов Сибири это количество оценивается на уровне 4% от пула Сорг (Czimeczik et al., 2005), а в торфяниках Северных Увалов от 0.7 до 14% в верхнем слое (Дымов и др., 2021). Продукты горения в виде угля и сажи сохраняются в почвах от сотен до тысяч лет, и современные исследования подтверждают, что периодические низовые пожары способствуют поддержанию и увеличению такого пула в северных лесах (Думов et al., 2021). Объемы и структура пула PyC пока остаются неясными не только из-за недостаточности натуральных оценок, но и по методическим причинам.

В настоящее время отсутствует возможность прямого сопоставления PyC из результатов разных исследований ввиду того, что применяются различные аналитические методы, которые определяют отдельные фракции PyC. Это приводит к несовпадению результатов вплоть до нескольких порядков величин (Hammes et al., 2007; Schmidt et al., 2001). Наиболее признанным и распространенным на сегодня маркером PyC является метод выделения бензолполикарбоновых кислот (БПКК), определяющий ароматические формы С посредством кислотного гидролиза (Brodowski et al., 2005). Метод твердотельной спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) покрывает весь спектр определяемых форм PyC (Masiello, 2004), однако является полуквантитативным, с его помощью изучается структура органического вещества пирогенного происхождения. Микроскопический визуальный метод отбора угля из почвы является самым точным, однако имеет ограничения ввиду определения только угольной фракции $PyC \geq 0.2$ мм (Ohlson et al., 2009). Кроме того, разработан ряд альтернативных методов определения PyC, среди которых термическое окисление и кислотная обработка наиболее распространены.

В нашем исследовании пул общего и высокостабильного PyC анализируется с использованием двух методов. Метод “СТО375” основан на термическом окислении пробы (Gustafsson et al., 1997). Изначально разработанный для изучения PyC в осадочных и техногенных отложениях, метод был с успехом протестирован на природных объектах (Gustafsson et al., 2001), в том числе и почвах, и применяется в современных исследованиях для оценки PyC и в лиственных лесах Азии (Huang et al., 2018; Makoto et al., 2011). Многократные испытания данного метода выявили,

что при обработке при 375°C вместе с органическим веществом почвы полностью окисляется и большинство низкотемпературных форм PyC (Nguyen et al., 2004). Поэтому данный метод характеризует в основном высокостабильные формы PyC (PyCст), образованные при температурах выше 800°C, характерные для очень мощных верховых пожаров. Метод “КМД”, предложенный в 2006 году V.J. Kurth с соавторами, заключается в удалении органического вещества сильным раствором H_2O_2 и слабой азотной кислотой (Kurth et al., 2006). Такой метод наиболее широко используется среди альтернативных (Abney et al., 2019; Maestrini and Miesel, 2017; Santos et al., 2017) и благодаря щадящей обработке пробы позволяет сохранить большинство форм PyC, включая низкотемпературные, характерные для низовых пожаров. Таким образом, метод оценивает общее количество PyC (PyCобщ).

Температуры горения и пиролиза биомассы во время лесных пожаров значительно различаются в зависимости от количества топлива, скорости ветра, температуры воздуха, влажности воздуха и топографии лесов. Несмотря на то, что PyC считается долговременным пулом С в почвах и сохраняется в них до тысячелетий (Preston et al., 2006), современные исследования доказывают, что пирогенные материалы, образованные при низких температурах в пожарах слабой интенсивности, быстрее подвергаются разрушению в почвенной среде чем PyCст (Abney et al., 2019; Bird et al., 2017).

Взаимосвязь PyC с почвенной средой подробно изучена во многих лабораторных исследованиях, а наибольшее внимание ему, как эффективному мелиоранту, уделяется в агроэкосистемах, особенно в малопродуктивных почвах. (Lehmann et al., 2011; Liang et al., 2006). Известно, что PyC разуплотняет почву, а пористая структура постпирогенного угля, на которой происходит адсорбция веществ, повышает емкость катионного обмена и микробиологическую активность (Lehmann et al., 2011; Li et al., 2018). Недавний обзор Makoto and Koike (2021) об экологической роли PyC в бореальных лесах обратил внимание на то, что PyC, будучи инертным материалом и долговременным стоком С, может ускорять современные потоки С в системе подстилка-почва-атмосфера. Современные зарубежные исследования перешли к рассмотрению вопросов миграции (Santín et al., 2015; Santos et al., 2017) и возможного разложения PyC (Guggenberger et al., 2008; Kasin and Ohlson, 2013; Kuzyakov et al., 2009), при этом в почвах российский лесов его содержание по сей день остается весьма неопределенным.

Цель исследований — определить содержание и структуру запасов общих и высокостабильных форм PyC, оценить долю выделяемых форм PyC в составе Сорг почв и изучить взаимосвязь PyC с характеристиками насаждения и свойствами почв

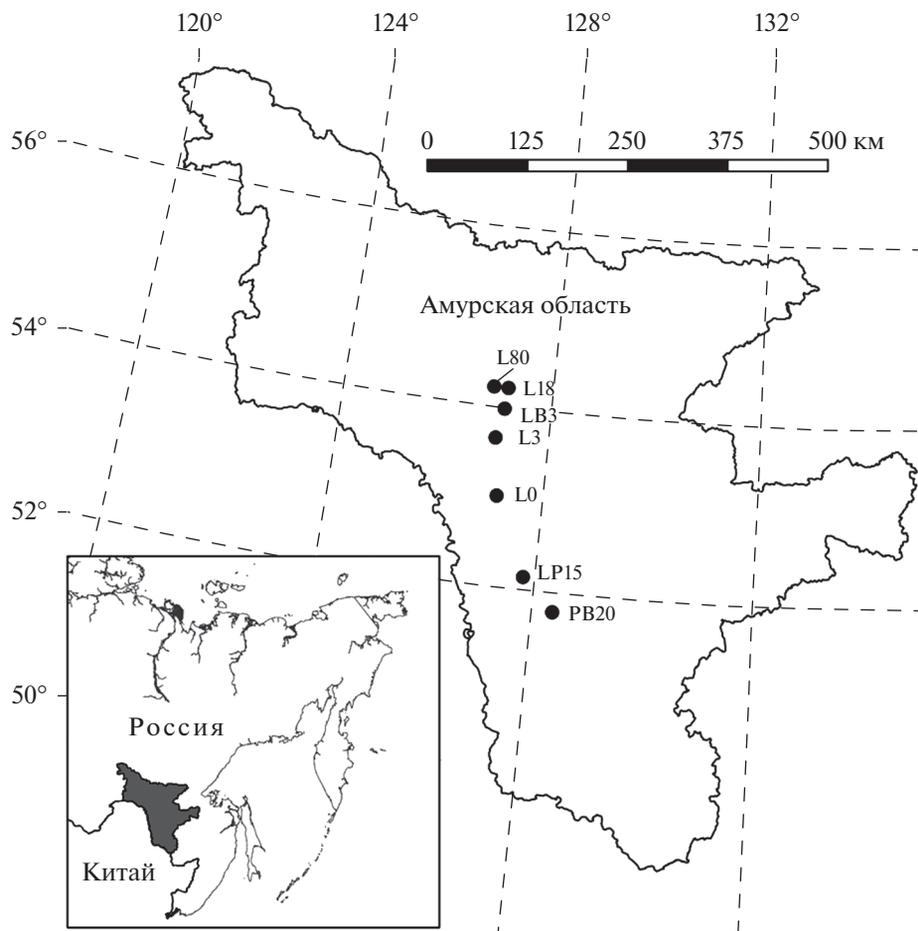


Рис. 1. Карта-схема района исследований.

периодически прогорающих лиственных лесов Верхнего Приамурья.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследование проведено в зоне светлохвойной тайги Верхнего Приамурья на южной границе распространения многолетней мерзлоты. Климат территории умеренно холодный, континентальный, с муссонным характером распределения осадков. Средняя многолетняя температура воздуха января минус 28.8°C, июля +19.7°C, среднегодовая – 0.7°C. Абсолютный минимум составляет –52.0°C, максимум +36.9°C. Среднее количество осадков 527 мм, большая их часть выпадает в летний период. Преобладают ветра северо-восточного направления со средней скоростью от 1.2 до 2.2 м с⁻¹.

Объект исследования – лесные насаждения с доминированием лиственницы даурской (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), находящиеся на разных стадиях послепожарной лесовосстановительной смены.

Полевые исследования выполнялись на пробных площадях (ПП) размером 50 × 50 м, которые были заложены по меридиональной трансекте протяженностью около 500 км в западной части Амурской области. Перепад абсолютных высот между крайними ПП трансекты составляет 356 м (рис. 1). Пробные площади были заложены в наиболее распространенных брусничных и багульниковых типах леса, в типичных для региона лесорастительных условиях с отсутствием каких-либо нарушений, кроме пожаров. На каждой ПП выполнено таксационное описание древостоя (учитывались все деревья с диаметром $D_{1.3} \geq 6$ см) (табл. 1). Запас насаждения с учетом разряда высот определялся по региональным объемным таблицам. Возраст пожара определялся по возрасту подроста, до возраста 3–5 лет, и по космическим снимкам Landsat или официальным данным лесопользователей. Название ПП давали исходя из преобладающей на момент исследований древесной породы и возраста пожара. (табл. 1). В состав насаждений, кроме лиственницы, входили береза плосколистная (*Betula platyphylla* Suk.) и осина (*Populus tremula* L.), на долю которых приходится

Таблица 1. Таксационная характеристика древостоев лесных насаждений на пробных площадях

ПП	Географические координаты, WGS	$H_{\text{нум}}$, м	$A_{\text{п}}$, лет	Состав	$D_{\text{ср}}$, см	M , $\text{м}^3 \text{га}^{-1}$	G , $\text{м}^2 \text{га}^{-1}$	N , шт. га^{-1}
L80	N 54°00'48.7" E 127°02'20.9"	551	80	8Л1Б+Е	35.3	181	15.7	204
L18	N 54°00'30.4" E 127°02'50.1"	554	18	7Л3Б+Ос	18.7	239	24.0	948
LB3	N 53°49'36.7" E 127°08'07.1"	565	3	4Л5Б1Ос	19.3	367	39.1	700
L3	N 53°39'27.8" E 127°01'33.6"	308	3	9Л1Б	24.3	40	3.9	76
L0	N 52°51'15.9" E 126°33'36.8"	334	0	9Л1Б	15.2	105	11.4	568
LP15	N 51°59'35.5" E 127°40'08.0"	268	15	5Л5С	26.2	116	12.3	156
PB20	N 51°38'50.8" E 128°10'38.7"	195	20	6С4Б+Л, Ос	16.4	174	24.0	1168

Примечание. $H_{\text{нум}}$ – абсолютная высота местности над уровнем моря, $A_{\text{п}}$ – возраст пожара, $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр главной породы, M – запас, G – абсолютная полнота, N – густота древостоя; Л – лиственница даурская, С – сосна обыкновенная, Б – береза плосколистная, Ос – осина. В аббревиатуре ПП: Л – лиственница, В – береза, Р – сосна, число обозначает возраст пожара.

10–60% запаса насаждения (табл. 1) Наличие этих видов так же указывает на нарушение насаждений лесными пожарами. Запас древостоев изменяется в диапазоне 40–239 $\text{м}^3 \text{га}^{-1}$ со средним значением 174.5 $\text{м}^3 \text{га}^{-1}$.

Сбор лесной подстилки осуществляли однократно в июле–августе с помощью рамки размером 20 × 20 см в пятикратной повторности на каждой ПП. Рамки для сбора подстилки располагали в наиболее типичных местах, исключались места, где сложение подстилки было нарушено (деятельность животных, прогалины, ямы и др). Отбор производили до границы верхнего органоминерального горизонта почвы (А), исключая крупные корни и древесные остатки. После отбора определяли мощность слоя подстилки путем измерения высоты всех стенок. Образец помещали в герметичный пакет. После сбора подстилки в тех же точках отбирали образцы почв с поверхности горизонта А(Ао). Образцы почв отбирали с помощью металлического цилиндра-пробоотборника диаметром 5 см, на глубину 5 см, объемом 99.8 см^3 . Образец помещали в герметичный пакет и замораживали для предотвращения испарения влаги и остановки деятельности микроорганизмов. После доставки в лабораторию образцы почв и подстилок высушивали до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 60°C. Запас подстилки рассчитывали в тоннах абсолютно сухого вещества на 1 га лесной площади. Запас Сорг в почвах рассчитывали, исходя из плотности сложения, мощности слоя и содержания С, результаты выражали в тоннах абсолютно сухой почвы на гектар лесной площади. Высушенные образцы почв истирали и просеивали через сито диаметром ячейки 0.25 мм для дальнейших аналитических исследований.

Аналитические исследования. Лабораторные исследования выполнены в аналитическом центре минералого-геохимических исследований Ин-

ститута геологии и природопользования ДВО РАН. Общие концентрации N и Сорг в почве анализировали методом термokatалитического окисления при температуре 680°C на анализаторе ТОС-L с модулем для ввода твердых проб SSM-5000A (Shimadzu, Япония). Актуальную кислотность почв определяли ионометрическим методом в соотношении вода : почва 1 : 5 на приборе Hanna 2215 (HANNA Instruments, Германия).

Содержание высокостабильных форм пирогенного С (**PyCст**) определяли методом “СТО375” (Gustafsson et al., 1997; Hammes et al., 2007). Принцип метода основан на длительной термической обработке почв при 375°C, с последующим определением остатков С. Навески около 0.5 г помещали ровным слоем в фарфоровые тигли и прокаливали в муфельной печи при температуре 375°C в течение 24 ч. Содержание PyCст термokatалитическим окислением аналогично Сорг.

Содержание общего пирогенного С (**PyCобщ**) выполняли методом “KMD” (Kurth et al., 2006). Принцип метода заключается в окислении органического вещества почв сильным раствором H_2O_2 в смеси с азотной кислотной и последующим определением оставшейся пирогенной части С. Навеску почвы 0.5 г помещали в коническую колбу объемом 250 мл, приливали 20 мл 30% H_2O_2 , оставляли на сутки до начала фактического разложения. Затем добавили 20 мл 30% H_2O_2 и 10 мл 1.0 М HNO_3 . Горловину колб накрыли воронкой. Колбы периодически взбалтывали при комнатной температуре в течение 30 мин, затем нагревали до 100°C на песчаной бане в течение 16 ч. Образцы периодически перемешивали и возвращали в песчаную баню до завершения разложения. Полноту разложения определяли по осветлению осадка и отсутствию вскипания. Осадок отделяли на фильтрах “красная лента”, высушивали, гомогенизировали с помощью ступки и пестика. Содержание PyCобщ в осадке определяли термokatалитиче-

ским окислением аналогично Сорг. Для почв с исходным высоким содержанием Сорг ($\geq 15\%$) применяли модифицированный метод с разбавлением пробы с прокаленным кварцевым песком в соотношении 1 : 1 (Maestrini and Miesel, 2017), дальнейший ход анализа не изменялся.

Статистическая обработка. На первом этапе данные проверялись на нормальность и однородность дисперсий. Наличие и достоверность различий параметров древостоя, характеристик подстилки, почвенных свойств и содержания Р_{уС} между ПП оценивались с помощью дисперсионного анализа и апостериорного теста Тьюки (Tukey HSD). В случае отсутствия нормального распределения данных использовался непараметрический критерий Краскела–Уоллиса. Основные закономерности в массиве данных определялись методом главных компонент. Все вычисления и визуализация результатов выполнены в статистической среде R (R Development Core Team, 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика почв постпирогенных лесов. Мощность и запасы лесной подстилки на исследуемых площадках варьируют в широком диапазоне (табл. 2), а средние значения равны 3.5 ± 0.15 см и 11.8 ± 0.7 т га⁻¹ соответственно. При этом зависимости от возраста пожара не наблюдается ни по одному из этих показателей (рис. 3). Исследование В.В. Старцева с соавт. (2017) в листовничниках криолитозоны установили мощность слоя подстилки в постпирогенных насаждениях в пределах 5–8 см, а в ненарушенном лесу – 17 см. Усредненные запасы С в подстилках по всем ПП с использованием общепринятого коэффициента МГ-ЭИК 0.37 составили 4.4 т С га⁻¹, что близко к оценке для южной части Дальнего Востока – 4.5 т С га⁻¹ (Иванов и др., 2018), однако ниже показателя 6 т С га⁻¹ для Амурской области согласно крупномасштабным оценкам О.В. Честных с соавт. (2007).

Влажность почв варьирует незначительно и не проявляет четких закономерностей в зависимости от возраста пожара. При этом многие исследователи отмечают уменьшение влажности из-за гидрофобности поверхностного горизонта после пирогенного воздействия и повышения альбедо прогоревшей поверхности (Certini, 2005; Старцев и др., 2017). Плотность сложения поверхностных горизонтов почв возрастает с севера на юг. Северные почвы содержат большое количество слабо-разложившихся растительных остатков и корней, которые разуплотняют поверхностные горизонты почв. К югу биологическая активность вместе с продолжительностью теплого периода возрастает, и скорость разложения органического вещества так же повышается, что приводит к более плотному сложению почв. Почвы исследуемой

территории в ненарушенном состоянии характеризуются кислой средой в северных лесах и слабокислой к югу (Proscorchuk and Bryanin, 2007). Актуальная кислотность почв в нашем исследовании имеет общий тренд возрастания с севера на юг трансекты, а максимальный сдвиг в щелочную сторону наблюдается на ПП L0 и LP15 с наименьшим возрастом пожара. Смещение реакции среды в сторону нейтрализации кислых растворов – одно из наиболее выраженных изменений в почвенных свойствах после пожара. Оно обусловлено поступлением катионов щелочных и щелочно-земельных элементов преимущественно с золой и наблюдается на протяжении десятилетий, в зависимости от факторов среды и типа насаждения (Makoto et al., 2011; Красношеков, 2014; Цибарт, Геннадиев, 2008). Содержание N не имеет четкой тенденции ни по возрасту пожара, ни по трансекте, обогащенность органического вещества почв азотом (C/N) возрастает к югу трансекты.

Концентрации и пулы углерода. Содержание Сорг изменяется в пределах от 7.7 до 19.6% с общим трендом на понижение к югу (табл. 2). Запасы Сорг в поверхностном слое почв варьируют от 16 до 27 т/га (рис. 2а). На Р_{уС}общ приходится до 21% запасов Сорг в исследуемом слое (рис. 2б). Доля Р_{уС}ст не превышала 4%, при этом взаимосвязь между двумя изучаемыми формами пирогенного С не была установлена ($R = 0.1, p = 1$). Однако наблюдалась слабая достоверная корреляция с концентрацией Сорг как для Р_{уС}общ ($R = 0.3, p = 0.01$), так и для Р_{уС}ст ($R = 0.4, p < 0.001$). Это означает, что увеличение количества общего Р_{уС} происходит не за счет накопления его устойчивых форм. При этом взаимосвязь обеих форм Р_{уС} с Сорг обусловлена тем, что эти формы входят в Сорг при термokatалитическом окислении. Установленные нами величины концентраций Р_{уС}ст в целом согласуются с аналогичными данными по органогенному горизонту почв сосновых лесов Сибири, где Р_{уС} определялся методом выделения бензолполикарбонновых кислот и его доля составила $\leq 3.5\%$ от Сорг (Czimeczik et al., 2005). Недавнее исследование торфяно-олиготрофной почвы под сосновыми лесами Северных Увалов также установило долю Р_{уС} по БПКК в поверхностном горизонте на уровне 0.6% от Сорг почвы. При этом авторы также установили возрастание доли Р_{уС} в составе Сорг почвы с глубиной (Дымов и др., 2021).

Взаимосвязь характеристик почв и почвенных параметров с содержанием и запасами Р_{уС}. Множественные регрессионные модели для Р_{уС}, включавшие в себя как характеристики древостоя, так и свойства почв выявили несколько значимых предикторов, однако описываемая ими доля дисперсии Р_{уС}общ и Р_{уС}ст слишком мала, чтобы принимать эти модели как достоверные. При этом анализ главных компонент позволил

Таблица 2. Основные характеристики почв исследуемых лесов

	Лесная подстилка		Почва, слой 0–5 см											
	запас, т/га	мощность, см	влажность почв, %	pH водн.	плотность, г/см ³	Сорг, %	N, %	C/N	Р _{уСобш} , %	Р _{уСст} , %				
III														
L80	11 ± 1.0a	6 ± 0.3a	38.9 ± 1.0a	5.31 ± 0.14a	0.30 ± 0.02a	17.7 ± 1.7a	0.57 ± 0.06ab	31	2.24 ± 0.24a	0.16 ± 0.03a				
L18	5.5 ± 0.4b	4 ± 0.4b	41.5 ± 2.4a	5.85 ± 0.15a	0.32 ± 0.04a	13.3 ± 1.8ab	0.72 ± 0.12ab	17	1.47 ± 0.35abc	0.52 ± 0.15b				
LB3	24.1 ± 2.0c	6 ± 0.2c	52.8 ± 2.3b	5.50 ± 0.11a	0.29 ± 0.03a	19.6 ± 2.2a	0.85 ± 0.08a	23	2.00 ± 0.30abc	0.26 ± 0.04ab				
L3	5.5 ± 1.1ab	2 ± 0.3d	54.2 ± 2.6b	6.09 ± 0.10c	0.34 ± 0.03ab	14.9 ± 2.2ab	0.77 ± 0.08ab	19	1.68 ± 0.24abc	0.28 ± 0.05ab				
L0	3.9 ± 0.5b	1 ± 0.1d	42.2 ± 2.7a	6.49 ± 0.18bc	0.43 ± 0.04ab	10.7 ± 1.4ab	0.56 ± 0.06ab	19	2.16 ± 0.32abc	0.25 ± 0.02ab				
LP15	10 ± 1.5ab	2 ± 0.2c	38.9 ± 4.4ab	6.56 ± 0.08b	0.54 ± 0.08ab	7.7 ± 1.3b	0.38 ± 0.06b	20	0.99 ± 0.20bc	0.20 ± 0.04ab				
PB20	18.6 ± 4.0ab	3 ± 0.4b	46.5 ± 2.2ab	5.78 ± 0.15a	0.50 ± 0.04b	11.4 ± 1.2ab	0.76 ± 0.08a	15	1.05 ± 0.14bc	0.16 ± 0.02a				

Примечание. Данные в таблице – средние ± 1 стандартная ошибка, n = 10 для всех показателей. Латинские буквы указывают на значимые различия на основе дисперсионного анализа или непараметрического критерия Краскела–Уоллиса.

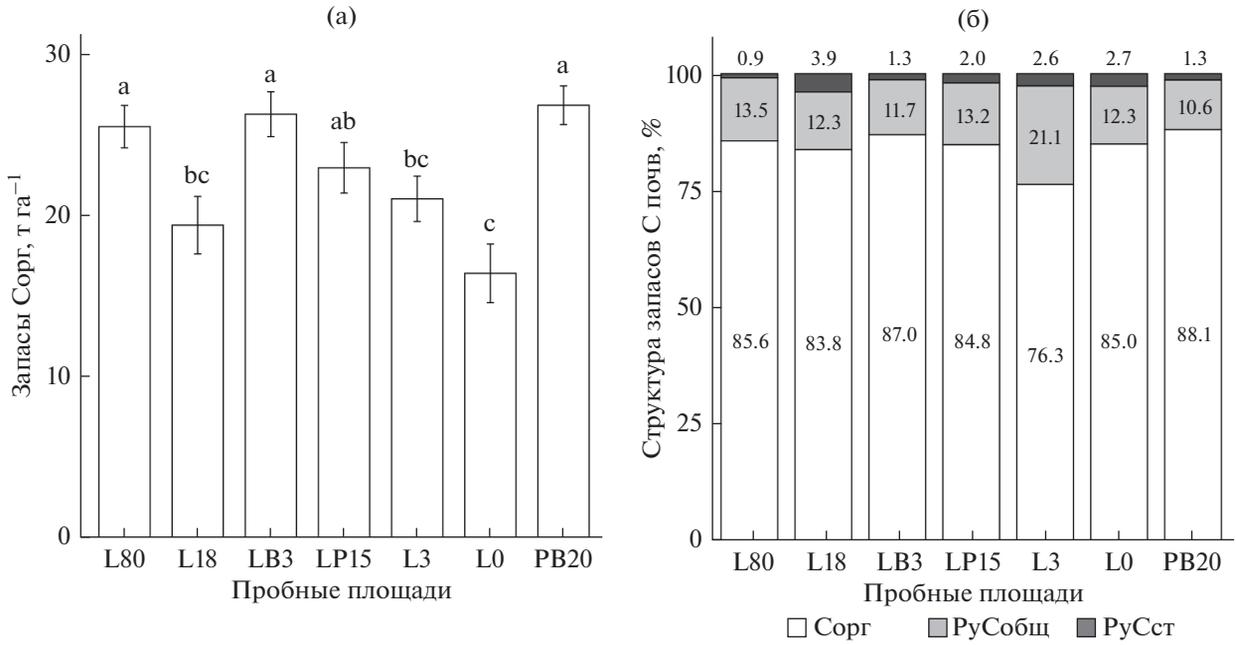


Рис. 2. Запасы органического С в слое почв 0–5 см (а) и доля пирогенного С в этих запасах (б). Латинские буквы указывают на значимые различия на основе непараметрического критерия Краскела–Уоллиса.

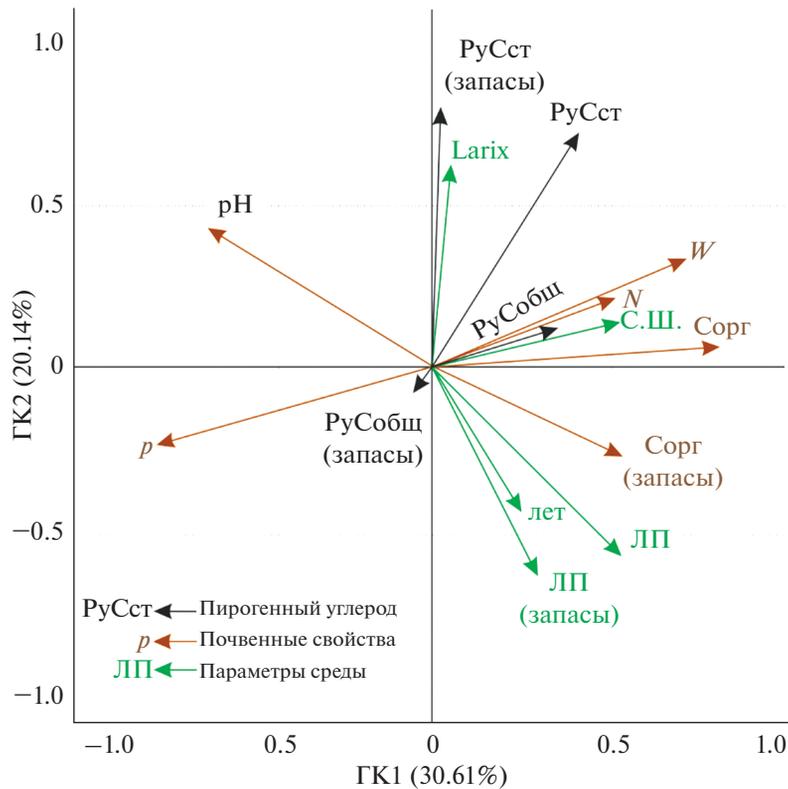


Рис. 3. Биplot на основе анализа главных компонент. PyCобщ, PyCст – содержание, %; PyCобщ (запасы), PyCст (запасы) – запасы т га⁻¹; W – влажность почв, ρ – плотность сложения почв, Larix – доля лиственницы в составе древостоя, С.Ш. – градус северной широты на ПП, ЛП – слой лесной подстилки, лет – возраст пожара.

описать более 50% дисперсии всего массива данных и выделить основные закономерности по направлению трансекты (рис. 3). Так, содержание Сорг и N возрастает на север вместе с увеличением почвенной влажности. С увеличением возраста пожара происходит увеличение мощности и запасов подстилки, а также запасов Сорг, вместе с тем происходит увеличение актуальной кислотности почв. Плотность сложения почв возрастает с севера на юг на фоне уменьшения влажности и отрицательной взаимосвязи с содержанием Сорг, N, РуСобщ и РуСст. Отрицательная взаимосвязь плотности сложения с содержанием РуС подтверждается рядом экспериментальных работ, обнаруживших, что внесение постпирогенного угля приводит к разуплотнению почв (Li et al., 2018). Кроме того, это свидетельствует о разнонаправленных трендах концентраций РуС в почве и показателя плотности по изучаемой трансекте. Содержание и запасы РуСст положительно коррелировали с долей участия лиственницы в составе древостоя ($R = 0.4$, $p < 0.01$) и не были связаны с почвенными свойствами. Наличие взаимосвязи РуСст с долей участия лиственницы в составе древостоя свидетельствует как о возобновлении преимущественно лиственницы, так и об устойчивости лиственничников к сильным пожарам. Это в целом является доказательством пиропитности этого вида, описанной в работе П.А. Цветкова (2004). Слабая взаимосвязь РуСобщ с кислотностью почв подтверждает данные о сдвиге почвенной кислотности на горяч за счет золы, а не пирогенного угля (Gonzalez—Perez et al., 2004; Neary et al., 1999).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши исследования показывают, что в условиях Верхнего Приамурья на долю РуС может приходиться более 20% общего пула С органогенных и верхних минеральных горизонтов лесных почв. При этом доля высокостабильных форм РуС, образующихся при высоких температурах, не превышает 4%. Это может свидетельствовать о большем влиянии низкотемпературных низовых пожаров на формирование современного пула РуС в поверхностных горизонтах изученных почв. Выполненное исследование дает основание для более точного расчета запасов С в почвенном резервуаре лесных экосистем при региональных и глобальных оценках. Учитывая установленный значительный вклад РуС в общий пул С почв, а также способность РуС мигрировать вниз по почвенному профилю в будущих исследованиях, необходимо расширить работы в географическом масштабе с включением в оценку минеральных горизонтов лесных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дымов А.А., Старцев В.В., Горбач Н.М., Паюсова И.В., Табов Д.Н., Доннерхак О. Сравнение методов определения соединений углерода пирогенно измененных органических соединений // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1332–1345.
<https://doi.org/10.31857/s0032180x2111006x>
- Иванов А.В., Браун М., Замолодчиков Д.Г., Львов Д.В., Панфилова Е.В. Лесные подстилки как звено цикла углерода хвойно-широколиственных насаждений Южного Приморья // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1226–1233.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18100052>
- Краснощечков Ю.Н. Влияние пирогенного фактора на серогумусовые почвы сосновых лесов в центральной экологической зоне байкальской природной территории // Сибирский лесной журн. 2014. № 2. С. 43–52.
- Луян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценок Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активно-горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175>
- Старцев В.В., Дымов А.А., Прокушкин А.С. Почвы постпирогенных лиственничников Средней Сибири: морфология, физико-химические свойства и особенности почвенного органического вещества // Почвоведение. 2017. № 8. С. 912–925.
- Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В. Органический углерод лиственничных лесов России // Хвойные бореальной зоны. 2003. Т. 21. № 1. С. 66–76.
- Цветков П.А. Пиропитность лиственницы Гмелина с позиций жизненных стратегий // Экология. 2004. № 4. С. 259–265.
- Цибарт А.С., Геннадиев А.Н. Влияние пожаров на свойства лесных почв Приамурья (Норский заповедник) // Почвоведение. 2008. № 7. С. 783–792.
- Честных О.В., Лыжин В.А., Кокшарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114–121.
- Abney R.B., Jin L., Berhe A.A. Soil properties and combustion temperature: Controls on the decomposition rate of pyrogenic organic matter // Catena. 2019. № 182. P. 104127.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104127>
- Bird M.I., McBeath A. V., Ascough P.L., Levchenko V.A., Wurster C.M., Munksgaard N.C., Smernik R.J., Williams A. Loss and gain of carbon during char degradation. Soil Biology and Biochemistry. 2017. № 106. P. 80–89.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.12.012>
- Bird M.I., Wynn J.G., Saiz G., Wurster C.M., McBeath A. The Pyrogenic Carbon Cycle // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2015. V. 43. P. 273–298.
<https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105038>
- Brodowski S., Rodionov A., Haumaier L., Glaser B., Amelung W. Revised black carbon assessment using benzene polycarboxylic acids // Organic Geochemistry. 2005. V. 36. № 9. P. 1299–1310.
<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2005.03.011>

- Certini G.* Effects of fire on properties of forest soils: A review // *Oecologia*. 2005. № 143. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Czimeczik C.I., Schmidt M.W.I., Schulze E.D.* Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests // *European J. Soil Science*. 2005. V. 56. № 3. P. 417–428.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00665.x>
- DeLuca T.H., Gundale M.J., Brimmer R.J., Gao S.* Pyrogenic Carbon Generation From Fire and Forest Restoration Treatments // *Frontiers in Forests and Global Change*. 2020. № 3. P. 1–8.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00024>
- Dixon R.K., Solomon A.M., Brown S., Houghton R.A., Trexler M.C., Wisniewski J.* Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems // *Science*. 1994. V. 263. № 5144. P. 185–190.
<https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>
- Dymov A.A., Startsev V.V., Milanovsky E.Y., Valdes-Korovkin I.A., Farkhodov Y.R., Yudina A.V., Donnerhack O., Guggenberger G.* Soils and soil organic matter transformations during the two years after a low-intensity surface fire (Subpolar Ural, Russia) // *Geoderma*. 2021. V. 404. № 115278. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115278>
- Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G.* Boreal forest health and global change // *Science*. 2015. V. 349. № 6250. P. 819–822.
<https://doi.org/10.1126/science.aaa9092>
- Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vila F.J., Almendros G., Knicker H.* The effect of fire on soil organic matter – a review // *Environment International*. 2004. № 30. P. 855–870.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>
- Guggenberger G., Rodionov A., Shibistova O., Grabe M., Kasansky O.A., Fuchs H., Mikheyeva N., Zrazhevskaya G., Flessa H.* Storage and mobility of black carbon in permafrost soils of the forest tundra ecotone in Northern Siberia // *Global Change Biology*. 2008. V. 14. P. 1367–1381.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01568.x>
- Gustafsson Ö., Bucheli T.D., Kukulska Z., Andersson M., Largeau C., Rouzaud J.-N., Reddy C.M., Eglinton T.I.* Evaluation of a protocol for the quantification of black carbon in sediments // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. № 15. P. 881–890.
<https://doi.org/10.1029/2000GB001380>
- Gustafsson Ö., Haghseta F., Chan C., MacFarlane J., Gschwend P.M.* Quantification of the Dilute Sedimentary Soot Phase: Implications for PAH Speciation and Bioavailability // *Environmental Science & Technology*. 1997. V. 31. P. 203–209.
<https://doi.org/10.1021/es960317s>
- Hammes K., Schmidt M.W.I., Smernik R.J., Currie L. a., Ball W.P., Nguyen T.H., Louchouart P., Houel S., Gustafsson Ö., Elmquist M., Cornelissen G., Skjemstad J.O., Masiello C.A., Song J., Peng P., Mitra S., Dunn J.C., Hatcher P.G., Hockaday W.C., Smith D.M., Hartkopf-Fröder C., Böhmer A., Lüer B., Huebert B.J., Amelung W., Brodowski S., Huang L., Zhang W., Gschwend P.M., Flores-Cervantes D.X., Largeau C., Rouzaud J.-N., Rumpel C., Guggenberger G., Kaiser K., Rodionov A., Gonzalez-Vila F.J., Gonzalez-Perez J.A., de la Rosa J.M., Manning D.A.C., López-Capél E., Ding L.* Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere // *Global Biogeochemical Cycles*. V. 21. № 3. GB3016.
<https://doi.org/10.1029/2006GB002914>
- Huang W., Hu Y., Chang Y., Liu M., Li Y., Ren B., Shi S.* Effects of Fire Severity and Topography on Soil Black Carbon Accumulation in Boreal Forest of Northeast China // *Forests*. V. 9. P. 408.
<https://doi.org/10.3390/f9070408>
- Kasin I., Ohlson M.* An experimental study of charcoal degradation in a boreal forest // *Soil Biology and Biochemistry*. V. 65. P. 39–49.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.05.005>
- Kurth V.J., MacKenzie M.D., DeLuca T.H.* Estimating charcoal content in forest mineral soils // *Geoderma*. 2006. V. 137. P. 135–139.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.003>
- Kuzyakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X.* Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling // *Soil Biology and Biochemistry*. V. 41. P. 210–219.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.10.016>
- Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D.* Biochar effects on soil biota - A review // *Soil Biology and Biochemistry*. V. 43. P. 1812–1836.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Li Y., Hu S., Chen J., Müller K., Fu W., Lin Z., Wang H.* Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review // *J. Soils and Sediments*. 2018. V. 18. № 2. P. 546–563.
<https://doi.org/10.1007/s11368-017-1906-y>
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad J.O., Thies J., Luizão F.J., Petersen J., Neves E.G.* Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils // *Soil Science Society of America J.* 2006. V. 70. P. 1719–1730.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>
- Maestrini B., Miesel J.R.* Modification of the weak nitric acid digestion method for the quantification of black carbon in organic matrices // *Organic Geochemistry*. 2017. V. 103. P. 136–139.
<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2016.10.010>
- Makoto K., Hirobe M., DeLuca T.H., Bryanin S. V., Procopchuk V.F., Koike T.* Effects of fire-derived charcoal on soil properties and seedling regeneration in a recently burned *Larix gmelinii*/*Pinus sylvestris* forest // *J. Soils and Sediments*. 2011. V. 11. № 8. P. 1317–1322.
<https://doi.org/10.1007/s11368-011-0424-6>
- Makoto K., Koike T.* Charcoal ecology: Its function as a hub for plant succession and soil nutrient cycling in boreal forests // *Ecological Research*. 2011. V. 36. P. 4–12.
<https://doi.org/10.1111/1440-1703.12179>
- Masiello C.A.* New directions in black carbon organic geochemistry // *Marine Chemistry*. 2004. V. 92. P. 201–213.
<https://doi.org/10.1016/j.marchem.2004.06.043>
- Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F., Ffolliott P.F.* Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis // *Forest Ecology and Management*. 1999. V. 122. P. 51–71.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00032-8)
- Nguyen T.H., Brown R.A., Ball W.P.* An evaluation of thermal resistance as a measure of black carbon content in diesel

- soot, wood char, and sediment // *Organic Geochemistry*. V. 35. № 3. P. 217–234.
<https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2003.09.005>
- Ohlson M., Dahlberg B., Økland T., Brown K.J., Halvorsen R.* The charcoal carbon pool in boreal forest soils // *Nature Geoscience*. 2009. V. 2. № 10. P. 692–695.
<https://doi.org/10.1038/ngeo617>
- Preston C.M., Bhatti J.S., Flanagan L.B., Norris C.* Stocks, Chemistry, and Sensitivity to Climate Change of Dead Organic Matter Along the Canadian Boreal Forest Transect Case Study // *Climatic Change*. V. 74. P. 223–251.
<https://doi.org/10.1007/s10584-006-0466-8>
- Preston C.M., Schmidt M.W.I.* Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions // *Biogeosciences*. 2006. V. 3. № 4. P. 397–420.
<https://doi.org/10.5194/bg-3-397-2006>
- Procopchuk V.F., Bryanin S.V.* Ecological stability of brown raw-humus taiga soil and relation to anthropogenic influences in the northern part of the Amur region // *Eurasian J. Forest Research*. 2007. V. 10. P. 85–88.
- R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2020. <https://www.R-project.org/> (дата обращения 15.11.2021)
- Santín C., Doerr S.H., Preston C.M., González-Rodríguez G.* Pyrogenic organic matter production from wildfires: a missing sink in the global carbon cycle // *Global Change Biology*. 2015. V. 21. P. 1621–1633.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12800>
- Santos F., Wagner S., Rothstein D., Jaffe R., Miesel J.R.* Impact of a Historical Fire Event on Pyrogenic Carbon Stocks and Dissolved Pyrogenic Carbon in Spodosols in Northern Michigan // *Frontiers in Earth Science*. 2017. V. 5. P. 80.
<https://doi.org/10.3389/feart.2017.00080>
- Sato H., Kobayashi H., Iwahana G., Ohta T.* Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends // *Ecology and Evolution*. 2016. V. 6. № 16. P. 5690–5704.
<https://doi.org/10.1002/ece3.2285>
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F.* Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. № 1.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9>
- Schmidt M.W.I., Skjemstad J.O., Czimeczik C.I., Glaser B., Prentice K.M., Gelinás Y., Kuhlbusch T.A.J.* Comparative analysis of black carbon in soils // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. V. 15. № 1. P. 163–167.
<https://doi.org/10.1029/2000GB001284>
- Schmidt M.W.I., Skjemstad J.O., Gehrte E., Kögel-Knabner I., Kögel-Knabner I.* Charred organic carbon in German chernozemic soils // *European J. Soil Science*. 1999. V. 50. P. 351–365.

Pyrogenic Carbon Pools of the Upper Amur Region

S. V. Bryanin¹*, A. V. Danilov¹, Ye. S. Susloparova¹, and A. V. Ivanov¹

¹*Institute of geology and environmental management of the Far East Branch of the RAS, Ryolochniy ln., 1, Blagoveshchensk, 675000 Russia*

*E-mail: bruanin@gmail.com

Study relevance. Russian forests have the largest pool of carbon C among terrestrial ecosystems and are subject to periodic fires. Combustion products remain in soils for thousands of years and nowadays are the longest-term pool of carbon. However, the size of this pool in soils still remains a gap in knowledge about the C reserves structure in Russian forests. **Study objectives.** To determine the content and structure of pools of total and highly-stable forms of pyrogenic C (PyC), to estimate the share of various PyC forms within the soil C, and to study the relationship between the PyC and the stand characteristics and soil properties of periodically burning larch forests of the Upper Amur region. **Study objects and methods.** The paper presents the data of the first field assessment of the total and highly-stable forms of pyrogenic C pools in the soils of regularly burning larch forests of the Upper Amur region along a 500 km transect from north to south. We studied the general and stable forms of pyrogenic carbon, determined the reserves and thickness of litter, soil density, moisture, pH, Corg, N. **Study results.** In the upper soil layer, the total concentration of PyC varies from 1 to 2.2%, and the stock reaches 3.3 t ha⁻¹. The share of total PyC in the soil organic C pool reaches 21%, while the share of highly-resistant PyC forms does not exceed 4%. Principal component analysis revealed that the concentration and stock of total PyC in soils do not depend on soil properties, but tend to increase towards the north. At the same time, the content and reserves of highly-stable forms of PyC, which are signs of high-intensity fires occurring on the sites, positively and significantly correlate with the share of larch in the forest stand. **Conclusions.** Our results indicate the predominance of low-intensity ground fires, in which a large number of highly stable forms of PyC aren't being formed. The fires strength is likely to correlate positively with the larch regrowth.

Keywords: forest fires, pyrogenic carbon, forest soils, larch forests, Far East.

Acknowledgements: The study has been carried out with the financial support of RFBR, project 19-05-00305.

REFERENCES

- Abney R.B., Jin L., Berhe A.A., Soil properties and combustion temperature: Controls on the decomposition rate of pyrogenic organic matter, *Catena*, 2019, No. 182, pp. 104127. doi 10.1016/j.catena.2019.104127
- Bird M.I., McBeath A. V., Ascough P.L., Levchenko V.A., Wurster C.M., Munksgaard N.C., Smernik R.J., Williams A., Loss and gain of carbon during char degradation, *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, No. 106, pp. 80–89. doi 10.1016/j.soilbio.2016.12.012
- Bird M.I., Wynn J.G., Saiz G., Wurster C.M., McBeath A., The Pyrogenic Carbon Cycle, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, Vol. 43, pp. 273–298. doi 10.1146/annurev-earth-060614-105038
- Brodowski S., Rodionov A., Haumaier L., Glaser B., Amelung W., Revised black carbon assessment using benzene polycarboxylic acids, *Organic Geochemistry*, 2005, Vol. 36, No. 9, pp. 1299–1310. doi 10.1016/j.orggeochem.2005.03.011
- Certini G., Effects of fire on properties of forest soils: A review, *Oecologia*, 2005, No. 143, pp. 1–10. doi 10.1007/s00442-004-1788-8
- Chestnykh O.V., Lyzhin V.A., Koksharova A.V., Zapasy ugleroda v podstilkakh lesov Rossii (The carbon reserves in litters of forests in Russia), *Lesovedenie*, 2007, No. 6, pp. 114–121.
- Czimczik C.I., Schmidt M.W.I., Schulze E.D., Effects of increasing fire frequency on black carbon and organic matter in Podzols of Siberian Scots pine forests, *European J. Soil Science*, 2005, Vol. 56, No. 3, pp. 417–428. doi 10.1111/j.1365-2389.2004.00665.x
- DeLuca T.H., Gundale M.J., Brimmer R.J., Gao S., Pyrogenic Carbon Generation From Fire and Forest Restoration Treatments, *Frontiers in Forests and Global Change*, 2020, No. 3, pp. 1–8. doi 10.3389/ffgc.2020.00024
- Dixon R.K., Solomon A.M., Brown S., Houghton R.A., Trexler M.C., Wisniewski J., Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems, *Science*, 1994, Vol. 263, No. 5144, pp. 185–190. doi 10.1126/science.263.5144.185
- Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Payusova I.V., Gabov D.N., Donnerkhak O., Sravnenie metodov opredeleniya soedinenii ugleroda pirogenno izmenennykh organicheskikh soedinenii (Comparison of methods for determining pyrogenically modified carbon compounds), *Pochvovedenie*, 2021, No. 11, pp. 1332–1345. DOI 1310.31857/s0032180x2111006x.
- Dymov A.A., Startsev V.V., Milanovsky E.Y., Valdes-Korovkin I.A., Farkhodov Y.R., Yudina A.V., Donnerhack O., Guggenberger G., Soils and soil organic matter transformations during the two years after a low-intensity surface fire (Subpolar Ural, Russia), *Geoderma*, 2021, Vol. 404, No. 115278, pp. 1–10. doi 10.1016/j.geoderma.2021.115278
- Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Boreal forest health and global change, *Science*, 2015, Vol. 349, No. 6250, pp. 819–822. doi 10.1126/science.aaa9092
- Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vila F.J., Almendros G., Knicker H., The effect of fire on soil organic matter – a review, *Environment International*, 2004, No. 30, pp. 855–870. doi 10.1016/j.envint.2004.02.003
- Guggenberger G., Rodionov A., Shibistova O., Grabe M., Kasansky O.A., Fuchs H., Mikheyeva N., Zrazhevskaya G., Flessa H., Storage and mobility of black carbon in permafrost soils of the forest tundra ecotone in Northern Siberia, *Global Change Biology*, 2008, Vol. 14, pp. 1367–1381. doi 10.1111/j.1365-2486.2008.01568.x
- Gustafsson Ö., Bucheli T.D., Kukulska Z., Andersson M., Largeau C., Rouzaud J.-N., Reddy C.M., Eglinton T.I., Evaluation of a protocol for the quantification of black carbon in sediments, *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, No. 15, pp. 881–890. doi 10.1029/2000GB001380
- Gustafsson Ö., Haghseta F., Chan C., MacFarlane J., Gschwend P.M., Quantification of the Dilute Sedimentary Soot Phase: Implications for PAH Speciation and Bioavailability, *Environmental Science & Technology*, 1997, Vol. 31, pp. 203–209. doi 10.1021/es960317s
- Hammes K., Schmidt M.W.I., Smernik R.J., Currie L. a., Ball W.P., Nguyen T.H., Louchouart P., Houel S., Gustafsson Ö., Elmquist M., Cornelissen G., Skjemstad J.O., Masiello C.A., Song J., Peng P., Mitra S., Dunn J.C., Hatcher P.G., Hockaday W.C., Smith D.M., Hartkopf-Fröder C., Böhmer A., Luer B., Huebert B.J., Amelung W., Brodowski S., Huang L., Zhang W., Gschwend P.M., Flores-Cervantes D.X., Largeau C., Rouzaud J.-N., Rumpel C., Guggenberger G., Kaiser K., Rodionov A., Gonzalez-Vila F.J., Gonzalez-Perez J.A., de la Rosa J.M., Manning D.A.C., López-Capél E., Ding L., Comparison of quantification methods to measure fire-derived (black/elemental) carbon in soils and sediments using reference materials from soil, water, sediment and the atmosphere, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 21, No. 3, GB3016. doi 10.1029/2006GB002914
- Huang W., Hu Y., Chang Y., Liu M., Li Y., Ren B., Shi S., Effects of Fire Severity and Topography on Soil Black Carbon Accumulation in Boreal Forest of Northeast China, *Forests*, Vol. 9, pp. 408. doi 10.3390/f9070408
- Ivanov A.V., Lynov D.V., Panfilova E.V., Braun M., Zamolodchikov D.G., Forest litters as a link in the carbon cycle in coniferous–broadleaved forests of the Southern Far East of Russia, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 10, pp. 1164–1171. DOI 1110.1134/S1064229318100058.
- Kasin I., Ohlson M., An experimental study of charcoal degradation in a boreal forest, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 65, pp. 39–49. doi 10.1016/j.soilbio.2013.05.005
- Krasnoshchekov Y.N., Vliyanie pirogenogo faktora na serogumusovye pochvy osnovnykh lesov v tsentral'noi ekologicheskoi zone baikal'skoi prirodnoi territorii (Pyrogenic impact on gray humus soils of pine forests in the central ecological zone of the Baikal lake natural territory), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 2, pp. 43–52.
- Kurth V.J., MacKenzie M.D., DeLuca T.H., Estimating charcoal content in forest mineral soils, *Geoderma*, 2006, Vol. 137, pp. 135–139. doi 10.1016/j.geoderma.2006.08.003
- Kuzyakov Y., Subbotina I., Chen H., Bogomolova I., Xu X., Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 41, pp. 210–219. doi 10.1016/j.soilbio.2008.10.016

- Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D., Biochar effects on soil biota – A review, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 43, pp. 1812–1836. doi 10.1016/j.soilbio.2011.04.022
- Li Y., Hu S., Chen J., Müller K., Fu W., Lin Z., Wang H., Effects of biochar application in forest ecosystems on soil properties and greenhouse gas emissions: a review, *J. Soils and Sediments*, 2018, Vol. 18, No. 2, pp. 546–563. doi 10.1007/s11368-017-1906-y
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B., Skjemstad J.O., Thies J., Luizão F.J., Petersen J., Neves E.G., Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils, *Soil Science Society of America J.*, 2006, Vol. 70, pp. 1719–1730. doi 10.2136/sssaj2005.0383
- Lupyan E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., D.A. K., Sen'ko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v 21 veke na territorii Rossiiskoi Federatsii (tsifry i fakty po dannym detektirovaniya aktivnogo goreniiya) (Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection)), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175. doi 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175
- Maestrini B., Miesel J.R., Modification of the weak nitric acid digestion method for the quantification of black carbon in organic matrices, *Organic Geochemistry*, 2017, Vol. 103, pp. 136–139. doi 10.1016/j.orggeochem.2016.10.010
- Makoto K., Hirobe M., DeLuca T.H., Bryanin S. V., Procopchuk V.F., Koike T., Effects of fire-derived charcoal on soil properties and seedling regeneration in a recently burned *Larix gmelinii*/*Pinus sylvestris* forest, *J. Soils and Sediments*, 2011, Vol. 11, No. 8, pp. 1317–1322. doi 10.1007/s11368-011-0424-6
- Makoto K., Koike T., Charcoal ecology: Its function as a hub for plant succession and soil nutrient cycling in boreal forests, *Ecological Research*, 2011, Vol. 36, pp. 4–12. doi 10.1111/1440-1703.12179
- Masiello C.A., New directions in black carbon organic geochemistry, *Marine Chemistry*, 2004, Vol. 92, pp. 201–213. doi 10.1016/j.marchem.2004.06.043
- Neary D.G., Klopatek C.C., DeBano L.F., Ffolliott P.F., Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis, *Forest Ecology and Management*, 1999, Vol. 122, pp. 51–71. doi 10.1016/S0378-1127(99)00032-8
- Nguyen T.H., Brown R.A., Ball W.P., An evaluation of thermal resistance as a measure of black carbon content in diesel soot, wood char, and sediment, *Organic Geochemistry*, Vol. 35, No. 3, pp. 217–234. doi 10.1016/j.orggeochem.2003.09.005
- Ohlson M., Dahlberg B., Økland T., Brown K.J., Halvorsen R., The charcoal carbon pool in boreal forest soils, *Nature Geoscience*, 2009, Vol. 2, No. 10, pp. 692–695. doi 10.1038/ngeo617
- Preston C.M., Bhatti J.S., Flanagan L.B., Norris C., Stocks, Chemistry, and Sensitivity to Climate Change of Dead Organic Matter Along the Canadian Boreal Forest Transect Case Study, *Climatic Change*, Vol. 74, pp. 223–251. doi 10.1007/s10584-006-0466-8
- Preston C.M., Schmidt M.W.I., Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions, *Biogeosciences*, 2006, Vol. 3, No. 4, pp. 397–420. doi 10.5194/bg-3-397-2006
- Procopchuk V.F., Bryanin S.V., Ecological stability of brown raw-humus taiga soil and relation to anthropogenic influences in the northern part of the Amur region, *Eurasian J. Forest Research*, 2007, Vol. 10, pp. 85–88.
- R Development Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. 2020. <https://www.R-project.org/> (November 15, 2021)
- Santín C., Doerr S.H., Preston C.M., González-Rodríguez G., Pyrogenic organic matter production from wildfires: a missing sink in the global carbon cycle, *Global Change Biology*, 2015, Vol. 21, pp. 1621–1633. doi 10.1111/gcb.12800
- Santos F., Wagner S., Rothstein D., Jaffe R., Miesel J.R., Impact of a Historical Fire Event on Pyrogenic Carbon Stocks and Dissolved Pyrogenic Carbon in Spodosols in Northern Michigan, *Frontiers in Earth Science*, 2017, Vol. 5, pp. 80. doi 10.3389/feart.2017.00080
- Sato H., Kobayashi H., Iwahana G., Ohta T., Endurance of larch forest ecosystems in eastern Siberia under warming trends, *Ecology and Evolution*, 2016, Vol. 6, No. 16, pp. 5690–5704. doi 10.1002/ece3.2285
- Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S., Karminov V., Ontikov P., Santoro M., See L., Kositsyn V., Shvidenko A., Romanovskaya A., Korotkov V., Lesiv M., Bartalev S., Fritz S., Shchepashchenko M., Kraxner F., Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported, *Scientific Reports*, 2021, Vol. 11, No. 1. doi 10.1038/s41598-021-92152-9
- Schmidt M.W.I., Skjemstad J.O., Czimeczik C.I., Glaser B., Prentice K.M., Gelin Y., Kuhlbusch T.A.J., Comparative analysis of black carbon in soils, *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, Vol. 15, No. 1, pp. 163–167. doi 10.1029/2000GB001284
- Schmidt M.W.I., Skjemstad J.O., Gehrt E., Kögel-Knabner I., Kögel-Knabner I., Charred organic carbon in German chernozemic soils, *European J. Soil Science*, 1999, Vol. 50, pp. 351–365.
- Startsev V.V., Dymov A.A., Prokushkin A.S., Soils of post-pyrogenic larch stands in Central Siberia: morphology, physicochemical properties, and specificity of soil organic matter, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 8, pp. 885–897.
- Tsibart A.S., Gennadiev A.N., The influence of fires on the properties of forest soils in the Amur River basin (the Norskii Reserve), *Eurasian soil science*, 2008, Vol. 41, No. 7, pp. 686–693.
- Tsvetkov P.A., Pyrophytic properties of the larch *Larix gmelinii* in terms of life strategies, *Russian J. Ecology*, 2004, Vol. 35, No. 4, pp. 224–229.
- Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Chestnykh O.V., Organicheskie uglerod listvennichnykh lesov Rossii (Organic carbon of Russian larch forests), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2003, Vol. 21, No. 1, pp. 66–76.

УДК 63*630*181.351

КРУПНЫЕ ДРЕВЕСНЫЕ ОСТАТКИ В МУССОННЫХ ТРОПИЧЕСКИХ ЛЕСАХ ВЬЕТНАМА¹

© 2022 г. Е. А. Капица^{a, *}, А. Н. Кузнецов^{d, e}, С. П. Кузнецова^{d, e}, В. О. Лопес де Гереню^f,
В. В. Каганов^g, И. Н. Курганова^f, Е. В. Кушневская^{a, h}, Е. В. Шорохова^{a, b, c}

^aСанкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, 194021 Россия

^bИнститут леса КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, д. 11, Петрозаводск, Республика Карелия, 185910 Россия

^cИнститут природных ресурсов Финляндии (Луке),

ул. Лаатоканкартаноонкаари, д. 4, Хельсинки, FI-00790 Финляндия

^dРоссийско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр,
ул. Нгуен Ван Хуен, Нгиа До, Кау Зай, Ханой, Вьетнам

^eИнститут проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Ленинский пр-т, д. 33, Москва, 119071 Россия

^fИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, д. 2, стр. 2, Московская область, Пущино, 142290 Россия

^gЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
ул. Профсоюзная, д. 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

^hСанкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*E-mail: kapitsa@list.ru

Поступила в редакцию 03.11.2021 г.

После доработки 16.01.2022 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Для тропических лесов, в особенности для лесных экосистем Юго-Восточной Азии существуют лишь фрагментарные оценки пулов КДО и их динамики. В работе впервые исследовали запас и структурное разнообразие крупных древесных остатков (КДО) в лесах, не затронутых коммерческими рубками на территориях национальных парков (НП) Бидуп-Нуйба и Бу Зя Мап республики Вьетнам. В низкогорных диптерокарповых лесах НП Бу Зя Мап средний запас КДО был почти в два раза ниже среднего запаса в полидоминантных горных лесах НП Бидуп-Нуйба: $44 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$ против $78 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$. Масса КДО линейно зависела от их объема и составила в среднем 24 т га^{-1} . Проективное покрытие КДО составляло в среднем $269 \text{ м}^2 \text{ га}^{-1}$. Среди категорий субстрата преобладал валеж, составляя 42 и 31% в лесах НП Бидуп-Нуйба и Бу Зя Мап соответственно. Доля крупных ветвей в горных лесах НП Бидуп-Нуйба составила 8%, тогда как в низкогорных лесах НП Бу Зя Мап она достигала 33% объема КДО. В НП Бу Зя Мап отмечена очень высокая активность термитов – на 73% исследованных объектов КДО. Процент термитных ходов, частично заполненных почвой, в среднем составил 32% объема КДО. Достаточно высокое проективное покрытие КДО с разнообразными путями потери их массы – потребления беспозвоночными, микогенного ксилотиза коррозионного и деструктивного типов позволяют предположить их существенную роль в почвообразовательных процессах. Выявлены сходства в запасах и размерах КДО в исследуемых муссонных тропических лесах Южного Вьетнама и в коренных таежных ельниках европейской части России с мелкоконтурной оконной динамикой. Преобладание валежа среди категорий КДО и близкая к колоколообразной форма распределения объема КДО по классам разложения дополняют сходство пула КДО в тропических низкогорных и горных полидоминантных лесах с таежными разновозрастными ельниками. Однако высокая доля ветвей в структуре КДО, в особенности в низкогорных лиственных полидоминантных лесах, отличает КДО тропических лесов от КДО лесов таежного и умеренного пояса.

Ключевые слова: древесный детрит, валеж, сухостой, отпад, ксилотиз, фрагментация, термиты.

DOI: 10.31857/S0024114822030081

Ключевая роль крупных древесных остатков (КДО) – сухостоя, валежа, зависших стволов, пней, крупных ветвей и корней – в функциони-

ровании таежных и широколиственных лесов продемонстрирована в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей (Замолотчиков, 2009; Стороженов, 2011; Stokland et al., 2012; Иванов и др., 2020). Для тропических лесов существуют лишь фрагментарные оценки

¹ Исследование выполнено частично в рамках госзаданий ИЛ Кар НЦ ЛРАН ФИЦ ПНЦБИ РАН и ЦЭПЛ РАН (AAAA-A18-118052590019-7).

Таблица 1. Характеристика районов исследования (Горбунов, 2019; Кузнецов, 2003)

Национальный парк	Географические координаты районов исследований	Среднегодовая температура, °С	Диапазон высот над уровнем моря, м	Среднегодовое количество осадков, мм
Бидуп-Нуйба	12°10.885′–11.235′ с.ш., 108°40.469′–41.406′ в.д.	+18.2	1470–1570	1860
Бу Зя Мап	12°11.788′–12.149′ с.ш., 107°12.248′–12.433′ в.д.	+26.2	387–737	2469

пулов КДО и их динамики (Chambers et al., 2000; Clark et al., 2002; Palace et al., 2012; Giardina, 2019). Соответственно, роль КДО в формировании био-разнообразия тропических лесов и их роли в почвообразовании и круговоротах биогенных элементов остается слабоизученной. Для лесных экосистем Юго-Восточной Азии некоторая информация о КДО представлена лишь в нескольких работах (Gale, 2000; Pfeifer et al., 2015). Для лесов этих регионов оценка экологической роли КДО начинается со сбора эмпирических данных, характеризующих их объем, массу и проективное покрытие в лесах различного породного состава древостоя и находящихся в разных ландшафтно-географических условиях.

Динамика пула КДО зависит от соотношения скорости отпада в результате отмирания деревьев или их отдельных фракций и разложения (Капица и др., 2012). В свою очередь, процессы разложения КДО включают биогенный ксилолиз, приводящий к потере массы и эмиссии CO₂ в атмосферу, фрагментацию и поедание беспозвоночными, а также выщелачивание. На глобальном уровне биогенный ксилолиз является основным процессом, приводящим к потере массы КДО (Russell et al., 2015). В таежных лесах длительность процесса ксилолиза зависит от климатических факторов, в основном, от температуры, а также от древесной породы, типа древесного отпада и других характеристик субстрата и варьирует от нескольких десятков до нескольких сотен лет (Shorohova, Kapitsa, 2016). *In vitro*, при оптимальных температуре и влажности, ксилолиз коррозионного типа, вызываемый грибом одного вида, приводит к полному разложению образца древесины (Соловьев, 1992). При деструктивном типе микогенного ксилолиза сохраняется остаток, составляющий по массе около 30% (Соловьев, 1992). Однако в природных условиях (*in situ*), при варьирующих условиях внешней среды и составе микоценоза, КДО разлагаются, по всей видимости, не полностью, а часть разложившегося древесного вещества переходит в почву (Magnússon et al., 2016). В северных широтах возможно также так называемое “захоронение” КДО под слоем сфагновых мхов с увеличением длительности процессов ксилолиза на неопределенно долгое время (Moroni et al., 2015).

В тропических лесах с влажным и теплым климатом не менее важная, по сравнению с грибами, роль в разложении КДО принадлежит термитам (Lopes de Gerenyu et al., 2015; Shorohova et al., 2021), деятельность которых может приводить к потере массы КДО на 70 и более процентов (Shorohova et al., 2021). Первыми шагами в изучении динамики КДО в муссонных тропических лесах можно считать оценку распределения их объема по классам разложения и категориям (сухой, валеж, зависшие стволы, пни, ветви), а также диагностику путей потери массы и объема КДО.

Цель настоящего исследования состояла в определении вариабельности запасов и структурного разнообразия КДО в низкогорных лиственных полидоминантных и горных хвойно-широколиственных лесах Южного и Центрального Вьетнама. Задачи исследования включали оценку: (1) объема, массы, проективного покрытия и размеров КДО; (2) распределения КДО по классам разложения и категориям; (3) количественного соотношения путей потери массы КДО в результате ксилолиза коррозионного и деструктивного типов и потребления беспозвоночными, в первую очередь, термитами.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Полевые и лабораторные работы. Исследование выполнено на территории национальных парков Бидуп-Нуйба (Bidoup Nui Ba) и Бу Зя Мап (Bu Gia Map) Социалистической Республики Вьетнам в лесах, не затронутых коммерческими рубками (табл. 1). Все КДО образованы в результате естественного отпада отдельных деревьев или небольших групп в результате усыхания или реже ветровала и бурелома, а также отпада ветвей.

В ходе геоботанических описаний 14-ти растительных сообществ в НП Бидуп-Нуйба и пяти растительных сообществ в НП Бу Зя Мап был определен состав древесного яруса с определением принадлежности древесных пород с точностью до рода, и, где было возможно, до вида. Запасы ствольной древесины растущих деревьев были рассчитаны по данным сплошной перечислительной таксации на пробных площадях размером 0.1–0.125 га. К перечету принимались деревья с диаметром стволов 8 и более см на высоте 1.3 м.

После группировки по породной принадлежности (с точностью до вида, рода или семейства) выполнялось измерение высоты деревьев с последующим построением графика высот для каждой из групп. Объем древесины вычислялся по формуле:

$$M = \sum GH_{cp}F_{cp}, \quad (1)$$

где M – объемный запас древесины, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$; $\sum G$ – площадь или сумма площадей сечения, $\text{м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$; H_{cp} – средняя или текущая высота породы, м; F_{cp} – расчетное или среднее видовое число дерева или породной группы. Для определения видовых чисел проводили измерения диаметров стволов на половине высоты деревьев с последующим расчетом видовых чисел по формуле Шиффеля.

Запасы и структурное разнообразие КДО в лесных биогеоценозах (БГЦ) анализировали по результатам учетов на трансектах длиной 50 и шириной 4 м, заложенных в 2018–2019 гг. в направлениях с севера на юг и с запада на восток. В инвентаризацию были включены все объекты КДО более 6 см. В национальном парке Бидуп-Нуйба заложена 41 трансекта в полидоминантных горных лесах, образованных: 1) только покрытосеменными древесными породами семейств: букковых (Fagaceae), элеокарповых (Elaeocarpaceae), магнолиевых (Magnoliaceae), чайных (Theaceae), миртовых (Myrtaceae), сапидновых (Sapindaceae), молочайных (Euphorbiaceae), березовых (Betulaceae), анноновых (Annonaceae), ореховых (Juglandaceae), гаммелисовых (Hamamelidaceae), сапотовых (Sapotaceae), алтингиевые (Altingiaceae), бобовых (Fabaceae), лимонниковых (Schisandraceae), стираксовых (Styracaceae), кизиловых (Cornaceae), эбеновых (Ebenaceae), пентафилаксовых (Pentaphylacaceae), протейных (Proteaceae), мальвовых (Malvaceae), мареновых (Rubiaceae), пальмовых (Palmae); 2) покрытосеменными с участием голосеменных: сосны алеппской (*Pinus dalatensis*), дакрикарпуса (*Dacrycarpus imbricatus*), дакридиума кипарисового (*Dacrydium elatum*) вышеперечисленных видов и сосны Кремпфа (*Pinus krempfii*) и фокиении (*Fokienia hodginsii*); 3) а также в лесах, образованных сосной кесия (*Pinus kesiya*). В горном массиве сформировались полидоминантные смешанные леса со сложной (4 подъяруса) и среднесложной (3 подъяруса) вертикальной структурой древостоев – на выположенных участках и пологих склонах, и с простой (1–2 подъяруса) структурой – на гребнях хребтов, вершинах и крутых склонах (Горбунов и др., 2018). Лиственные леса расположены в поймах рек и на пологих склонах на высотах 850–1600 м над уровнем моря. Смешанные хвойно-широколиственные леса приурочены к высотам 1500–1700 м. Горные леса, образованные древостоями сосны кесия, расположены на вершинах и открытых гребнях горных хребтов на высотах 1500–1700 м. На высотах 1700–2000 м над у. м.

произрастают моховые облачные леса и криволеся.

Почвенный покров НП Бидуп-Нуйба представлен двумя основными типами почв: зональными желтоземами (желтые феррсоаллитные, Haplic (или Umbric) Ferralsols согласно WRB, 2014) и интразональными аллювиальными почвами (Fluvisols) в пойме реки (Лебедев и др., 2019). В зависимости от почвообразующей (материнской) породы, которая в значительной степени зависит от положения в рельефе, желтоземы могут иметь различную мощность, минералогический и гранулометрический состав, а также отличаться по запасам органического углерода и других биогенных элементов. Так, на поверхности гребня структурной гряды под сосново-широколиственным лесом формируются желтоземы типичные маломощные легкосуглинистые на глинистой коре выветривания дацитов, а в верхней части склонов северной экспозиции под среднесомкнутым широколиственным лесом с развитым травяным ярусом формируются желтоземы лессивированные среднеспособные супесчаные на щебнисто-каменном делювии дацитов (Лебедев и др., 2019). В средней части склона структурной гряды под среднесомкнутым широколиственным лесом с тремя древесными подъярусами и хорошо развитым травяным ярусом встречаются желтоземы типичные маломощные среднесуглинистые на щебнисто-каменном делювии дацитов. На холодных склонах северной экспозиции, где скорость биологического круговорота значительно ниже, чем на южных, происходит формирование более мощной подстилки с возможным формированием оторфованного горизонта (Лебедев и др., 2019).

На вершине гряды был заложен неполнопрофильный разрез с целью характеристики основных почвенных свойств в верхней 50-сантиметровой толще. Образцы почв отбирали послойно на глубинах: 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 и 30–50 см, анализы проводили с использованием общепринятых в почвоведении методов². Согласно классификации Качинского (Шейн, 2005), текстура почвы в слое 0–5 см соответствовала легкосуглинистой, а в слое 20–50 см постепенно становилась тяжелосуглинистой (табл. 2). Во всей 50-сантиметровой толще плотность почв невысока и варьировала от 0.84 до 1.01 г/см³. Верхний 10-сантиметровый слой содержал значительное количество органиче-

² Гранулометрический состав определяли для каждого участка в смешанном образце из слоя 0–10 см методом пипетки с диспергацией пиррофосфатом натрия (Шейн, 2005). Определение величины рН проводили в образцах почв, просеянных через сито 2 мм, в 1 М растворе KCl (соотношение почва : раствор = 1 : 2.5) на рН-метре Mettler-Toledo (Швейцария). Содержание органического углерода (Сорг) и общего азота (Нобщ) определяли в образцах, растертых до состояния пудры на автоматическом CHNS-анализаторе (Лесо, США) в трехкратной повторности.

Таблица 2. Характеристика основных свойств почв в национальных парках Бу Зя Мап и Бидуп–Нуйба

Глубина, см	Содержание фракций (%)			Плотность, г/см ³	рН(KCl)	C	N	C/N
	песок ¹	глина ²	ил ³			г/кг почвы		
Национальный парк Бидуп–Нуйба (хвойно-лиственный лес, желтозем)								
0–5	74.6	25.4	9.48	0.84	3.23	82.7	3.1	26.5
5–10	61.8	38.2	20.28	0.92	3.60	54.2	2.3	23.6
10–20	57.6	42.4	22.56	1.01	3.81	21.5	1.1	18.7
20–30	52.68	47.32	28.56	1.07	3.86	11.7	0.8	15.5
30–50	54.24	45.76	22.6	1.01	3.81	9.8	0.6	16.0
Национальный парк Бу Зя Мап (Диптерокарпусовый древостой, краснозем)								
0–5	22.84	77.16	48.20	0.99	3.82	39.8	3.2	12.4
5–10	18.24	81.76	54.40	0.93	3.84	33.3	2.8	12.0
10–20	8.89	91.11	60.27	0.97	3.88	27.1	2.3	12.0
20–30	5.90	94.10	64.27	0.92	3.88	23.6	1.8	12.9
30–40	6.26	93.74	68.63	0.87	4.02	19.9	1.4	14.3
40–50	7.34	92.66	67.78	0.91	4.08	16.9	1.4	12.4
Национальный парк Бу Зя Мап (Лагерстремиевый древостой, краснозем)								
0–5	52.72	47.28	19.32	0.84	4.24	58.1	4.5	13.0
5–10	43.68	56.32	25.84	0.86	3.74	38.0	3.5	10.7
10–20	40.18	59.82	29.31	0.99	3.62	30.1	2.8	10.9
20–30	26.86	73.14	40.19	1.10	3.58	22.6	2.1	10.6
30–40	24.11	75.89	45.23	1.10	3.57	21.4	2.0	10.9
40–50	17.99	82.01	49.83	1.10	3.62	18.9	1.9	9.7

Средний диаметр фракций: ¹ > 0.01 мм; ² < 0.01 мм; ³ < 0.001 мм.

ского углерода (54–83 г С/кг почвы), которое резко убывало с глубиной. Отношение С/Н в верхней части профиля варьировало от 24 до 27, что свидетельствует о невысокой степени гумификации органического вещества (ОВ). Наиболее обогащенный углеродом слой 0–5 см отличался также повышенной потенциальной кислотностью (рН (KCl) = 3.2), с глубиной значения рН повышались на 0.4–0.6 единицы.

В национальном парке Бу Зя Мап в низкогорных высокоствольных диптерокарповых лесах на склонах и на пойменных террасах заложено 23 трансекты. Отдельные участки характеризовались преобладанием *Dipterocarpus costatus*, *D. turbinatus*, *D. alatus*, *Hopea odorata*, *Lagerstroemia calyculata*, *Swintonia floribunda*.

Наиболее распространенным типом почв в пределах исследуемой территории НП Бу Зя Мап являлись красные ферраллитные почвы (Ferralsols, согласно WRB, 2014). В разных типах древостоев (диптерокарповом – на вершине холма и лагерстремиевом – на относительно пологом участке) нами были заложены неполнопрофильные разрезы, и из верхних 0–50 см послойно отобраны почвенные образцы: с шагом 0–5 см в пределах первых 10 см, а далее каждые 10 см до глуби-

ны 50 см (табл. 2). Гранулометрический состав почв изменялся от тяжелосуглинистого до глинистого в пределах верхнего 5-сантиметрового слоя и затем постепенно утяжелялся вниз по профилю, свидетельствуя о процессах лессиважа (выноса илистой фракции из верхних слоев в нижние). Несмотря на тяжелый гранулометрический состав, плотность почв невысока: <1 г/см³ в диптерокарпусовом насаждении и увеличивается от 0.84 до 1.10 г/см³ – в лагерстремиевом, что, по-видимому, может быть связано с характерной псевдопесчаной структурой почв. Значения потенциальной кислотности почв в НП Бу Зя Мап оказались чуть выше, чем в почвах НП Бидуп Нуйба. и изменялись от 3.57 до 4.4 ед. рН. Верхний 5-сантиметровый слой почвы под лагерстремией содержал углерода и азота в 1.5 раз больше, чем тот же слой почвы в диптерокарпусовом насаждении (табл. 2). За исключением верхнего слоя, отношение С/Н в почве лагерстремиевого насаждения несколько меньше по величине, чем в диптерокарпусовом, что свидетельствует о более глубокой гумификации ОВ в этих почвах.

Для валежа, зависших деревьев и крупных ветвей учитывали класс разложения (Shorohova et al., 2021, 2022) (табл. 3) и измеряли с помощью санти-

Таблица 3. Характеристика классов ксилолиза КДО на основании степени разложения древесины, определяемой по мягкости (глубине проникновения ножа) и влажности (Shorohova et al., 2021, 2022)

Класс разложения	Характеристика класса разложения	
	Национальный парк Бидуп-Нуйба	Национальный парк Бу Зя Мап
1	Объем разложившейся древесины составляет 0–10%; остальная древесина не затронута ксилолизом. Кора и ветви чаще всего присутствуют, плодовые тела дереворазрушающих грибов не наблюдаются, могут встречаться лишайники. Лезвие ножа проникает внутрь на несколько миллиметров	Объем разложившейся древесины составляет 0–10%; остальная древесина не затронута ксилолизом. Древесина относительно сухая. Лезвие ножа проникает внутрь на несколько миллиметров. Туннели термитов занимают не более 10% от объема ствола
	Среднее значение плотности древесины, г см ⁻³	
	0.56	0.628
2	Объем сильно разложившейся древесины составляет 0–10%; остальная древесина или не затронута ксилолизом вообще, или слегка размягчена. Кора и ветви присутствуют частично или полностью, появляются первые признаки заселения дереворазрушающих грибов (гифы) и мхов. Лезвие ножа проникает внутрь менее чем на 2 см	Древесина слегка разложившаяся. Лезвие ножа проникает внутрь менее чем на 2 см. Доля термитных ходов в КДО варьирует от 0 до 30% от объема ствола
	Среднее значение плотности древесины, г см ⁻³	
	0.490	0.501
3	Разложением затронута от 11 до 100% древесины. Кора и ветви присутствуют частично, наблюдается активное освоение субстрата дереворазрушающими грибами и мхами, которые покрывают ствол частично или полностью	Древесина сильно разложившаяся, легко “режется” ножом, ее объем составляет 10–100%. В большинстве случаев древесина относительно влажная. Лезвие ножа проникает насквозь. Доля термитных ходов в КДО варьирует от 31 до 60%
	Среднее значение плотности древесины, г см ⁻³	
	0.370	0.332
4	Вся древесина сильно разложилась. Образцы древесины дробятся на отдельные волокна и могут быть измельчены пальцами. Кора и ветви отсутствуют, мхи покрывают ствол полностью	Вся древесина сильно разложилась. Образцы древесины дробятся на отдельные волокна и могут быть измельчены пальцами. Древесина очень влажная. Доля термитных ходов в КДО варьирует от 61 до 80%
	Среднее значение плотности древесины, г см ⁻³	
	0.280	0.169
5	Тип и границы гнилей трудно различимы. Активно идет процесс гумификации. Кора и ветви отсутствуют, мхи покрывают ствол полностью	Тип и границы гнилей трудно различимы. Активно идет процесс гумификации. Форма стволов сильно изменена. Туннели термитов занимают более 80% от объема ствола
	Среднее значение плотности древесины, г см ⁻³	
	0.150	0.071

метровой ленты окружность в месте пересечения ходовой линии. Использовали метод учета валежа на линейных трансектах (Грабовский, Замолотчиков, 2012).

Объем КДО классам разложения без учета объема древесины, потребленной термитами, рассчитывали по формуле (Stahl et al., 2001):

$$V = (\pi^2 / 8 \sum d_i^2 S) / \sum L_j, \quad (2)$$

где V – объем КДО данного класса разложения, d_i – диаметр i -го объекта в месте пересечения ходовой линии, рассчитанный на основании измерения длины окружности объекта, L_j – длина j -й ходовой линии, S – площадь, в данном случае равная 1 га.

Для сухостоя и пней диаметром более 4 см регистрировали класс разложения, диаметр основания и вершины (или диаметр на высоте 1.3 м) и высоту. Объем пней рассчитывали по формуле усеченного конуса. Объем сухостойных деревьев рассчитывали умножением площади сечения на высоте 1.3 м на видовое число и высоту. Видовое число рассчитывали по формуле Шиффеля для каждой древесной породы по данным таксационных измерений на постоянных пробных площадях. Для каждого дерева измеряли диаметр на высоте 1.3 м, на половине высоты дерева и высоту. При неизвестности видовых чисел исследуемых древесных пород использовали видовые числа для осины, или, для голосеменных – сосны (Тетюхин и др., 2004).

Площадь проективного покрытия валежа, зависших деревьев и крупных ветвей рассчитывали для каждой трансекты делением их суммарного объема на средний диаметр. Для пней и сухостоя проективное покрытие считали равным площади сечения ствола.

Для перевода объема КДО в массу со всех КДО, попадающих в учет на трансекте, отбирали образцы правильной геометрической формы с участков разных стадий разложения. Объем выборки для КДО лесов Бидуп-Нуйба и Бу Зя Мапа составил 360 и 157 объектов соответственно. Количество и процент участков, разлагающихся по типам коррозии и деструкции и стадий разложения, а также пропорции древесины, потребленной беспозвоночными, включая термитные ходы, заполненные почвой, оценивали визуально на спилах. Отобранные образцы замеряли с целью определения объема. Сильно разложившиеся фракции отбирали при помощи почвенного бура. Объем образцов определяли геометрически с использованием формул параллелепипеда, усеченного конуса и куба, для сильно разложившихся образцов объем принимали равным объему бура. Все образцы высушивали в сушильном шкафу при температуре 103°C в течение 48 ч до абсолютно сухого состояния, взвешивали, рассчитывали

базисную плотность древесины (ρ , г см⁻³) по формуле (Полубояринов, 1976):

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3)$$

где: m – масса в абсолютно сухом состоянии, г, V – объем образца, см³.

Базисную плотность рассчитывали для каждого образца по отдельности, а затем переводили с ее помощью в массу всего ствола с учетом процентного соотношения по объему участков разных стадий разложения, пустот и термитных ходов.

Статистический анализ данных. Связь массы, проективного покрытия и объема КДО оценивали с помощью линейной регрессионной модели. Зависимости запаса КДО от типа биогеоценоза оценивали с использованием обобщенной линейной множественной регрессионной модели в среде R (R Core Team, 2013).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Объем КДО

Объем КДО в двух изученных лесных массивах в среднем составил 66 м³ га⁻¹. В лесах Бу Зя Мапа средний запас КДО составил 44 м³ га⁻¹ (Min = 5 м³ га⁻¹; Max = 144 м³ га⁻¹) и был почти в два раза ниже среднего запаса в Бидуп-Нуйба – 78 м³ га⁻¹ (Min = 13 м³ га⁻¹; Max = 226 м³ га⁻¹) (рис. 1). Средние объемы стволов живых деревьев составили 502.9 м³ га⁻¹ и 440.6 м³ га⁻¹, соответственно. Ключевую роль в формировании запасов древесины в лесах НП Бу Зя Мапа играют *Swintonia floribunda* и *Lagerstroemia calyculata*, для НП Бидуп-Нуйба наибольшую роль играют представители родов *Syzygium*, *Lithocarpus* и *Camellia*. Особенностью горных лесов НП Бидуп-Нуйба является наличие в древостоях представителей голосеменных – *Fokienia hodginsii* и *Pinus krempfii*, отличающихся долговечностью и значительными размерами. Старовозрастные экземпляры данных видов могут иметь объем ствола более 10 м³, и их наличие или отсутствие на пробных площадях и учетных трансектах оказывает существенное влияние на получаемые данные о пространственном распределении запасов стволовой древесины и крупных древесных остатков.

Доля КДО в совокупных запасах древесины обследованных лесных массивов национальных парков составила, в среднем, 8.8% и 15%. Важной отличительной чертой рассматриваемых древостоев является очень малое количество сухостойных деревьев. В НП Бу Зя Мапа средний объем сухостоя составил 0.3 м³ га⁻¹, на одной из пробных площадей сухостой отсутствует полностью. В НП Бидуп-Нуйба средний запас сухостоя имеет величину 2.1 м³ га⁻¹. В обоих случаях доля сухостоя со-

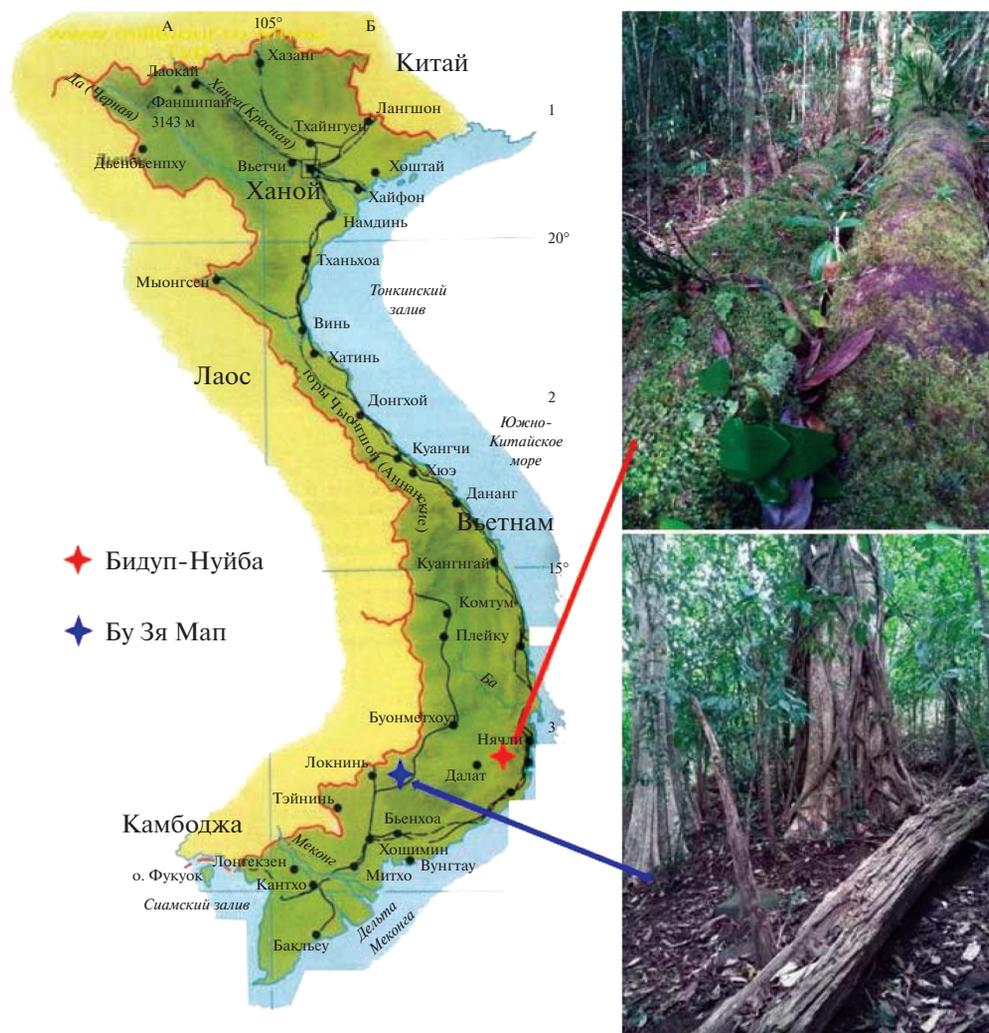


Рис. 1. Расположение объектов исследования.

ставляет менее 1% от общего запаса деревьев, находящихся на корню и еще меньшую долю в совокупном запасе живой и мертвой древесины на пробных площадях. Наиболее вероятной причиной этого является отмеченная ранее высокая активность термитов и дереворазрушающих грибов, использующих древесину погибших деревьев в качестве питательного субстрата. Наиболее доступные элементы деревьев – корни и комлевые части стволов разрушаются в первую очередь, в результате чего дерево теряет устойчивость и вскоре переходит в пул крупных древесных остатков. Следует отметить, что быстрому выпадению из древостоя погибших деревьев не препятствуют и хорошо развитые досковидные корни. На одной из пробных площадей в НП Бу Зя Мап крупный экземпляр *Swintonia floribunda*, в декабре 2018 года находившийся в составе древостоя, в марте 2019 года был отмечен, как сухостой, а уже в декабре 2019 года оказался в пуле КДО. Таким образом,

различия в запасах КДО двух изучаемых лесных массивов обусловлены их географическим положением, породным составом древостоев и климатическими условиями. Более низкие температуры воздуха позволяют предположить более низкую скорость разложения КДО и, соответственно, более активное их накопление в лесах Бидуп-Нуйба, по сравнению с лесами Бу Зя Мапа.

Вариация запасов КДО в лесах Бидуп-Нуйба была обусловлена породным составом древостоя, положением в рельефе и почвенными условиями исследуемых БГЦ. Средние объемы КДО возрастали в ряду: туманные леса, расположенные на склонах на самых высоких отметках высот над уровнем моря ($34 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$) > пойменные лиственные леса ($61 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$) > смешанные хвойно-широколиственные леса ($79 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$) > кезиевые леса на вершинах холмов ($88 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$) > смешанные хвойно-широколиственные леса с

Таблица 4. Результаты статистического анализа данных и параметры обобщенной линейной модели для разных БГЦ в национальном парке Бидуп-Нуйба

Средние значения коэффициентов модели с распределением Пуассона (SE)	Z(p)
Свободный член (туманные леса): 3.51 (0.09)	40.65 (<0.001)
Смешанные хвойно-широколиственные леса: 0.78 (0.09)	8.55 (<0.001)
Смешанные хвойно-широколиственные леса с участием фокиении: 1.28 (0.09)	13.84 (<0.001)
Кезиевые леса: 0.99 (0.10)	9.55 (<0.001)
Пойменные лиственные леса: 0.64 (0.10)	6.54 (<0.001)

Примечание. Z – параметр моделей. В скобках указана ошибка среднего (SE) с уровнем значимости 0.000.

участием фокиении ($109 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$) (рис. 2). Результаты обобщенной линейной модели показали достоверные отличия запасов КДО в разных БГЦ (табл. 4).

В национальном парке Бу Зя Мап статистически достоверных различий в вариабельности запасов КДО в зависимости от высоты над уровнем моря и положения в рельефе не выявлено. При относительно небольшом объеме выборки мы можем лишь с определенной долей вероятности назвать факторы, регулирующие объемы КДО в изучаемых низкогорных диптерокарповых лесах. Это может быть относительно равномерная скорость отпада древостоя и отмирания ветвей, а также относительно высокая скорость их разложения при активном участии термитов. Почти в три раза более высокие средние величины запасов КДО найдены в нескольких равнинных смешанных диптерокарповых лесах острова Борнео ($117 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$; Gale, 2000) и острова Суматра ($116 \text{ м}^3 \text{ га}^{-1}$; Yoneda et al., 1990). В другом исследовании для равнинных лесов острова Суматра объем КДО оценен в 28 га^{-1} (Meriem et al., 2016). Интересно, что при более низких высотах над уровнем моря (55–320 м над у. м. по сравнению с 387–737 м над у. м. в нашей работе) запасы КДО зависели от положения БГЦ в рельефе (Gale, 2000).

В горных лесах национального парка Бидуп-Нуйба более высокое разнообразие состава и структуры древесного яруса обуславливают более высокую вариабельность процессов отпада. Изучение качества КДО и их динамики в годы работ на территории парка Бидуп-Нуйба позволяют предположить их более низкую скорость разложения, чем в лесах Бу Зя Мапа. Ведущая роль в процессе ксилотиза в парке Бидуп-Нуйба принадлежит дереворазрушающим грибам, активность которых, возможно, варьирует в зависимости от сезона и древесной породы КДО. В результате происходит локальное накопление КДО.

Общий объем КДО и его вариабельность в лесах обоих национальных парков сравнимы с таковыми в коренных таежных ельниках европей-

ской части России с мелкоконтурной оконной динамикой (Shorohova et al., 2016).

Масса, проективное покрытие и размеры КДО

Масса КДО составила в среднем 24 т га^{-1} (29 и 15 т га^{-1} в лесах Бидуп-Нуйба и Бу Зя Мап соответственно) и линейно зависела от их объема (рис. 3а). Средние величины массы КДО сравнимы с таковыми в нескольких старовозрастных лесах островов Борнео (21.6 и 57.1 т га^{-1} ; Pfeifer et al., 2015) и Суматра (11 т га^{-1} ; Meriem et al., 2016; 39 т га^{-1} ; Yoneda et al., 1990). С позиций углеродного цикла важным отличием КДО коренных тропических лесов от таежных является более слабая связь массы с объемом КДО (Капица и др., 2012).

Проективное покрытие КДО изменялось от 32 до $1178 \text{ м}^2 \text{ га}^{-1}$, в среднем составляя $269 \text{ м}^2 \text{ га}^{-1}$ (рис. 3б). Таким образом, в изучаемых лесных экосистемах проективное покрытие КДО может достигать 12% площади поверхности, что указывает на значительную роль КДО в процессах почвообразования. Теснота связи между проективным покрытием и объемами КДО связана с существенной долей сухостоя и пней в их объеме.

Средний диаметр стволов КДО составил 26 см (30 и 24 см в лесах Бу Зя Мап и Бидуп-Нуйба соответственно). В таежной зоне средние диаметры КДО близки к таковым в муссонных тропических лесах. Средний диаметр КДО в ельниках средней тайги составил 24 см , в сосняках – 28 см , а в ельниках и сосняках северной тайги – 24 и 28 см , соответственно (Капица и др., 2012).

Структурное разнообразие КДО

Среди категорий субстрата преобладал валеж, составляя 42 и 31% в лесах Бидуп-Нуйба и Бу Зя Мап соответственно (рис. 4а). Особенностью древесного отпада в тропических лесах является отмирание отдельных ветвей живого дерева (Denslow, 1987; Кузнецов, 2003). Доля крупных ветвей в горных лесах Бидуп-Нуйба составила 8% , тогда как в низкогорных лесах Бу Зя Мап она достигла 33% объема КДО. В туманных лесах, где большинство дере-

Возрастание объёмов КДО

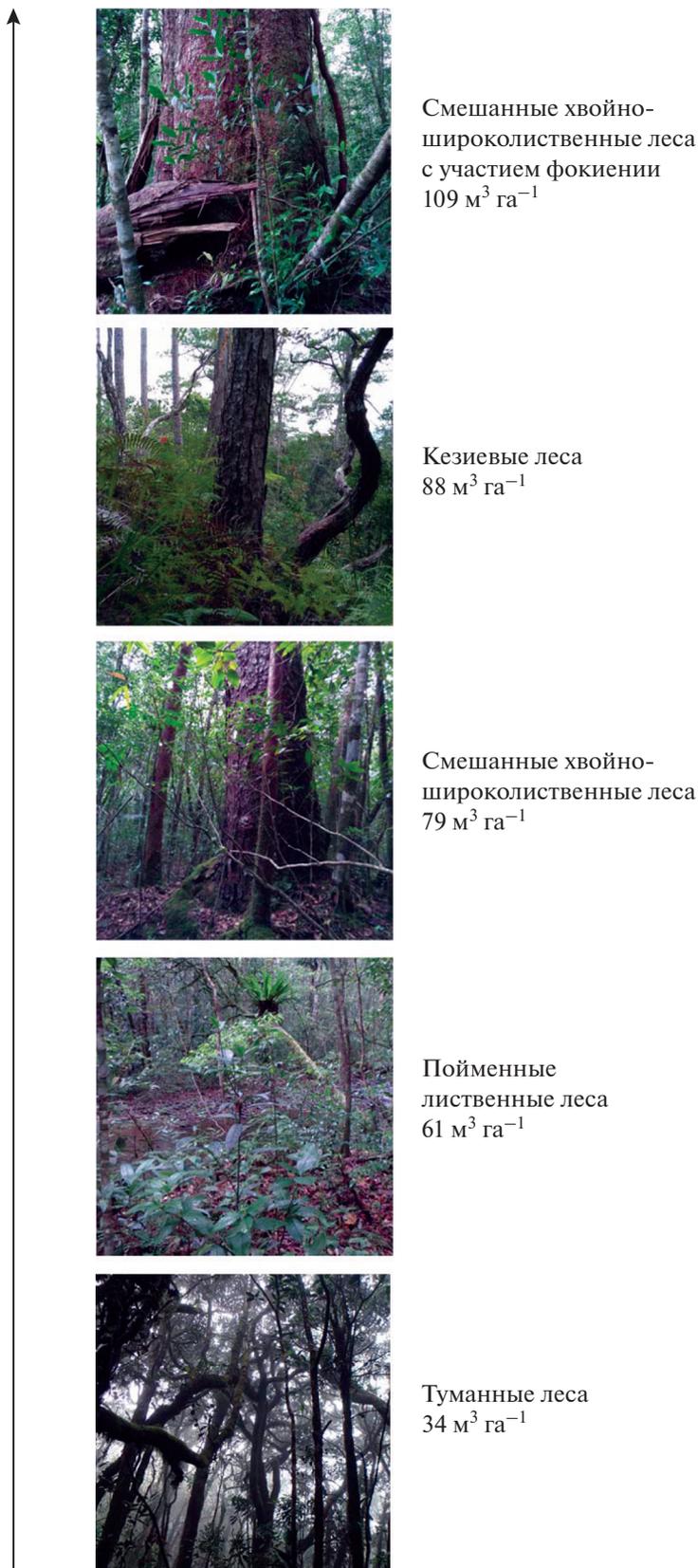


Рис. 2. Изменчивость средних запасов КДО в лесах национального парка Бидуп-Нуйба.

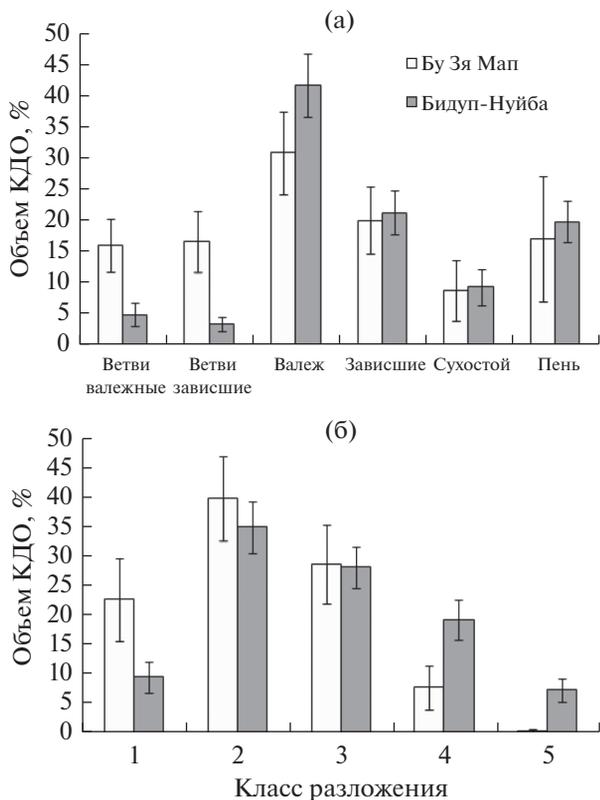


Рис. 4. Распределение объема КДО по категориям субстрата (а) и классам разложения (б). Приведены средние величины и стандартные ошибки.

Процент термитных ходов, частично заполненных почвой, по объему КДО в среднем составлял 32%. Объемная доля древесины, потребляемая термитами в КДО 1-го, 2-го, 3-го и 4-го классов разложе-

ния, составила в среднем 15, 32, 38 и 54% соответственно (рис. 5а). Доля древесины, потребляемая термитами, зависела от положения КДО и составляла в среднем 17% для зависших стволов и ветвей, 28% для пней и сухостоя и 49% для валежа и валежных ветвей (рис. 5б).

Микогенный ксиллолиз, т.е. разложение древесины, не потребленной термитами, в низкогорных высокоствольных диптерокарповых лесах Бу Зя Мапа проходил исключительно по типу коррозии, случаев деструкции не выявлено. Для изучения причин подобной закономерности необходим анализ видового состава ксилотрофных грибов и их ферментных комплексов. В полидоминантных горных лесах Бидуп-Нуйба ведущую роль в процессах биогенного ксиллолиза играют, по-видимому, деструктурирующие грибы. Активность беспозвоночных отмечена лишь на 3-х процентах исследуемых объектов, которые потребили в среднем 8% объема древесины. Преобладающая часть исследованных КДО (88%) были поражены белой гнилью, 8% – бурой и лишь у 4% встречались участки как белой, так и бурой гнили. Доминирование белой гнили подтверждает важность грибов в процессах деградации лигнина в тропических лесах (Fujii, 2014). Большинство грибов бурой гнили активно участвуют в разложении голосеменных, в то время как грибы белой гнили предпочитают разлагать покрытосеменные (Krah et al., 2018). На наших участках преобладали КДО покрытосеменных видов. Преобладание микогенного пути ксиллолиза над зоогенным в лесах Бидуп-Нуйба и высокая активность термитов, потребляющих КДО, в лесах Бу Зя Мапа, по-видимому, являются еще одной причиной почти двукратных различий

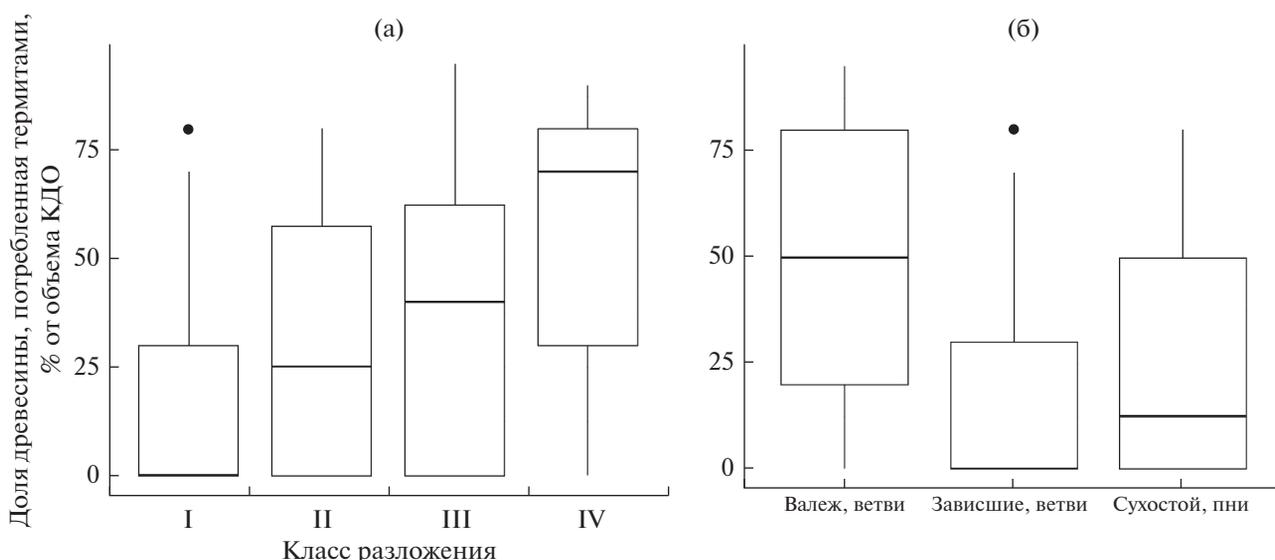


Рис. 5. Доля древесины, потребляемая термитами, в зависимости от класса разложения (а) и категории КДО (б). На графике показаны медианные, максимальные и минимальные значения.

в запасе КДО в двух изучаемых лесных массивах. Медленно разлагающиеся КДО в лесах Бидуп-Нуйба аккумулируются на более длительное время. Полученные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о том, что климат и породный состав древостоя определяют пути потери массы КДО в изучаемых тропических лесах Южного Вьетнама.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены сходства в запасах и размерах КДО в исследуемых муссонных тропических лесах Южного Вьетнама и в коренных таежных ельниках европейской части России с мелкоконтурной оконной динамикой. Преобладание валежа среди категорий КДО и близкая к колоколообразной форма распределения объема КДО по классам разложения дополняют сходство пула КДО тропических низкогорных и горных полидоминантных лесов и таежных разновозрастных ельников. Однако высокая доля ветвей в структуре КДО, в особенности в низкогорных листовенных полидоминантных лесах, отличает КДО тропических лесов от КДО лесов таежного и умеренного пояса.

Полученные результаты создают основу будущих исследований экосистемных функций КДО в муссонных тропических лесах Южного Вьетнама. Относительно высокие запасы КДО указывают на их значительную роль в круговороте основных биогенных элементов. Высокое структурное и породное разнообразие КДО создает множество различных экологических ниш, что позволяет предположить высокое разнообразие ксилотильных сообществ (сообществ, связанных с КДО на всех этапах их разложения). Достаточно высокое проективное покрытие КДО с разнообразными путями потери их массы – потребления беспозвоночными микогенного ксилолиза коррозионного и деструктивного типов определяют их существенную роль в почвообразовательных процессах.

Мы благодарим Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр за организацию полевых работ на территории национальных парков Бу Зя Мап и Бидуп-Нуйба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Горбунов Р.В., Горбунова Т.Ю., Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П., Лебедев Я.О., Нгуен Д.Н., Ву М. Особенности формирования элементов радиационного баланса среднегорных тропических лесов южного Вьетнама // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – Природного заповедника РАН. 2019. № 4(12). С. 3–16.

Замолодчиков Д.Г. Оценка пула углерода крупных древесных остатков в лесах России с учетом влияния пожаров и рубок // Лесоведение. 2009. № 4. С. 3–15.

Иванов А.В., Замолодчиков Д.Г., Лошаков С.Ю., Комин А.Э., Косинов Д.Е., Браун М., Грабовский В.И. Вклад крупных древесных остатков в биогенный цикл углерода хвойно-широколиственных лесов юга Дальнего Востока России. Лесоведение. 2020. № 4. С. 357–366.

Горбунов Р.В., Кузнецов А.Н., Лебедев Я.О., Горбунова Т.Ю., Котлов И.П., Хой Н.Д. О некоторых особенностях структуры и функционирования горных тропических лесных ландшафтов Центрального Вьетнама и необходимости создания ландшафтноэкологического стационара // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2018. № 3(7). С. 43–67.

Грабовский В.И., Замолодчиков Д.Г. Модели оценки запасов валежа по данным учетов на трансектах // Лесоведение. 2012. № 2. С. 66–73.

Капица Е.А., Шорохова Е.В., Кузнецов А.А. Пул углерода крупных древесных остатков в коренных лесах северо-запада Русской равнины // Лесоведение. 2012. № 5. С. 36–43.

Кузнецов А.Н. Тропический диптерокарповый лес: на примере сомкнутого высокоствольного влажного равнинного диптерокарпового леса массива Ма Да, Южный Вьетнам // РАН, Совместный российско-вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр (тропический центр). М.: ГЕОС, 2003. 138 с.

Лебедев Я.О., Горбунов Р.В., Горбунова Т.Ю., Кузнецов А.Н., Кузнецова С.П., Нгуен Т.В., Бобко Н.И., Капранов С.В. Некоторые особенности геохимических миграций в условиях соподчиненных ландшафтов среднегорных тропических лесов Южного Вьетнама // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – Природного заповедника РАН. 2019. № 3(11). С. 3–16.

Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесная пром-сть, 1976. 159 с.

Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Под ред. Заварзина Г.А. М.: Наука, 2007. 315 с.

Соловьев В.А. Микогенный ксилолиз, его экологическое и технологическое значение // Научные основы устойчивости лесов к дереворазрушающим грибам. М.: Наука, 1992. С. 140–171.

Стороженко В.Г. Древесный отпад в коренных лесах Русской равнины // М.: Тов-во КМК, 2011. 122 с.

Тетюхин С.В., Минаев В.Н., Богомолова Л.П. Лесная таксация и лесоустройство. Нормативно-справочные материалы по северо-западу РФ. Санкт-Петербург: ЛТА. 2004. 369 с.

Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.

Chambers J.Q., Higuchi N., Schimel J.P., Ferreira L.V., Melack J.M. Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon // Oecologia. 2000. V. 122. P. 380–388.

Clark D.B., Clark D.A., Brown S., Oberbauer S.F., Veldkamp E. Stocks and flows of coarse woody debris across a tropical rain forest nutrient and topography gradient // Forest Ecology and Management. 2002. V. 164. P. 237–248.

- Denslow J.S.* Tropical rainforest gaps and tree species diversity // Annual Review in Ecology and Systematics. 1987. V. 18. P. 431–451.
- Fujii K.* Soil acidification and adaptations of plants and microorganisms in Bornean tropical forests // Ecol Res. 2014. V. 29. P. 371–381.
- Gale N.* The aftermath of tree death: coarse woody debris and the topography in four tropical rain forests // Canadian J. Forest Research. 2000. V. 30. P. 1489–1493.
- Giardina C.P.* Advancing Our Understanding of Woody Debris in Tropical Forests. Ecosystems. 2019. V. 22. P. 1173–1175.
- Krah F.S., Bässler C., Heibl C., Soghigian J., Schaefer H., Hibbett D.S.* Evolutionary dynamics of host specialization in wood-decay fungi // BMC Evolutionary Biology. 2018. V. 18. 119 p.
- Lopes de Gerenyu V.O., Anichkin A.E., Avilov V.K., Kuznetsov A.N., Kurganova I.N.* Termites as a factor of spatial differentiation of CO₂ fluxes from the soils of monsoon tropical forests in southern Vietnam. Eurasian Soil Science. 2015. V. 48. № 2. P. 208–217.
- Magnússon R.I., Tietema A., Cornelissen J.H.C., Hefting M.M., Kalbitz K.* Tamm Review: Sequestration of carbon from coarse woody debris in forest soils // Forest Ecology and Management. 2016. V. 377. P. 1–15.
- Meriem S., Tjitrosoedirjo S., Kotowska M.M., Hertel D., Triadiati T.* Carbon and nitrogen stocks in dead wood of tropical lowland forests as dependent on wood decay stages and land-use intensity. Annals of Forest Research. 2016. V. 59. № 2. P. 299–310.
- Moroni M.T., Morris D.M., Shaw C., Stokland J.N., Harmon M.E., Fenton N.J., Merganicová K., Merganic J., Okabe K., Hagemann U.* Buried wood: a common yet poorly documented form of deadwood // Ecosystems. 2015. V. 18. P. 605–628.
- Palace M., Keller M., Hurtt G., Frohling S.* A review of above ground necromass in tropical forests. Tropical forests. 2012. P. 215–252.
- Pfeifer M., Lefebvre V., Turner E., Cusack J., Khoo M., Chey V.K., Peni M., Ewers R.M.* Deadwood biomass: an underestimated carbon stock in degraded tropical forests? Environmental Research Letters. 2015. V. 10. № 4. P. 044019.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2013.
- Russell M.B., Frayer S., Aakala T., Gove J.H., Woodall C.W., D'Amato A.W., Ducey M.J.* Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood: A review // Forest Ecology and Management. 2015. V. 350. P. 107–128.
- Shorohova E., Kapitsa E., Kuznetsov A., Kuznetsova S., Lopes de Gerenyu V., Kaganov V., Kurganova I.* Coarse woody debris density and carbon concentration by decay classes in mixed montane wet tropical forests // Biotropica. 2022 (в печати).
- Shorohova E., Kapitsa E.* The decomposition rate of non-stem components of coarse woody debris (CWD) in European boreal forests mainly depends on site moisture and tree species // European Journal of Forest Research. 2016. V. 135. P. 593–606.
- Shorohova E., Kapitsa E., Kazartsev I., Romashkin I., Polevoj A., Kushnevskaia H.* Tree species traits are the predominant control on the decomposition rate of tree log bark in a mesic old-growth boreal forest // Forest Ecology and Management. 2016. V. 377. P. 36–45.
- Shorohova E., Kapitsa E., Kuznetsov A., Kuznetsova S., Lopes de Gerenyu V., Kaganov V., Kurganova I.* Decay classes of coarse woody debris in a lowland Dipterocarp forest: implications for volume, density, and carbon estimates // Biotropica. 2021. V. 53. № 3. P. 879–887.
- Ståhl G., Ringvall A., Fridman J.* Assessment of coarse woody debris – a methodological overview // Ecological Bulletins. 2001. V. 49. P. 57–70.
- Stokland J.N., Siitonen J., Jonsson B.G.* Biodiversity in dead wood // Cambridge Univ. Press. 2012. 509 p.
- WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports. 2014. V. 106. Rome: FAO.
- Yoneda T., Tamin R., Ogino K.* Dynamics of aboveground big woody organs in a foothill dipterocarp forest, West Sumatra, Indonesia. Ecological Research. 1990. V. 5. № 1. P. 111–130.

Coarse Woody Debris in Monsoon Tropical Forests of Vietnam

Ye. A. Kapitsa^{1,*}, A. N. Kuznetsov^{4,5}, S. P. Kuznetsova^{4,5}, V. O. Lopes de Gerenyu⁶, V. V. Kaganov⁷, I. N. Kurganova⁶, Ye. V. Kushnevskaia^{1,8}, and Ye. V. Shorohova^{1,2,3}

¹Saint-Petersburg Forestry University, Institutskiy ln., 5, Saint-Petersburg, 194021 Russia

²Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the RAS, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, 185910 Russia

³Natural Resources Institute Finland (Luke), Latokartanonkaari, 9, Helsinki, FI-00790 Finland

⁴Vietnam-Russia Tropical Centre, Nguyen Van Huyen st., Nghia Do, Kaw Zai, Hanoi, Vietnam

⁵Severtsov institute of ecology and evolution, RAS, Leninsky ave., 33, Moscow, 119071 Russia

⁶Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Sciences, RAS, Institutskaya st., 2, Pushchino, Moscow Oblast, 142290 Russia

⁷Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

⁸Saint Petersburg State University, Universitetskaya emb., 7–9, Saint Petersburg, 199034 Russia

*E-mail: kapitsa@list.ru

For tropical forests, especially for the forest ecosystems of Southeast Asia, there are only fragmentary estimates of coarse woody debris (CWD) pools and their dynamics. This study examines the stocks and structural

diversity of CWD in forests not affected by commercial felling in the territories of the Bidoup Núi Bà and Bù Gia Mập National Parks of the Republic of Vietnam. In the low-mountain Dipterocarp forests of Bù Gia Mập National Park, the average stock of CWD was almost two times lower than the average stock in the polydominant mountain forests of Bidoup Núi Bà: $44 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ versus $78 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. The mass of CWD depended linearly on their volume and averaged 24 t ha^{-1} . The projective cover of CWD averaged $269 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Snags prevailed among the substrate categories, accounting for 42 and 31% in the Bidoup Núi Bà and Bù Gia Mập forests, respectively. The proportion of large branches in the mountain forests of Bidoup Núi Bà National Park was 8%, while in the low mountain forests of Bù Gia Mập it reached 33% of the CWD volume. Very high termite activity was noted in the Bù Gia Mập National Park – in 73% of the studied CWD items. The percentage of termite tunnels partially filled with soil was, on average, 32% of the CWD volume. The high projective cover of CWD with various types of mass loss: consumption by invertebrates, white- and brown-rot mycogenic decay suggests a significant role of CWD in the soil-forming processes. Similarities were revealed in the stocks and sizes of CWD in the studied monsoon tropical forests of South Vietnam and in the primary spruce taiga forests of the European part of Russia with fine-scale gap dynamics. The predominance of snags among the CWD categories and the nearly bell-shaped distribution of the CWD volume by decay classes complement the similarity of the CWD pool in tropical low-mountain and mountainous polydominant forests with uneven-aged spruce taiga forests. However a high proportion of branches in the structure of CWD, especially in low-mountain deciduous polydominant forests distinguishes the CWD in tropical forests from the CWD in boreal and temperate forests.

Keywords: woody detritus, logs, deadwood, snags, fallen branches, decay, fragmentation, decomposition, termites.

Acknowledgements: The study has been conducted within the framework of State contracts with the Forest Research Institute, Karelian Research Centre of the RAS and the Pushchino Scientific Centre of the RAS.

REFERENCES

- Chambers J.Q., Higuchi N., Schimel J.P., Ferreira L.V., Melack J.M., Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon, *Oecologia*, 2000, Vol. 122, pp. 380–388.
- Clark D.B., Clark D.A., Brown S., Oberbauer S.F., Veldkamp E., Stocks and flows of coarse woody debris across a tropical rain forest nutrient and topography gradient, *Forest Ecology and Management*, 2002, Vol. 164, pp. 237–248.
- Denslow J.S., Tropical rainforest gaps and tree species diversity, *Annual Review in Ecology and Systematics*, 1987, Vol. 18, pp. 431–451.
- Fujii K., Soil acidification and adaptations of plants and microorganisms in Bornean tropical forests, *Ecol Res.*, 2014, Vol. 29, pp. 371–381.
- Gale N., The aftermath of tree death: coarse woody debris and the topography in four tropical rain forests, *Canadian J. Forest Research*, 2000, Vol. 30, pp. 1489–1493.
- Giardina C.P., Advancing Our Understanding of Woody Debris in Tropical Forests, *Ecosystems*, 2019, Vol. 22, pp. 1173–1175.
- Gorbunov R.V., Gorbunova T.Y., Kuznetsov A.N., Kuznetsova S.P., Lebedev Y.O., Nguen D.N., Vu M., Osobennosti formirovaniya elementov radiatsionnogo balansa srednegornykh tropicheskikh lesov yuzhnogo V'etnama (Peculiarities of formation of radiation balance elements in the mid-mountain tropical forests of Southern Vietnam), *Trudy Karadagskoi nauchnoi stantsii imeni T.I. Vyazemskogo – Prirodnogo zapovednika RAN*, 2019, No. 4(12), pp. 3–16.
- Gorbunov R.V., Kuznetsov A.N., Lebedev Y.O., Gorbunova T.Y., Kotlov I.P., Khoi N.D., O nekotorykh osobennostyakh struktury i funktsionirovaniya gornykh tropicheskikh lesnykh landshaftov Tsentral'nogo V'etnama i neobkhodimosti sozdaniya landshaftnoekologicheskogo statsionara (About some peculiarities of structure and functioning of mountain tropical forest landscapes of Central Vietnam and necessity of creation of landscape-ecological stationary), *Trudy Karadagskoi nauchnoi stantsii im. T.I. Vyazemskogo – prirodnogo zapovednika RAN*, 2018, No. 3(7), pp. 43–67.
- Grabovskii V.I., Zamolodchikov D.G., Modeli otsenki zapasov valezha po dannym uchetov na transektakh (Models of estimating the stocks of fallen logs according to data obtained on transects), *Lesovedenie*, 2012, No. 2, pp. 66–73.
- Ivanov A.V., Zamolodchikov D.G., Loshakov S.Y., Komin A.E., Kosinov D.E., Braun M., Grabovskii V.I., Vklad krupnykh drevesnykh ostatkov v biogenniy tsikl ugleroda khvoino-shirokolistvennykh lesov yuga Dal'nego Vostoka Rossii (Coarse woody debris contribution into a biogenic carbon cycle in coniferous-deciduous forests of the southern regions of Russian Far East), *Lesovedenie*, 2020, No. 4, pp. 357–366.
- Kapitsa E.A., Shorohova E.V., Kuznetsov A.A., Pul ugleroda krupnykh drevesnykh ostatkov v korennykh lesakh severo-zapada Russkoi ravniny (Carbon pool of coarse woody debris in primeval forests of the Northwestern Russian Plain), *Lesovedenie*, 2012, No. 5, pp. 36–43.
- Krah F.S., Bässler C., Heibl C., Soghigian J., Schaefer H., Hibbett D.S., Evolutionary dynamics of host specialization in wood-decay fungi, *BMC Evolutionary Biology*, 2018, Vol. 18, 119 p.
- Kuznetsov A.N., *Tropicheskii dipterokarpovyi les: na primere somknutogo vysokostvol'nogo vlazhnogo ravninnogo dipterokarpovogo lesa massiva Ma Da, Yuzhnyi V'etnam* (Tropical Dipterocarp forest: a closed-canopy moist lowland Dipterocarp forest landscape Ma Da, South Vietnam), Moscow: GEOS, 2003, 138 p.
- Lebedev Y.O., Gorbunov R.V., Gorbunova T.Y., Kuznetsov A.N., Kuznetsova S.P., Nguen T.V., Bobko N.I., Kapranov S.V., Nekotorye osobennosti geokhimicheskikh migratsii v usloviyakh sopolochinennykh landshaftov srednegornykh tropicheskikh lesov Yuzhnogo V'etnama (Peculiarities of formation of radiation balance elements in the mid-mountain tropical forests of Southern Vietnam), *Trudy Karadagskoi nauchnoi stantsii im. T.I. Vyazemskogo – Prirodnogo zapovednika RAN*, 2019, No. 3(11), pp. 3–16.
- Lopes de Gerenyu V.O., Anichkin A.E., Avilov V.K., Kuznetsov A.N., Kurganova I.N., Termites as a factor of spatial differentiation of CO₂ fluxes from the soils of mon-

- soon tropical forests in southern Vietnam, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 2, pp. 208–217.
- Magnússon R.I., Tietema A., Cornelissen J.H.C., Hefting M.M., Kalbitz K., Tamm Review: Sequestration of carbon from coarse woody debris in forest soils, *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 377, pp. 1–15.
- Meriem S., Tjitrosoedirjo S., Kotowska M.M., Hertel D., Triadiati T., Carbon and nitrogen stocks in dead wood of tropical lowland forests as dependent on wood decay stages and land-use intensity, *Annals of Forest Research*, 2016, Vol. 59, No. 2, pp. 299–310.
- Moroni M.T., Morris D.M., Shaw C., Stokland J.N., Harmon M.E., Fenton N.J., Merganicová K., Merganic J., Okabe K., Hagemann U., Buried wood: a common yet poorly documented form of deadwood, *Ecosystems*, 2015, Vol. 18, pp. 605–628.
- Palace M., Keller M., Hurtt G., Frolking S., A review of above ground necromass in tropical forests, *Tropical forests*, 2012, pp. 215–252.
- Pfeifer M., Lefebvre V., Turner E., Cusack J., Khoo M., Chey V.K., Peni M., Ewers R.M., Deadwood biomass: an underestimated carbon stock in degraded tropical forests?, *Environmental Research Letters*, 2015, Vol. 10, No. 4, pp. 044019.
- Poluboyarinov O.I., *Plotnost' drevesiny* (The density of wood), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1976, 159 p.
- Puly i potoki ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii*, (Pools and fluxes of carbon in terrestrial ecosystems of Russia), Moscow: Nauka, 2007, 315 p.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2013.
- Russell M.B., Fraver S., Aakala T., Gove J.H., Woodall C.W., D'Amato A.W., Ducey M.J., Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood: A review, *Forest Ecology and Management*, 2015, Vol. 350, pp. 107–128.
- Shein E.V., *Kurs fiziki pochv* (The course on soil physics), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 2005, 432 p.
- Shorohova E., Kapitsa E., Kazartsev I., Romashkin I., Polevoj A., Kushnevskaya H., Tree species traits are the predominant control on the decomposition rate of tree log bark in a mesic old-growth boreal forest, *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 377, pp. 36–45.
- Shorohova E., Kapitsa E., Kuznetsov A., Kuznetsova S., Lopes de Gerenuy V., Kaganov V., Kurganova I., Coarse woody debris density and carbon concentration by decay classes in mixed montane wet tropical forests, *Biotropica*, 2022 (in press).
- Shorohova E., Kapitsa E., Kuznetsov A., Kuznetsova S., Lopes de Gerenuy V., Kaganov V., Kurganova I., Decay classes of coarse woody debris in a lowland Dipterocarp forest: implications for volume, density, and carbon estimates, *Biotropica*, 2021, Vol. 53, No. 3, pp. 879–887.
- Shorohova E., Kapitsa E., The decomposition rate of non-stem components of coarse woody debris (CWD) in European boreal forests mainly depends on site moisture and tree species, *European J. Forest Research*, 2016, Vol. 135, pp. 593–606.
- Solov'ev V.A., Mikogennyi ksiloliz, ego ekologicheskoe i tekhnologicheskoe znachenie (Mycogenic xylolysis, its ecological and technological importance), In: *Nauchnye osnovy ustoychivosti lesov k derevorazrushayushchim gribam* (Scientific grounds of forest resistance to wood-decaying fungi), Moscow: Nauka, 1992, pp. 140–171.
- Ståhl G., Ringvall A., Fridman J., Assessment of coarse woody debris – a methodological overview, *Ecological Bulletins*, 2001, Vol. 49, pp. 57–70.
- Stokland J.N., Siitonen J., Jonsson B.G., Biodiversity in dead wood, Cambridge Univ. Press., 2012, 509 p.
- Storozhenko V.G., *Drevesnyi otpad v korenykh lesakh Russkoi ravniny* (Woody debris in primary forests of the East European plain), Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2011, 122 p.
- Tetyukhin S.V., Minaev V.N., Bogomolova L.P., *Lesnaya taksatsiya i lesoustroistvo. Normativno-spravochnye materialy po severo-zapadu RF* (Forest mensuration and forest management. Regulatory and reference materials for the northwest of the Russian Federation), Saint Petersburg: LTA, 2004, 369 p.
- WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014*, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, World Soil Resources Reports, 2014, Vol. 106, Rome: FAO.
- Yoneda T., Tamin R., Ogino K., Dynamics of aboveground big woody organs in a foothill dipterocarp forest, West Sumatra, Indonesia. *Ecological Research*, 1990, Vol. 5, No. 1, pp. 111–130.
- Zamolodchikov D.G., Otsenka pula ugleroda krupnykh drevesnykh ostatkov v lesakh Rossii s uchetom vliyaniya pozharov i rubok (An estimate of the carbon pool of coarse woody debris in forests of Russia with fire and cuts impact included), *Lesovedenie*, 2009, No. 4, pp. 3–15.

УДК 630*116.64:630*114.4462

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА ВЫСОХШЕМ ДНЕ АРАЛЬСКОГО МОРЯ¹

© 2022 г. Н. Ж. Бакиров^a, З. Б. Новицкий^{a, *}, А. Х. Хамзаев^a

^aНаучно-исследовательский институт лесного хозяйства,
п. Дархан, Ташкентский район, Ташкентская область, 111104 Узбекистан

*E-mail: zinoviy.novitskiy@mail.ru

Поступила в редакцию 29.10.2020 г.

После доработки 25.12.2020 г.

Принята к публикации 01.12.2021 г.

Высохшее дно Аральского моря представляет собой общепланетарную проблему, так как из него выносятся миллионы тонн солей, пыли и песка, которые оседают на растения и наносят ущерб всему живому в Приаралье. Разработаны методы лесомелиоративного освоения засоленных типов донных отложений путем нарезки песконакопительных борозд, установки песконакопительной механической защиты из тростника, а также пескозадерживающих деревянных или пластмассовых решеток. Эффективность песконакопительных борозд, нарезанных канавокопателем со щелевателем, высокая, поскольку на второй год после посадки семян, их сохранность составляет 85%, в борозде без применения щелевателя – 52%, а на контрольном участке без песконакопительных борозд лишь 12%. Следовательно, прежде чем проводить посадку семян на засоленных землях, сначала надо накопить песок, влагу и улучшить химический и гранулометрический состав навейного субстрата.

Ключевые слова: песконакопительная борозда, канавокопатель, щелеватель, пескозадерживающая решетка, механическая защита, перенос песка, эффективность, сульфитоспиртовая барда, поливинилацетатная эмульсия.

DOI: 10.31857/S0024114822020024

В глобальном масштабе ключевыми проблемами, угрожающими природным ресурсам и устойчивости систем жизнеобеспечения, являются деградация почвы, опустынивание, нехватка воды и потеря биоразнообразия (Welt im Wandel, 1996). Опустынивание как концепция впервые обсуждалась европейскими и американскими учеными в 1949 г. с точки зрения увеличения подвижности песков, высыхания, наступления пустыни, а также формирования искусственных пустынь. Согласно Конвенции Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием, опустынивание – это деградация земель в засушливых, полусухих и влажных районах в результате различных факторов, включая климатические колебания и человеческую деятельность (United Nations ..., 1997). Во многих странах было предпринято множество попыток оценить масштабы, характер и скорость опустынивания на глобальном, региональном и местном уровнях (Thomas, 1997). В 1990-х гг. западный мир узнал об экологической катастрофе, связанной с некогда чет-

вертым по величине озером в мире – Аральским морем: резкое иссушение водоема привело к интенсивному развитию процессов опустынивания в регионе и образованию новой пустыни – Аралкум (Indoitu et al., 2015).

Осушенное дно Аральского моря – объект развития типичных эоловых солончаковых пустынь аридной зоны (Новицкий, 2015). Оно вместе с Приаральем является огромной территорией, где происходит интенсивное опустынивание антропогенного характера. На осушенном дне имеются солончаки, не поддающиеся лесомелиоративному освоению, но их можно локализовать лесными насаждениями и, тем самым, существенно уменьшить дефляционные процессы (Боровков и др., 2017). На засоленных почвах с выходом на поверхность слабозасоленных участков можно создавать очаги лесонасаждений, а от них уже распространится семенное возобновление. На почвогрунтах со слабым засолением возможно применение массивного лесоразведения, а в более благоприятных лесорастительных условиях целесообразно создавать насаждения по принципу пастбищезащитного и мелиоративно-кормового лесоразведения, используя посадочный материал, выра-

¹ Работа выполнена при поддержке проектов КХА-7-026-2015 и КХ-А-КХ-2018-110 Министерства инновационного развития Республики Узбекистан.

щенный в лесных питомниках Приаралья (Боровков и др., 2014).

В процессе исторического развития мировой лесомелиоративной науки накоплен большой опыт по борьбе с подвижными песками. Работы по закреплению песков на территории пустынь в государствах нынешнего СНГ насчитывают вековую историю. Первые сведения по борьбе с подвижными песками, появившиеся в официальных источниках, относятся к 80-м годам позапрошлого столетия. В дальнейшем начали проводиться посев семян древесных, кустарниковых и травянистых растений механическим методом для закрепления подвижных песков. Накопленный отечественный опыт лесомелиоративных работ успешно используется в других странах мира, таких как Иран, Афганистан, Индия, в странах Африки и т.д. (Новицкий, 2018). Геоботанические и почвенные исследования на осушенном дне с составлением карты эрозионных рисков были проведены под руководством проф. В.А. Духовного в начале этого столетия (Духовный и др., 2008).

Лесные насаждения аридной зоны выполняют огромную противозерозионную роль. Они защищают легкие пустынные почвы от ветровой эрозии, предохраняют народнохозяйственные объекты от песчаных заносов и дефляции, улучшают микроклимат, создают благоприятные условия для лучшего роста и развития трав и полукустарников, повышая тем самым продуктивность пустынных и полупустынных пастбищ (Новицкий, 2016).

Лесомелиоративная наука располагает многими приемами создания лесных насаждений. Однако не все они результативны. Одним из наиболее распространенных методов для глинистых и суглинистых почв является создание лесных насаждений по песконакопительным бороздам, выполненным канавокопателем со щелевателем, на засоленных почвогрунтах – установка песконакопительной механической защиты из тростника (*Phragmites australis*) различной модификации (клеточные, стоячие, полустоячие) и пескозадерживающих решеток размером 150 × 120 см. Подобные работы в мировой практике на дне высохшего моря проводятся впервые (Боровков и др., 2016).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Вопросами лесомелиоративного освоения засоленных почвогрунтов на осушенном дне Аральского моря никто не занимался, а их площадь составляет около 1 млн га. Основные экспериментальные работы нами были начаты в 1995 г., и продолжаются по сей день в рамках различных государственных и международных проектов (Новицкий, 2017).

Объектами исследований служили суглинистые и глинистые засоленные типы донных отло-

жений. Методами их лесомелиоративного освоения являлась нарезка песконакопительных борозд канавокопателем со щелевателем, установка песконакопительной механической защиты из тростника и деревянных многоразовых пескозадерживающих решеток. Все работы проводились путем закладки экспериментов в полевых условиях в 10-кратной повторности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим результаты проведенных многолетних исследований на суглинистых и глинистых засоленных типах донных отложений осушенного дна Аральского моря. Данные типы донных отложений имеют разный химический и гранулометрический состав (табл. 1, 2). Поэтому и подход к их лесомелиоративному освоению разный. Как следует из химического анализа, первый участок относится к категории сильно засоленных, а по гранулометрическому составу к суглинкам (табл. 1). Второй участок относится к категории средnezасоленных, а по гранулометрическому составу к глинам (табл. 2). Как на первом, так и на втором участках количество гумуса и калия в верхнем корнеобитаемом слое 0–10 см низкое, что не дает возможность растениям хорошо развиваться.

Нами разработаны перечисленные ниже методы создания лесных насаждений в зависимости от химического и гранулометрического состава типов донных отложений осушенного дна Аральского моря.

Нарезка песконакопительных борозд. Песконакопительные борозды (рис. 1) нарезали весной на глубину 40 см орудием для нарезки борозд со щелевателем (рис. 2) конструкции лаборатории защитного лесоразведения и лесомелиорации НИИ лесного хозяйства (Новицкий, 2018). Одновременно с нарезкой борозды с помощью щелевателя формировали щель на глубину 40 см. На втором варианте нарезались такие же песконакопительные борозды, но без щелевателя. Как первая, так и вторая борозды за 1–2 мес. полностью были занесены песком, практически не засоленным. Физический смысл первого варианта заключался в том, что влага за счет зимне-весенних осадков собиралась в борозде и проникала в щель, образуя резервуар влаги, которую растение могло употреблять в течении всего вегетационного периода. Во втором варианте влага собиралась в борозде глубиной 40 см. На эту же глубину летом при 50 градусной жаре песок полностью пересыхал, и соответственно высыхала вся влага в отличие от первого варианта, где основная влага была собрана в имеющейся щели.

Так как саксаул имеет глубокую корневую систему, он употребляет влагу, накопившуюся в ще-

Таблица 1. Результаты химических анализов водной вытяжки из почвогрунтов осушенного дна Аральского моря

№	Вид грунта	Слой, см	Сухой остаток, %	Общая HCO_3^- , %		SO_4^{2-} , %	Ca^{2+} , %	Mg^{2+} , %	$\text{Na}^+ \text{K}^+$ по разности, %	Сумма компонентов, %	pH
				мг-экв	мг-экв						
1	Лёгкий суглинок	0–10	1.936	0.036	0.142	1.128	0.281	0.097	0.140	1.824	7.95
				0.6	4.0	23.5	14.0	8.0	6.1		
2	Суглинок	10–20	2.256	0.110	0.142	1.272	0.180	0.128	0.294	2.126	8.12
				1.8	4.0	26.5	9.0	10.5	12.8		
3	Супесь	20–40	0.698	0.012	0.124	0.324	0.030	0.042	0.125	0.657	8.38
				0.2	3.5	6.75	1.5	3.5	5.45		
4	Супесь	40–60	0.265	0.029	0.064	0.086	0.022	0.022	0.027	0.250	8.45
				0.48	1.8	1.8	1.1	1.8	1.18		
5	Супесь	60–80	0.396	0.024	0.057	0.187	0.028	0.029	0.048	0.373	8.52
				0.4	1.6	3.9	1.4	2.4	2.1		
6	Глина	0–10	1.009	0.043	0.071	0.552	0.125	0.027	0.131	0.949	8.13
				0.7	2.0	11.5	6.25	2.25	5.7		
7	Глина	10–20	0.219	0.027	0.064	0.053	0.026	0.012	0.024	0.206	8.38
				0.44	1.8	1.1	1.3	1.0	1.04		
8	Глина	20–40	0.651	0.024	0.071	0.331	0.026	0.024	0.138	0.614	8.42
				0.4	2.0	6.9	1.3	2.0	6.0		
9	Серый песок	40–60	0.303	0.024	0.043	0.130	0.018	0.007	0.064	0.286	8.57
				0.4	1.2	2.7	0.9	0.6	2.8		
10	Серый песок	60–80	0.512	0.037	0.053	0.252	0.030	0.027	0.083	0.482	8.55
				0.6	1.5	5.25	1.5	2.25	3.6		

Примечание. В числителе – % по массе от высушенной почвы, в знаменателе – мг-экв. на 100 г. высушенной почвы.

Таблица 2. Содержание питательных веществ в почвогрунтах осушенного дна Аральского моря

№	Слой, см	Сухой остаток, %	Сумма солей, %	P_2O_5 , мг кг ⁻¹	К, мг кг ⁻¹	N, %	Гумус, %	Содержание в сравнении с нормативами			
								P_2O_5	К	N	гумус
Суглинистые типы донных отложений											
1	0–10	1.936	1.824	85	92.0	0.15	1.03	Высокое	Низкое	Среднее	Среднее
2	10–20	2.256	2.126	95	45.15	0.15	0.30	Высокое	Низкое	Среднее	Низкое
3	20–40	0.698	0.657	105	13.14	0.15	0.14	Высокое	Низкое	Среднее	Низкое
4	40–60	0.265	0.250	85	14.21	0.15	0.41	Высокое	Низкое	Среднее	Низкое
5	60–80	0.396	0.373	95	2.17	0.15	0.34	Высокое	Низкое	Среднее	Низкое
Глинистые типы донных отложений											
1	0–10	1.009	0.949	90	120.64	0.20	0.62	Высокое	Низкое	Среднее	Низкое
2	10–20	0.219	0.206	80	120.64	0.20	0.97	Высокое	Низкое	Среднее	Низкое
3	20–40	0.651	0.614	75.12	120.64	0.20	0.68	Высокое	Низкое	Среднее	Низкое
4	40–60	0.303	0.286	71.2	120.64	0.20	0.24	Высокое	Низкое	Среднее	Низкое
5	60–80	0.512	0.482	75.12	120.64	0.20	0.19	Высокое	Низкое	Среднее	Низкое

ли. Во втором варианте саксаул испытывает серьезную нехватку влаги, что приводит к гибели растения (Бакиров и др., 2019). Исследования показали, что на второй год после посадки сеянцев в

борозду, подготовленную с использованием шелевателя, сохранность их составляет 85% (высота растения 95 см и диаметр кроны 110 см), а в борозде, где не была проделана щель сохранность со-



Рис. 1. Песконакопительная борозда.

ставила 52% (высота растения 51 см, диаметр кроны 64 см), при этом на контрольном участке сохранность составила 12% (высота растения 37 см, диаметр кроны 46 см). Исследования позволили установить, что если в других случаях влага находится в верхних горизонтах и летом она испаряется, что приводит к частичной гибели растений, то в разработанной нами технологии с использованием шелевателя влага будет доступной для растений на протяжении всего вегетационного периода, и ее в 2–3 раза больше. Хорошие результаты показала посадка семян тамарикса в песконакопительные борозды, где приживаемость составила 82,7% и через 3–4 г. это будут высокопродуктивные лесные насаждения (рис. 3). Учитывая то, что тамарикс является хорошим медоносом (с 1 га цветущих насаждений можно заготовить 50 кг меда), на площади в несколько тысяч гектар лесхозы могут развивать пчеловодство. Саксаул в возрасте 5 лет вступает в стадию плодоношения. Семена под воздействием ветра будут распространяться по всей территории и защитят ее от возникновения дефляционных процессов. Данный способ показал результативность и высокую приживаемость семян саксаула и тамарикса, высаженных в песконакопительные борозды.

Песконакопительная механическая защита из тростника. Суть работы заключалась в том, чтобы с помощью искусственных препятствий, представленных механической защитой из тростника, на засоленных землях задержать и накопить песок. С этой целью нами разработана технология, заключающаяся в установке пескозадерживающей механической защиты из тростника, установленной осенью. Расстояние между рядами продольных рядов защиты 5 м, а при применении клеточной защиты размер клеток составил 3 × 3 м. К весне произошло накопление песка, а в зимний период за счет снега было обеспечено его промывание и накопление влаги. Мощность навешанного слоя песка составила 60–100 см. Весной на навешанном песке была проведена посадка семян саксаула (*Haloxylon aphyllum*), тамарикса (*Tamarix pentandra*), соляноколосника Беланже (*Halostahus belangeriane*) и кандыма (*Galligonum caput-medusae*). Учет приживаемости семян, проведенный в мае, показал, что явное преимущество имелось за полустоячей тростниковой защитой, где приживаемость семян саксаула составила 59%, тамарикса 56%, соляноколосника Беланже 57% и кандыма 31% (табл. 3). На песках, где механической защиты не было, приживаемость семян



Рис. 2. Орудие для нарезки песконакопительных борозд со щелевателем.



Рис. 3. Однолетние посадки семян тамариска по песконакопительным бороздам.

Таблица 3. Приживаемость сеянцев (% от густоты при посадке) древесных и кустарниковых пород в зависимости от вариантов опыта на засоленных почвогрунтах

Вариант опыта	Порода	Весна (май) 2016 г.	Лето (июль) 2016 г.	Осень	
				2016 г.	2017 г.
Песконакопительная борозда	Саксаул	38 ± 1.1	5	3	1
	Тамарикс	46 ± 1.4	11	8	4
	Соляноколосник	43 ± 1.3	8	6	3
Пескозадерживающие деревянные щиты	Саксаул	47 ± 1.5	0	0	0
	Тамарикс	51 ± 1.7	4	3	0
	Соляноколосник	45 ± 1.5	2	2	0
Полустоячие механические защиты из тростника	Кандым	34 ± 1.1	0	0	0
	Саксаул	59 ± 2.1	52 ± 1.2	40 ± 1.1	36 ± 1.0
	Тамарикс	56 ± 2.0	51 ± 1.1	45 ± 1.1	41 ± 1.1
Стоячие механические защиты из тростника	Соляноколосник	57 ± 2.3	47 ± 1.3	46 ± 1.2	32 ± 1.0
	Кандым	53 ± 2.0	40 ± 1.1	37 ± 1.0	35 ± 0.9
	Саксаул	52 ± 1.7	40 ± 1.1	34 ± 1.0	30 ± 0.8
	Тамарикс	51 ± 1.4	42 ± 1.0	22 ± 1.1	20 ± 1.0
	Соляноколосник	43 ± 1.5	41 ± 1.2	23 ± 1.4	21 ± 1.1
	Кандым	52 ± 1.4	38 ± 1.4	32 ± 1.4	28 ± 1.1

составила 6–11%. Повторный учет, проведенный в сентябре, показал, что сохранность сеянцев в вышеупомянутом варианте опыта у саксаула составила 40%, тамарикса 45%, соляноколосника 46% и кандыма 17%, а на контроле, где не была установлена механическая защита и не было накопленного песка, сохранился лишь соляноколосник с приживаемостью 10%, остальные сеянцы не выдержали засоления и погибли. Следовательно, прежде чем проводить посадку сеянцев на засоленных землях, сначала надо накопить песок и влагу, улучшить химический и гранулометрический состав навейного субстрата с помощью механической защиты из тростника, потом уже проводить посадку сеянцев (Новицкий, 2013). При соблюдении упомянутых научных рекомендаций могут быть созданы хорошие насаждения саксаула, полученные путем посадки сеянцев по навейному песку вдоль пескозадерживающей механической защиты (рис. 4).

Установка пескозадерживающих решеток. Одним из методов накопления песка на засоленных землях может являться установка переносных деревянных или пластмассовых решеток размером 150 × 120 см с ячейками 5 × 5 см. На 1 га устанавливают 25–30 таких решеток, которые накапливают песок в виде песчаного шлейфа. После накопления песка решетки снимаются и устанавливаются на другое место, а на месте накопленного песка со шлейфом в длину более 200 см и высотой 100 см производят закрепление песка химическими фиксаторами или с помощью механической защиты с расстоянием между рядами 0.5 м с последующей посадкой солеустойчивых растений. Этот метод хорош тем, что применяемые решетки переносные и многоразового использования и их

можно устанавливать в разные места на засоленных землях, таким образом, образуя куртины насаждений. На 4-й год после вступления растений в фазу плодоношения под воздействием ветра семена распространились по всей территории накопленного грунта и произошло естественное семенное возобновление в количестве 5–7 шт. м⁻², а через 7 лет вся засоленная площадь была полностью облесена.

Осенью 2015 г. была проведена нарезка песконакопительных борозд, установлены деревянные песконакопительные решетки и механическая защита из тростника. К началу зимы на всех вариантах опыта произошло накопление песка, а в зимний период за счет накопления снега – его промывание. То есть к весне следующего года (2016 г.) навейный песок имел уже значительно меньшее засоление, чем на контрольном участке, поэтому был пригоден для проведения посадочных работ. Весной 2016 г. была проведена посадка сеянцев саксаула, кандыма, тамарикса, соляноколосника Беланже. Результаты учетов показали, что в весенний период приживаемость сеянцев имела во всех вариантах с преимуществом у полустоячей механической защиты. К лету 2017 г., когда была сильная жара и песок нагревался до 60°C и более, в песконакопительных бороздах тамарикс, саксаул и соляноколосник Беланже имели приживаемость лишь 5–11% (весной 42%). В песке, накопленном вблизи от полустоячей механической защиты, приживаемость посаженных сеянцев составила 48% (первоначальная 56%), а к осени 2017 г. 36% (табл. 3). Таким образом, установлено, что из различных вариантов преимущество остается за стоячей и полустоячей пескозадерживающей защитой из тростника.



Рис. 4. Приживаемость семян саксаула вдоль пескозадерживающей защиты из тростника.

Исследования на бывшем заливе Рыбацкий показали, что лучшие результаты при облесении засоленных почвогрунтов выявлены в эксперименте с нарезкой песконакопительных борозд, после запесочивания которых произведена посадка семян. Контролем служил участок (целина), где никакие агротехнические мероприятия не проводились. Общая приживаемость семян саксаула составила $56.0 \pm 4.96\%$, а на контрольном участке $22.0 \pm 5.86\%$. Коэффициент различия между первым и вторым вариантами показал, что разница существенна и преимущество остается за вариантом с посадкой семян в песконакопительные борозды.

На Акпеткинском архипелаге, где бывшее дно было засолено, нами установлена полустоячая механическая защита из тростника, которая накопили с наветренной стороны песок глубиной 50–60 см. По гребню вторичных песков была проведена посадка саксаула, гребенщика и соляноколосника. Определено, что семена саксаула имели приживаемость $60.24 \pm 2.20\%$, тамарикса 64.6 ± 2.04 и соляноколосника Беланже $67.23 \pm 2.04\%$, в то время как на контрольном участке приживаемость упомянутых пород составила 17.54 ± 1.71 , 30.79 ± 2.10 и $36.51 \pm 2.17\%$ соответственно. Следовательно, посадку семян для большей результативности необходимо проводить по навечно-

му песку вдоль полустоячей механической защиты из тростника.

Коэффициент различия между вариантом, где установлена полустоячая песконакапливающая защита и контролем высок ($t = 9.5–15.2\%$), что свидетельствует о существенности различия и достоверности полученного материала. Результаты исследований показывают, что при установке полустоячей защиты приживаемость растений в два раза больше, чем на контрольном участке. Лесхозы Каракалпакстана методом по облесению засоленных почвогрунтов путем установки полустоячей песконакапливающей механической защиты признали наиболее результативным и в настоящее время лесомелиоративные работы проводятся, базируясь на данном методе (Бакиров и др., 2020).

Таким образом, как следует из экспериментального материала, наиболее эффективным методом облесения засоленных почвогрунтов является установка механической защиты с целью накопления песка и влаги, а в более благоприятные по погодным условиям годы – и нарезка песконакопительных борозд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали полевые экспериментальные исследования, проводить лесомелиоративные рабо-

ты на засоленных землях можно, если заранее корректно применить предлагаемую технологию накопления песка. На глинистых и суглинистых почвогрунтах целесообразно провести нарезку песконакопительных борозд канавокопателем со шелевателем, на почвогрунтах со средней степной засоления целесообразно укладывать песконакопительную механическую защиту из тростника для накопления песка и улучшения его химического и гранулометрического состава, а также накопления влаги в нижних горизонтах, после чего провести посадку семян. Для создания куртин (очагов) лесных насаждений можно использовать пескозадерживающие переносные решетки многоразового использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакиров Н.Ж., Новицкий З.Б., Хамзаев А.Х. Перспективы возрождения осушенного дна Аральского моря // "Экологический вестник Узбекистана". 2019. № 9. С. 6–7.
- Бакиров Н.Ж., Новицкий З.Б., Хамзаев А.Х. Лесные насаждения на осушенном дне Аральского моря // Известия высших учебных заведений. Лесной журн. 2020. № 2. С. 51–59.
- Боровков А.В., Устемиров К.Ж., Таурбергенов Ю., Новицкий З.Б. Лесомелиорация осушенного дна Аральского моря // Сборник аннотированных отчетов (трудов) по проекту "Сохранение лесов и увеличение лесистости территории республики 2007–2014 гг.". Шучинск: ТОО "КазНИИЛХА". 2014. С. 232–239.
- Боровков А.В., Устемиров К.Ж., Таурбергенов Ю., Новицкий З.Б. Лесомелиорация осушенного дна Аральского моря // Экологический вестник Узбекистана. 2016. № 6. С. 22–25.
- Духовный В.А., Навротила П., Рузиева И., Стулина Г., Рощенко Е. Комплексные дистанционные и наземные исследования осушенного дна Аральского моря. Ташкент: НИЦ МКВК, 2008. 175 с.
- Новицкий З.Б. Лесные насаждения на засоленных почвах осушенного дна Арала // Экологический вестник Узбекистана. 2013. № 8(147). С. 14–17.
- Новицкий З.Б. Лесные насаждения на осушенном дне Аральского моря // Экологический вестник Узбекистана. 2015. № 10. С. 31–36.
- Новицкий З.Б. Адаптационные меры, реализуемые на уровне ландшафтов, направленные на повышение устойчивости сообществ к изменению климата // Вопросы адаптации к изменению климата в Каракалпакстане. Информационный бюллетень UNDP. 2016. № 3. С. 1–4.
- Новицкий З.Б. Лесомелиорация входит в комплекс мер, направленных на оздоровление экологической обстановки на осушенном дне Аральского моря // Экологический вестник Узбекистана. 2017. № 4. С. 37–42.
- Новицкий З.Б. Методы создания пастбищ на осушенном дне Аральского моря // Agroilm. 2018. № 4(54). С. 33–34.
- Indoitu R., Kozhoridze G., Batyrbaeva M., Vitkovskaya I., Orlovsky N., Blumberg D., Orlovsky L. Dust emission and environmental changes in the dried bottom of the Aral Sea // Aeolian Research. 2015. V. 17. P. 101–115.
- Thomas D.S.G. Science and the desertification debate // J. Arid. Environ. 1997. V. 37. P. 599–608.
- United Nations Convention to Combat Desertification. 1997. https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-01/UNCCD_Convention_ENG_0.pdf (дата обращения 01.12.2021).
- Welt im Wandel. Herausforderungen für die deutsche Wissenschaft. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996. 218 s.

Application of Various Forest Stands Creation Methods on the Dried-Up Bottom of the Aral Sea

N. Zh. Bakirov¹, Z. B. Novitskiy¹, *, and A. K. Khamzaev¹

¹Forestry Research institute, Darkhan settl., Tashkent region, 111104 Uzbekistan

*E-mail: zinoviy.novitskiy@mail.ru

The dried-up bottom of the Aral Sea is a global problem at the moment, as millions of tons of salt, dust and sand are being removed from it by winds, covering plants in the region and damaging all life in the Aral Sea region. Methods have been developed for forestry and meliorative reclamation of saline types of bottom sediments by creating sand-accumulating furrows, installing sand-accumulating mechanical protection made of reed, as well as sand-retaining wooden or plastic gratings. The efficiency of the sand-accumulating furrows, cut by a trench-cutter with a paraplough, is the highest, in the next year after planting the seedlings, their integrity reaches 85%, in the furrows without the use of a paraplough – 52%, and in the control area with no sand-collecting furrows at all – only 12%. Therefore, before planting seedlings on saline soils, it is necessary to accumulate sand and moisture and to improve the chemical and granulometric composition of the collected substrate.

Keywords: sand-accumulating furrow, trench-cutter, paraplough, sand-retaining grating, mechanical protection, sand transmission, efficiency, sulphite-alcoholic distillery waste, polyvinyl-acetate emulsion.

Acknowledgements: The study has been carried out within the framework of the Kazakhstan Republic's Innovative Development Ministry's projects KXA-7-026-2015 and KX-A-KX-2018-110.

REFERENCES

- Bakirov N.Z., Novitskii Z.B., Khamzaev A.K., Lesnye nasazhdeniya na osushennom dne Aral'skogo morya (Forest plantations on the drained bottom of the Aral sea), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurn.*, 2020, No. 2, pp. 51–59.
- Bakirov N.Z., Novitskii Z.B., Khamzaev A.K., Perspektivy vozrozhdeniya osushennogo dna Aral'skogo morya (Prospects for the revival of the drained bottom of the Aral Sea), *Ekologicheskii vestnik Uzbekistana*, 2019, No. 9, pp. 6–7.
- Borovkov A.V., Ustemirov K.Z., Tairbergenov Y., Novitskii Z.B., Lesomelioratsiya osushennogo dna Aral'skogo morya (Forest reclamation of the drained bottom of the Aral Sea), *Ekologicheskii vestnik Uzbekistana*, 2016, No. 6, pp. 22–25.
- Borovkov A.V., Ustemirov K.Z., Tairbergenov Y., Novitskii Z.B., Lesomelioratsiya osushennogo dna Aral'skogo morya (Reclamation of the drained bottom of the Aral Sea), In: *Sokhranenie lesov i uvelichenie lesistosti territorii respubliky 2007–2014 gg.* (Preservation of forests and increase in forest cover of the territory of the republic in 2007–2014), Proc. of reports, Shchuchinsk: TOO “KazNIILKhA”, 2014, pp. 232–239.
- Dukhovnyi V.A., Navratila P., Ruzieva I., Stulina G., Roshchenko E., *Kompleksnye distantsionnye i nazemnye issledovaniya osushennogo dna Aral'skogo morya* (Integrated remote sensing and ground-based studies of the drained bottom of the Aral Sea), Tashkent: NITs MKVK, 2008, 175 p.
- Indoitu R., Kozhoridze G., Batyrbaeva M., Vitkovskaya I., Orlovsky N., Blumberg D., Orlovsky L., Dust emission and environmental changes in the dried bottom of the Aral Sea, *Aeolian Research*, 2015, Vol. 17, pp. 101–115.
- Novitskii Z.B., Adaptatsionnye mery, realizuemye na urovne landshaftov, napravlennye na povyshenie ustoychivosti soobshchestv k izmeneniyu klimata (Landscape-level adaptation measures to increase the resilience of communities to climate change), *Voprosy adaptatsii k izmeneniyu klimata v Karakalpakstane. Informatsionnyi byulleten' UNDP*, 2016, No. 3, pp. 1–4.
- Novitskii Z.B., Lesnye nasazhdeniya na osushennom dne Aral'skogo morya (Forest plantations on the drained bottom of the Aral Sea), *Ekologicheskii vestnik Uzbekistana*, 2015, No. 10, pp. 31–36.
- Novitskii Z.B., Lesnye nasazhdeniya na zasolennykh pochvakh osushennogo dna Arala (Forest plantations on saline soils of the drained bottom of the Aral Sea), *Ekologicheskii vestnik Uzbekistana*, 2013, No. 8(147), pp. 14–17.
- Novitskii Z.B., Lesomelioratsiya vkhodit v kompleks mer, napravlennykh na ozdorovlenie ekologicheskoi obstanovki na osushennom dne Aral'skogo morya (Forest reclamation is part of a set of measures aimed at improving the ecological situation on the drained bottom of the Aral Sea), *Ekologicheskii vestnik Uzbekistana*, 2017, No. 4, pp. 37–42.
- Novitskii Z.B., Metody sozdaniya pastbishch na osushennom dne Aral'skogo morya (Methods for creating pastures on the drained bottom of the Aral Sea), *Agroilm*, 2018, No. 4(54), pp. 33–34.
- Thomas D.S.G., Science and the desertification debate, *J. Arid. Environ*, 1997, Vol. 37, pp. 599–608.
- United Nations Convention to Combat Desertification*. 1997, available at: https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-01/UNCCD_Convention_ENG_0.pdf (December 01, 2021).
- Welt im Wandel, Herausforderungen für die deutsche Wissenschaft*, Berlin, Heidelberg: Springer, 1996. 218 p.

УДК 581.52+57.045+577.3

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ И АВАРИЙНОСТЬ ДЕРЕВЬЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ В г. ДОНЕЦКЕ

© 2022 г. В. О. Корниенко^а, *, В. Н. Калаев^б^аДонецкий национальный университет, ул. Университетская, 24, Донецк, 83001 Украина^бВоронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, 394018 Россия

*E-mail: kornienkovo@mail.ru

Поступила в редакцию 13.07.2020 г.

После доработки 07.12.2020 г.

Принята к публикации 01.12.2021 г.

В работе установлена связь между температурным фактором и биомеханическим параметром (модулем упругости) древесных тканей березы повислой (*Betula pendula* Roth). При оттаивании древесины модуль упругости в среднем снижается в 2–2.5 раза. Подобное снижение происходит неравномерно, ступенчато. Наибольшее влияние на механическую устойчивость дерева имеет скорость изменения модуля упругости от скорости оттаивания образца/ствола древесного растения. При оттаивании показатели параметров механической устойчивости снижаются в среднем на 45%. Такие изменения отражаются на углах отклонения ствола от вертикали, углах отхождения его скелетных ветвей, сопротивлении изгибу и устойчивости всего дерева к ветровым и гравитационным нагрузкам. В условиях низкого антропогенного загрязнения показатель жесткости на изгиб для растений в возрасте 40–45 лет на $22 \pm 2\%$ выше, чем в условиях повышенной антропогенной нагрузки города. В условиях антропогенной нагрузки под влиянием ветровых нагрузок, действия температуры и других погодных факторов, у березы повислой происходит трансформация архитектоники кроны, которая в условиях снежной бури и ледяного дождя приводит к необратимой деформации или обломам стволов. В результате на экспериментальных участках в г. Донецке, в период с 2014 по 2020 гг., выпало 63 дерева, а 168 растений подверглись необратимой деформации и имели высокую аварийность. Обломы были зафиксированы у растений на высоте 2–4 м (35%), 5–6 м (17%), 7–8 м (52%) и 9 м (6%). В процессе корреляционного анализа выявлена сильная положительная связь между морфометрическим коэффициентом $d : l$ (отношение диаметра к длине ствола) и механической устойчивостью ($R = 0.87$), а также аварийностью ($R = 0.79$) деревьев березы повислой. В связи с этим представляется возможным использование коэффициента $d : l$ как морфометрического маркера механической устойчивости деревьев березы повислой в условиях юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий край).

Ключевые слова: *Betula pendula* Roth, береза повислая, механическая устойчивость, аварийность, температура, ледяной дождь, урбанизированная среда, городские посадки.

DOI: 10.31857/S0024114822020073

Экологическая адаптация древесных растений в городской среде к действию природно-климатических факторов является одной из важнейших задач функциональной экологии (Fournier et al., 2013; Dahle et al., 2017). Активно проводятся исследования по оценке механической устойчивости и аварийности деревьев под влиянием температуры окружающей среды (Green et al., 1999; Szmurku et al., 2011; Корниенко, Нецветов, 2013; Корниенко и др., 2018), ветровых нагрузок (James et al., 2006; Dahle, Grabosky, 2010; James et al., 2014; Dahle et al., 2017; Jelonek et al., 2019), снеговых и ледяных бурь (Nock et al., 2016). Многие авторы также отмечают важность изучения влияния

снежных и ледяных бурь, а также ветровых нагрузок на структуру и функционирование экосистем (Fahey et al., 2020; Klein et al., 2020), а также непосредственно оценку и частоту нарушений, вызванных такими природно-климатическими факторами (Curtis, Gough, 2018).

Влажность древесины оказывает влияние на механическую устойчивость растений, их модуль упругости и плотность древесины (Green et al., 1999; Szmurku et al., 2011; Корниенко, Нецветов, 2013). В большинстве работ исследования проведены на образцах с влажностью 12% (техническая древесина) (Zelinka et al., 2007; Wood handbook ..., 1999, 2010; Virot et al., 2016). Лишь в отдельных ра-

ботах влажность исследуемых образцов доводили до 145% (Mishiru, Asano, 1984a,b; Green et al., 1999, Shmytku et al., 2012; Spatz, Pfisterer, 2013; Nocetti et al., 2015), что соответствует особым условиям хранения и эксплуатации древесных материалов. Влажность живой древесины варьирует в пределах 25(30)–225%, в зависимости от вида (Niklas, Spatz, 2010). Сезонная динамика факторов окружающей среды и физиологических показателей растений (переход из фазы покоя в фазу вегетации) отражается на содержании влаги в растительных тканях. Амплитуда колебаний влажности древесины связана со скоростью потери/сорбции влаги, которая уменьшается с увеличением плотности тканей и содержания в них экстрактивных веществ (Sell, 1989). С влажностью древесины связаны также показатели, которые определяют устойчивость целого дерева или его частей к природно-климатическим факторам. Вследствие этого полученные для технической древесины значения некорректно применять в расчетах устойчивости живого дерева (Раздорский, 1955; Burgert et al., 2001). Некоторые работы (Vigot et al., 2016), в которых применяют данные по сухой (технической) древесине для моделирования поведения древостоев к действию природно-климатических факторов, сталкиваются с серьезной критикой со стороны научного сообщества (Albrecht et al., 2016) и в итоге сводятся к идеализированной модели, которая не может быть применена в прогнозировании живых древесных насаждений.

Ко всему вышесказанному можно добавить, что большинство упомянутых научных работ нацелены на исследования лесных массивов (естественных насаждений), исследований по изучению механической устойчивости насаждений в городской среде (городских посадок) крайне мало. Так, М.В. Нецветов с соавторами (Нецветов и др., 2009; Корниенко та ін., 2009; Нецветов, Сулова, 2009) в условиях юго-востока Украины изучали механическую устойчивость древесных растений к действию вибрационно-акустических нагрузок техногенной природы. В рамках вибрационной экологии эти исследования являются фундаментальными и основополагающими, однако физико-механические свойства тканей деревьев из коллекции Донецкого ботанического сада изучались только на территории дендрария (зона низкой антропогенной нагрузки). В условиях действия антропогенных факторов, значения биомеханических параметров и, как следствие, механическая устойчивость древесины могут отличаться (Dahle et al., 2017). Таким образом, представляется крайне важным изучение физико-механических свойств тканей древесных растений в условиях урбанизированной среды, а также определение их механической устойчивости и

аварийности при сочетанном действии природно-климатических факторов.

Целью работы является оценка влияния природно-климатических факторов и антропогенного загрязнения на деревья березы повислой в условиях юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж) на примере г. Донецка, для чего были обобщены результаты исследования городских посадок березы повислой в 2014–2020 гг.

В задачи исследования входили: 1) исследование влияния температуры на модуль упругости древесных тканей березы повислой *in vitro* (лабораторные исследования); 2) оценивание механической устойчивости березы повислой, произрастающей в условиях техногенной нагрузки, а также рисков при температурных изменениях; 3) изучение влияния природно-климатических факторов на аллометрию березы повислой в городских посадках г. Донецка; 4) оценка влияния сезонных природно-климатических факторов на аварийность березы повислой.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В качестве объекта исследования нами была выбрана береза повислая (*Betula pendula* Roth). Согласно литературным данным, вид обладает высоким адаптивным потенциалом в условиях промышленного загрязнения (Neverova et al., 2013), т.е. обладает комплексом реакций, обеспечивающих приспособляемость растений к экстремальным условиям среды. По значению проницаемости мембран как интегрального показателя функционального состояния растительных тканей в условиях антропогенной нагрузки городской среды береза повислая имеет низкие значения, что говорит о высокой устойчивости к атмосферным загрязнениям и лучшей работе систем регуляции и поддержания гомеостаза по сравнению с другими исследованными видами в условиях городской среды (Сарбаева и др., 2013). По уровню устойчивости к высоким температурам, действию “суховея” и водоудерживающей способности вид среднеустойчив (Михеева и др., 2011).

Представленность березы повислой в городских посадках центральной части современного Донецка составляет ~5% (Сулова и др., 2012; Глухов и др., 2016), а в целом по городу ~2% (Поляков, 2009) от всех видов древесных растений. Критический возраст в условиях города составляет 50 лет (Корниенко, Калаев, 2018). Растение быстрорастущее, морозо- и засухоустойчиво, не требовательно к почвам, в условиях города Донецка используется как в одиночных, так и групповых, аллейных посадках. Вдоль автомагистралей березу повислую используют как в первом, так и во втором ряду.

Таблица 1. Значения параметров антропогенной нагрузки от автотранспорта и вибрационно-акустического шума

Номер участка	Интенсивность движения, ед. ч ⁻¹ $\bar{x} \pm s_x$	Вибрационно-акустический шум, дБА					
		возле дороги (бордюр)		1 ряд деревьев		окраина древостоя	
		$\bar{x} \pm s_x$	MAX	$\bar{x} \pm s_x$	MAX	$\bar{x} \pm s_x$	MAX
1	1060 ± 54	78 ± 5	92	74 ± 2	80	69 ± 1	73
2	1681 ± 211	79 ± 4	110	76 ± 2	85	62 ± 5	68
3	1334 ± 30	79 ± 1	86	73 ± 1	79	68 ± 1	73
4	—			45 ± 5*			

* Естественный шум в насаждениях.

Примечание. На рис. 1–4 $\bar{x} \pm s_x$ – среднее значение ± стандартное отклонение.

Таблица 2. Показатели токсических веществ в почвах и атмосферном воздухе на территории проведения исследований

Номер участка	Загрязнение почвы, $\bar{x} \pm s_x$			Загрязнение атмосферного воздуха, $\bar{x} \pm s_x$		
	Zn, мг кг ⁻¹	Cu, мг кг ⁻¹	Cr, мг кг ⁻¹	CO, мг м ⁻³	H ₂ S, мг м ⁻³	NH ₃ , мг м ⁻³
1	33.0 ± 4.4	42.5 ± 7.4	1.0 ± 0.1	4.5 ± 0.5	—	—
2	<0.01	202.3 ± 217.6	1.2 ± 0.5	4.3 ± 0.5	0.025 ± 0.005	0.11 ± 0.1
3	33.0 ± 3	42.5 ± 4.4	1.0 ± 0.1	4.3 ± 0.5	0.025 ± 0.005	0.11 ± 0.1
4	—	0.005 ± 0.001	0.2 ± 0.1	3.5 ± 0.5	0.006 ± 0.001	—
ПДК	23*	3*	6*	5**	0.008**	0.2**

* Подвижная форма.

** Максимальная разовая концентрация.

Примечание. Обозначения см. табл. 1; “—” – не определилось.

В связи с недостаточной изученностью актуальных с фундаментальной и прикладной позиций вопросов по влиянию природно-климатических факторов на механическую устойчивость, аварийность, структурно-функциональную организацию и адаптацию березы повислой в условиях трансформированной среды обитания (Донецкий кряж на юге Восточно-Европейской равнины) необходимы дальнейшие исследования в этой области.

В качестве места проведения исследований было выбрано четыре территории (участки №№ 1–4). Длина исследуемых насаждений березы повислой на участке № 1 составляет ~385 м, ширина – около 50 м (пересечение Ленинского пр. и ул. Одесской). Растения посажены рядами, всего 7 полных рядов. В каждом ряду с расстоянием в 2–3 м высажены 112 ± 3 берез. Возраст деревьев ~45 лет. На участке № 2 (парк “Кованых фигур”, пересечение основных автомагистралей – ул. Артема с ул. Университетской и пр-та Ватутина с пр-том Мира), растения произрастают вдоль пешеходных дорожек, высажены как солитеры. Возраст 7–20 лет. На участке № 3 (пр-т Ильича) деревья произрастают в линейных насаждениях вдоль автомагистрали. Возраст 40–50 лет. На участке № 4 (Дендрарий ГУ “Донецкий ботанический сад”,

южный массив, вдоль Макеевского шоссе), возраст деревьев 40–50 лет. Растения произрастают одиночно, в куртинах либо небольшими группами (3–5 ед.).

На исследуемых участках была рассчитана интенсивность автотранспортного движения в качестве оценки антропогенной нагрузки территории. Выявлено, что на участках №№ 1–3 преобладающим видом транспорта является пассажирский легковой автотранспорт (в среднем 800–1000 ед. ч⁻¹), преимущественно автомобили иностранного производства. На участках с наиболее высокими показателями интенсивности автотранспортного потока были превышены значения акустического шума (табл. 1).

Уровень интенсивности транспортного потока вносит изменения в состав почв и атмосферного воздуха. Вследствие загрязнения атмосферного воздуха и почв увеличивается риск токсического воздействия на растения. Концентрации токсических веществ в атмосферном воздухе и почве вдоль магистралей на исследуемых участках показаны в табл. 2.

Исследования атмосферного воздуха показали, что концентрации большинства исследуемых веществ были в пределах ПДК. На участках № 2 и

№ 3 обнаружены превышения концентраций сероводорода, концентрации угарного газа были у верхней границы ПДК, обнаружено содержание аммиака (табл. 2).

Наибольшая концентрация меди обнаружена в почвах на территории, прилегающей к ул. Артема (центральной улице города), на участках № 1 и № 3 также зафиксированы превышения ПДК по меди (в 14 раз). На этих же территориях (участки № 1 и № 3) имеются превышения показателей концентрации цинка. На территории дендрария Донецкого ботанического сада все изученные показатели антропогенной нагрузки не превышали ПДК, поэтому мы считаем участок № 4 территорией с минимальной антропогенной нагрузкой.

Температурную зависимость модуля упругости проводили на побегах древесных растений, отобранных на исследуемых участках. Возраст отобранных побегов 3–5 лет, их срезали при отрицательных температурах в период покоя с нижней части кроны, не затеняемой в течение светового дня. Для контроля температуры образцов в них со стороны среза помещали термопару (модель TZ-A/VL алюминий) на глубину 1.5 см. Срезы покрывали герметичным материалом.

Модуль упругости древесных волокон определяли по величине изгиба цилиндра, обрезанной ветви, горизонтально защемленной в тисках, в ответ на приложение силы на ее свободном конце (методика детально описана в работах Корниенко, Нещетова (2014) и Корниенко и др. (2018)). Модуль упругости при температуре 15°C (температура воздуха в лаборатории) отличался, поэтому для сравнения его температурных зависимостей использовали значения, приведенные к МОЕ (modulus of elasticity=модуль упругости) при $T = 15^\circ\text{C}$. Отбор образцов и исследования влияния температуры на модуль упругости древесины (МОЕ) проводились в феврале – начале марта каждого года (2014–2020 гг.).

Для оценки прочности и механической устойчивости березы повислой в условиях города использовали следующие параметры: P_{cr} и m_{cr} – предельно допустимая нагрузка и масса, при действии которых ствол начинает деформироваться или обламывается; H_{cr} – критическая высота ствола, при достижении которой действие собственного веса привело бы к необратимой деформации или облому; RRB – относительное сопротивление изгибу; EI – сопротивление изгибу (методика детально описана в работе Корниенко, Калаева (2018)).

Результаты визуального осмотра березы повислой фиксировались с помощью фотоаппарата Nikon Coolpix S2600, обработку и анализ изображений проводили в программе AxioVision Rel. 4.8. В результате выполнения работы для изучения архитектоники кроны, углов отхождения ствола и

скелетных ветвей от нормали было обработано свыше 1500 электронных фотографий. В программе AxioVision Rel. 4.8. углы измерялись с помощью функций Measure → Angle с точностью до 1°. Среднее значение параметра не демонстрировало полной картины поведения древесного растения при изгибе. В связи с этим мы выделили три участка (A , B , B), разделяющих ствол растения по основным линиям изгиба, с указанием места произрастания дерева (рис. 1).

В условиях антропогенной нагрузки аллометрические исследования стволов березы повислой проводили на экспериментальном участке № 1 в период 2016–2017 и 2019–2020 гг. Такие временные рамки связаны с погодными условиями, при которых получены основные результаты по исследованию архитектоники кроны и аварийности березы повислой. Так, в эти годы на территории проведения эксперимента отмечались следующие природно-климатические условия: после длительного потепления в течение зимнего сезона температура воздуха резко опускалась до значений -20°C , выпадали сильные осадки (мокрый снег, снег), метель (порывы ветра 15–20 м с⁻¹), налипание мокрого снега, наледи на побегах/стволах.

Диаметр ствола измеряли мерной вилкой, высоту деревьев – с помощью электронного высотомера HES Haglof (Швеция). Жизнеспособность исследованных деревьев определяли по 8-бальной шкале Савельевой (Савельева, 1975), где 8 баллов это здоровое растение, сухие ветви в кроне отсутствуют, ствол не имеет повреждений, а 0 баллов это полное усыхание всего дерева. Возрастное состояние дерева определяли по Чистяковой (Чистякова и др., 1989). В работе имеются обозначения возрастных классов: I – 5–15 лет; II – 16–25 лет; III – 26–55 лет; IV – 56–75 лет. Аварийность каждого дерева определяли по методике, предложенной в работе (Корниенко, Приходько, 2018). При оценке древесных насаждений нами были использованы следующие методы: визуальный, ретроспективный, инструментальный (а – взятие керн прирастным буром для определения доли гнили в древесине, %; б – биомеханические испытания “Pullingtest”). Плотность (объемный вес) древесных волокон определяли методом погружения и взвешивания.

Для статистической обработки данных использовали программы “Statistica 8” (StatSoft Inc.) и “Excel 2010” (Microsoft Corporation). При построении графиков выводили уравнения регрессии и оценивали величину достоверности аппроксимации (R^2). Достоверность отличий средних значений полученных данных между коэффициентами $d : l$ и состоянием дерева (norm, deform, crushed) определяли с использованием t -критерия Стьюдента. Для выявления достоверности между коэффициентом $d : l$ и механической

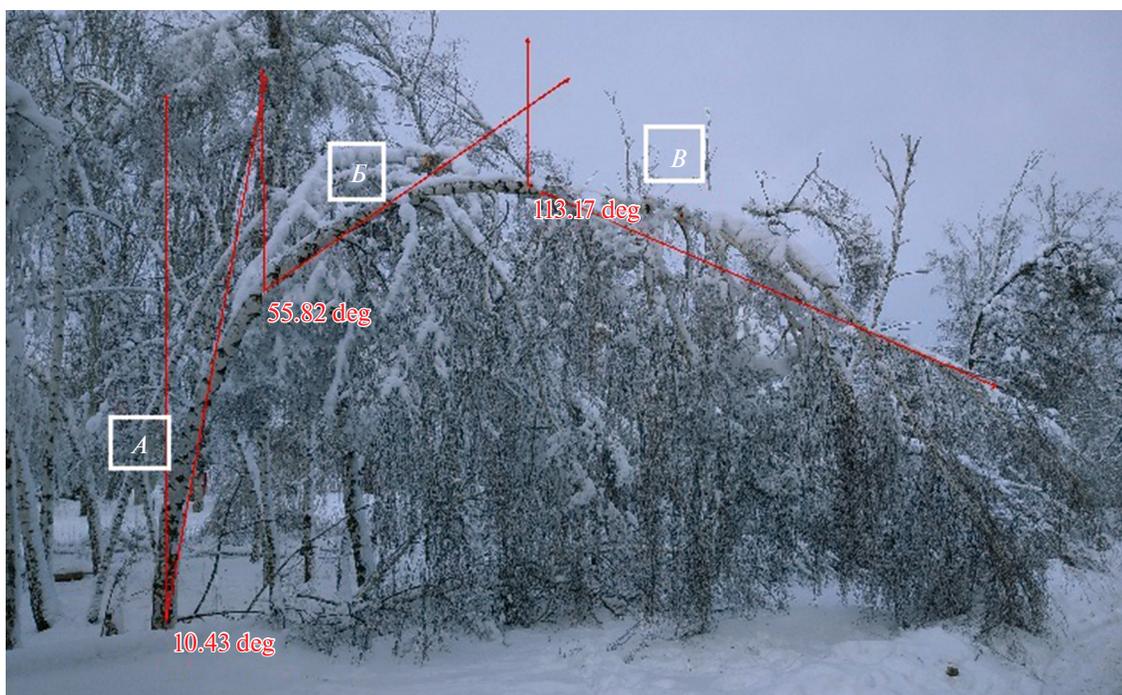


Рис. 1. Углы отклонения стволов березы повислой на экспериментальном участке № 1 (общая схема). А – 10.43°. Б – 55.85°. В – 113.17°.

устойчивостью использовали коэффициент корреляции Пирсона (r), который считали отличным от нуля при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биомеханические исследования березы повислой. Плотность древесных тканей в условиях г. Донецка составляет $980 \pm 7 \text{ кг м}^{-3}$ вне зависимости от места произрастания.

Модуль упругости в условиях антропогенной нагрузки (экспериментальные участки №№ 1–3) города составляет $5.03 \pm 0.77 \text{ ГН м}^{-2}$, в условиях Донецкого ботанического сада (участок № 4 – дендрарий) – $4.30 \pm 0.46 \text{ ГН м}^{-2}$. Различия показателей биомеханических параметров достоверны при $p < 0.05$.

Влияние температуры на МОЕ древесных тканей березы повислой *in vitro* (лабораторные исследования). Зависимость МОЕ от температуры в общем виде для всех образцов имеет тенденцию к нелинейному падению при повышении температуры от 255 до 317 К (рис. 2).

При оттаивании изменение модуля упругости древесины у всех образцов происходит неравномерно, ступенчато. Число изломов кривой МОЕ (T) варьирует от 1 до 3, а температуры, при которых изменяется угол наклона МОЕ (T) – в пределах 2° – 4° . Наибольшая крутизна наклона отмечается на участке от -16 до 0°C . Наши экспериментальные

данные согласуются с данными, полученными в работах японских ученых А. Mishiо и I. Asano (1984а, б). Стоит отметить, что значения точек изгибов могут варьировать от видовых особенностей растений (например, анатомических и биохимических (Корниенко, Нецветов, 2014)). В наших экспериментах температура образцов изменялась со временем, как и изменялась скорость ее роста. Крутизна кривой модуля упругости от температуры снижается по мере падения скорости роста температуры образца. Видовые отличия в данном процессе не столь изучены и могут иметь место, например, при наличии ассимилянтов в живице, которое влияет на скорость льдообразования в сосудах.

При неравномерном оттаивании (нелинейная зависимость на рис. 3а, 3б), в момент, когда в образце находится уже оттаявшая свободная вода и кластеры льда, модуль упругости имеет максимальную скорость падения, что в свою очередь отражается на механической устойчивости и аварийности растения в целом. При локальных нагревах нарушается целостность морфологических структур, ствол дерева из однородной структуры переходит в неоднородную (посредством фазовых переходов воды в сосудах) и при этом теряет устойчивость. *In situ* такие эффекты наблюдаются при смене сезона, нетипичных климатических условиях во время, например, зимнего периода.

Влияние температуры на механическую устойчивость древесных растений, произрастающих в

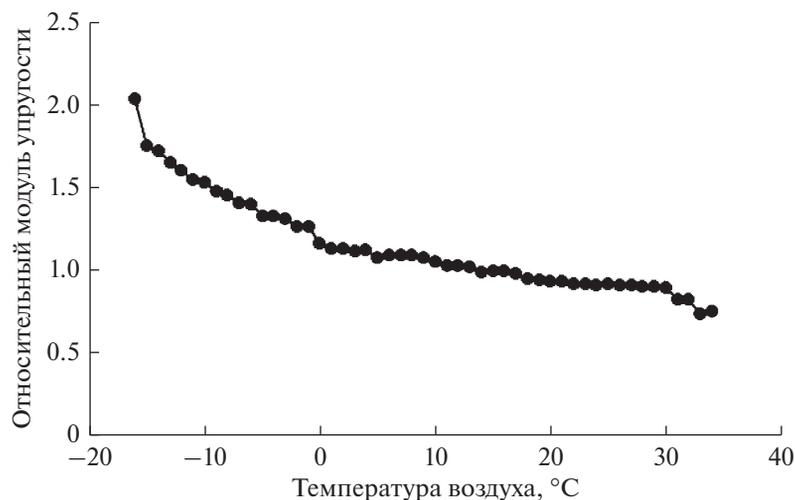


Рис. 2. Влияние температуры на относительное значение модуля упругости древесных тканей березы повислой.

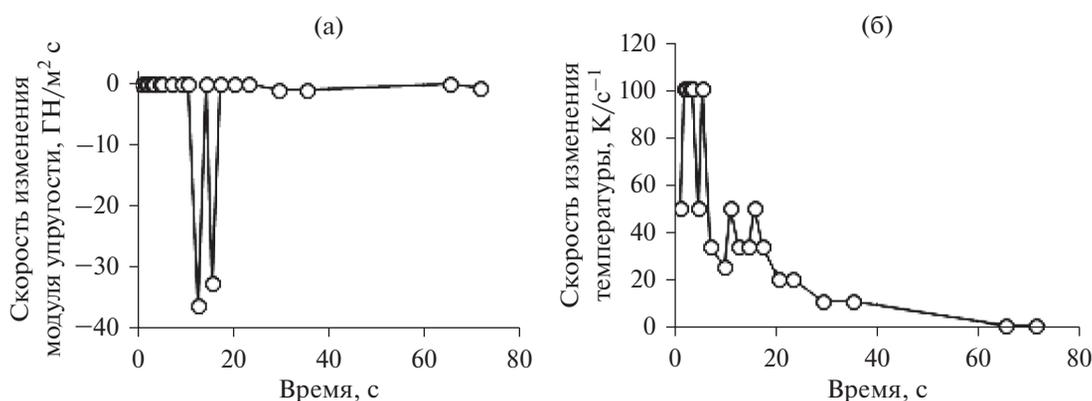


Рис. 3. Влияние скорости изменения температуры на скорость изменения модуля упругости древесины во времени.

условиях техногенной нагрузки. Параметр EI отражает способность древесного растения сопротивляться изгибу, при котором могут возникнуть необратимые деформации ствола/скелетной ветви при действии нагрузок различной природы. Искривление происходит при возникновении в поперечном сечении ствола/скелетной ветви изгибающих моментов.

Для березы повислой отношение EI к $d:l$ имеет степенную зависимость ($R^2 = 0.83$). При оттаивании EI уменьшается на ~45%, что при сочетанном действии с природно-климатическими факторами окружающей среды может вызвать потерю механической устойчивости растения и привести к необратимой деформации стволов (рис. 4а).

Отношение RRB к $d:l$ имеет линейную зависимость ($R^2 = 0.87$), а P_{cr} к $d:l$ степенную зависимость ($R^2 = 0.97$). Параметры тесно связаны с показателем модуля упругости тканей растения и зависят от отношения диаметра ствола к его высоте. Наибольшему риску подвержены молодые растения (до 5–7 лет) и угнетенные вслед-

ствие роста в плотном древостое и борьбы за свет взрослые растения (имеют тонкие и высокие стволы $d:l < 0.01$, рис. 4б).

Предельно допустимая нагрузка дает точные значения критической массы при действии которой произойдут необратимые изменения/облом ствола (рис. 4в). Отношение $d:l$ можно использовать также следуя зависимостям на рис. 3в, как морфометрический маркер устойчивости древесного растения. При значении $d:l$ в диапазоне от 0.004 до 0.015 критическая масса варьирует в пределах от 11 до 815 кг, при этом ствол находится в замороженном состоянии, а с учетом температурных изменений (рис. 2 и 3) механическая устойчивость дерева снижается на ~45%, значения P_{cr} лежат в диапазоне от 6.2 до 458.9 кг.

Эти величины легко достигаются в условиях городской среды, при изменении температуры окружающей среды и действии ветровых и гравитационных нагрузок.

Полученные температурные зависимости МОЕ и параметров механической устойчивости объяс-

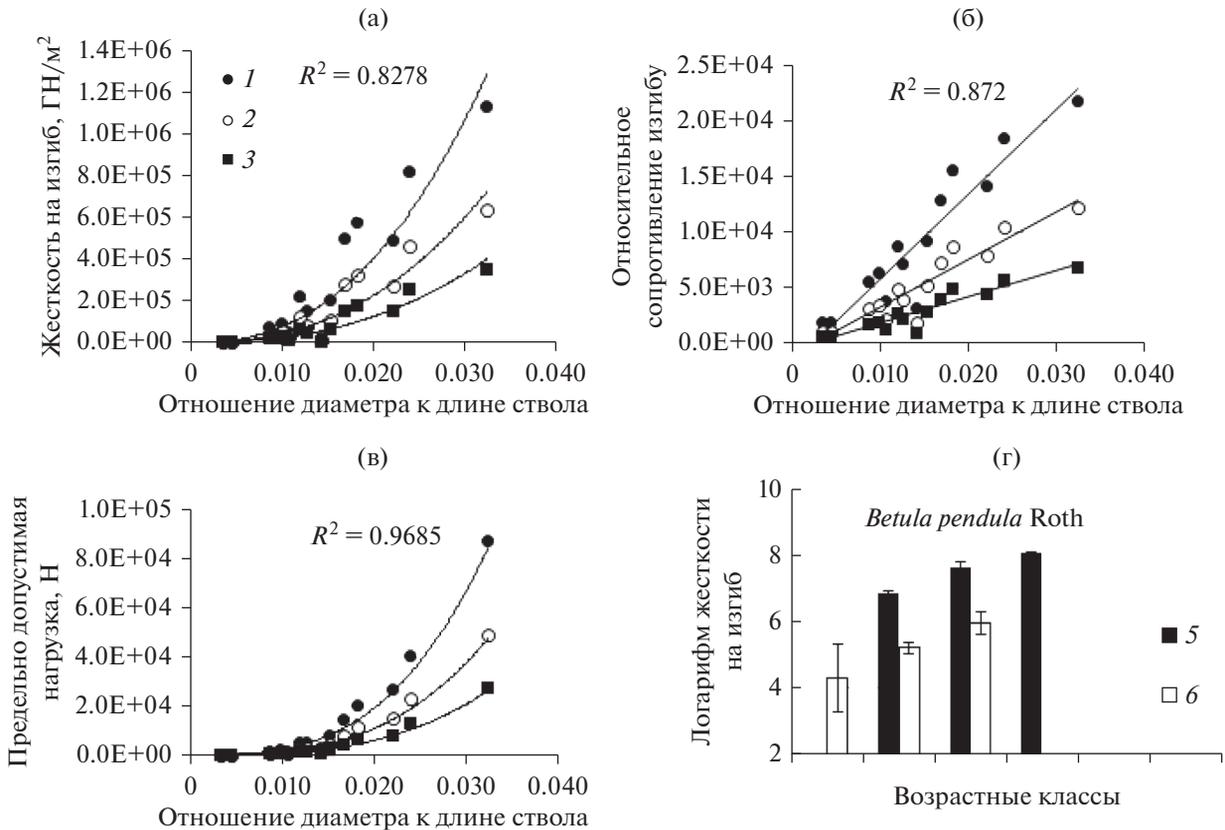


Рис. 4. Зависимость параметров механической устойчивости от отношения d/l (а–в) и возрастных классов (г). 1 – значение показателя в зимний период при отрицательной температуре, 2 – значение показателя при оттаивании, 3 – значение показателя в летний период при положительной температуре, 4 – значения, полученные на территории ГУ “Донецкий ботанический сад” (контроль), 5 – значения, полученные в условиях антропогенной нагрузки г. Донецка.

няют эффекты деформации и обломов стволов березы повислой в зимний период.

Исследование архитектоники кроны деревьев березы повислой, произрастающих в условиях антропогенного загрязнения г. Донецка (2017–2020 гг.). В условиях низкой антропогенной нагрузки на территории дендрария ГУ “Донецкий ботанический сад” деревья березы повислой обладают высоким баллом жизнеспособности (в хорошем состоянии – 5–7 баллов по Савельевой), они не подвергались крушению и необратимым изгибам при ветровалах (2017–2020 г.), снеговых и ледяных штормах 2017 и 2020 г. Это объясняется зависимостью $\log EI$ от возраста (рис. 4г). В условиях относительного контроля показатель жесткости на изгиб на $22 \pm 2\%$ выше, чем в условиях антропогенной нагрузки города ($p < 0.05$). При этом углы отхождения от вертикали составляют не более 5° , а отношение $d : l > 0.02$.

В результате обследований городских посадок березы повислой в условиях высокой антропогенной нагрузки на участке № 1 в 2017 г. выявлено, что со стороны жилого дома углы отхождения стволов растений (их максимумы) больше в 2 ра-

за, чем максимум для берез, растущих со стороны автомагистрали. В середине древостоя наблюдались практически ровные стволы с небольшим углом наклона 2° – 6° от вертикали (табл. 3).

В результате обследований в 2020 г. выявлено, что угол наклона стволов растений изменился и трансформировался (табл. 4). Среднее значение параметра уже не отражало и не описывало поведения древесного растения при изгибе. В связи с этим мы выделили три участка, разделяющих ствол растения по основным линиям изгиба: участок “А” от основания до первого изгиба ствола (~3 м), участок “Б” – середина ствола растения, третий участок “В” с линией изгиба до вершины кроны.

На окраине древостоя наблюдались максимальные изгибы стволов. После снятия нагрузки положение дерева не изменялось, поэтому можно говорить о необратимой деформации. Всего после снежной бури были подвержены необратимой деформации 168 растений.

Влияние сезонных природно-климатических факторов на аварийность деревьев березы повислой, произрастающих в условиях антропогенной на-

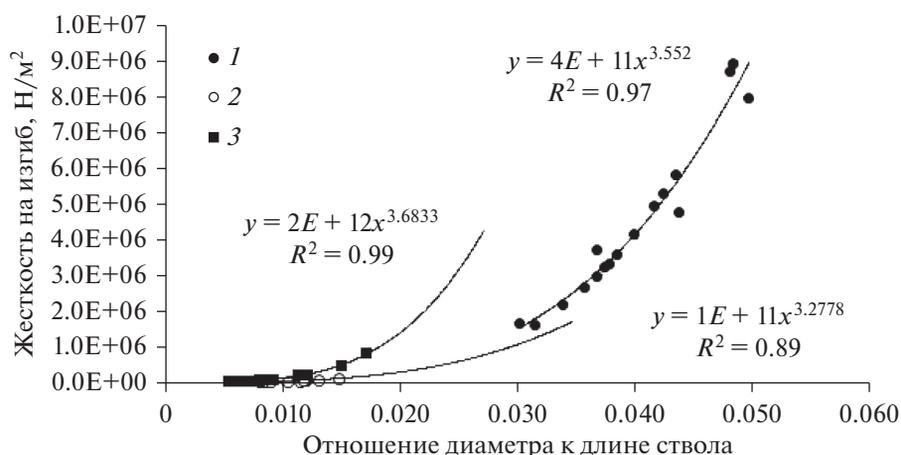


Рис. 5. Зависимость сопротивления изгибу ствола дерева от отношения $d : l$. 1 – стволы имеют строго вертикальное направление роста, 2 – деформированные, изогнутые стволы, 3 – подверглись облому ствола.

грузки. В результате ветровала 2017 г. в первом ряду от жилого дома, там, где углы отклонения от вертикали имели значения 40° – 45° , выпало несколько растений. Исследовав их аллометрические параметры, экспериментально установили, что коэффициент $d : l$ у таких деревьев ≤ 0.01 .

В 2020 г. в условиях снежной бури и ледяного дождя выпало 63 дерева. Обломы были зафиксированы у растений на высоте 2–4 м (35%), 5–6 м (17%), 7–8 м (52%) и 9 м (6%). В основном это растения с относительно тонкими стволами, $d : l$ у которых составляет 0.01. Для таких растений были получены зависимости сопротивления изгибу

от $d : l$ с учетом их состояния: нормально растущие (norm, имеющие вертикальное направление $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$), деформированные (deform) или подвергшиеся облому ствола (crushed) в результате действия климатических факторов (снежных бурь и ледяного дождя) (рис. 5). Отношение EI к $d : l$ для всех групп деревьев имеет степенную зависимость и высокий коэффициент детерминации $R^2 \sim 0.89$ – 0.99 . Для вертикально растущих деревьев отношение $d : l$ имело диапазон 0.03–0.05.

Деревья, произрастающие в условиях антропогенной нагрузки, обладают меньшей устойчивостью, что связано, во-первых, со значениями

Таблица 3. Влияние места произрастания в древостое на угол отхождения ствола дерева березы повислой (2017 г.)

Место произрастания	Число, шт.	Угол наклона ствола от вертикали, $^{\circ}$			
		$\bar{x} \pm s_x$	доля от общего числа, %	MAX	доля от общего числа, %
Окраина древостоя со стороны жилого дома	91	16 ± 5	60	43	40
Окраина древостоя со стороны трассы	220	15 ± 6	40	26	60
Середина древостоя	352	4 ± 2	90	12 ± 3	10

Примечания. Обозначения см. табл. 1.

Таблица 4. Влияние места произрастания в древостое на угол отхождения ствола дерева березы повислой (2020 г.)

Место произрастания	Угол наклона ствола от вертикали, град $\bar{x} \pm s_x$		
	участок А	участок Б	участок В
Окраина древостоя со стороны жилого дома	18 ± 3	57 ± 7	118 ± 12
Окраина древостоя со стороны трассы	14 ± 3	49 ± 8	96 ± 21
Середина древостоя	7 ± 5	36 ± 26	80 ± 44

Примечания. Обозначения см. табл. 1.

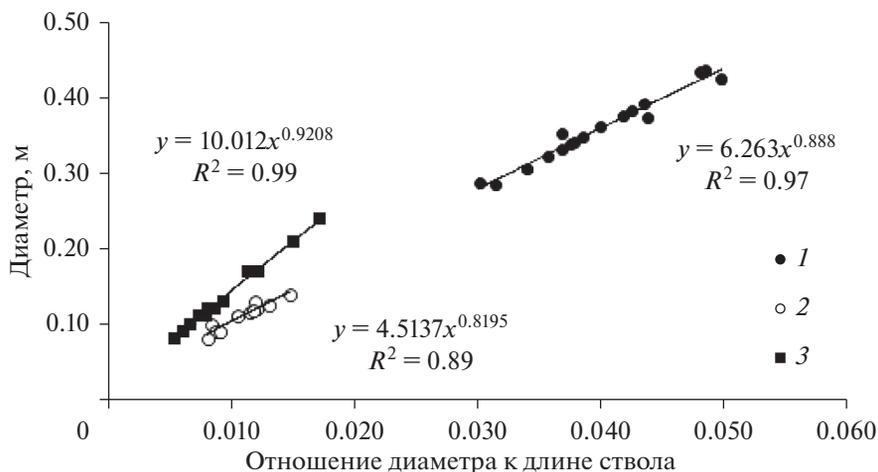


Рис. 6. Зависимость диаметра ствола дерева от $d : l$ как морфометрического маркера механической устойчивости. 1 — стволы имеют строго вертикальное направление роста, 2 — деформированные, изогнутые стволы, 3 — подверглись облому ствола.

дендрометрических параметров стволов растений (рис. 6), во-вторых, с увеличением высоты расположения биомассы дерева, и как следствие — приложением нагрузок в виде силы ветра, а также дополнительной массы при выпадении осадков в верхней трети от высоты дерева. Поэтому нами и были зафиксированы обломы стволов в основном двух вариантов: первый — на высоте 2–4 м (35%), т.е. у основания, когда при прогреве ствола образуется неоднородная структура и на высоте — 2–4 м создается концентрация напряжения механически нагруженного ствола; и второй на высоте 7–9 м (58% от общего числа обрушившихся растений), т.е. в верхней трети, что является классической экологической стратегией выживания дерева в условиях действия критических статических природно-климатических нагрузок (налипание снега, оледенение).

Использование коэффициента $d : l$ как морфометрического маркера механической устойчивости деревьев березы повислой на юге Восточно-Европейской равнины (Донецкий край). Актуальность исследований, посвященных изучению связи между морфометрическими параметрами ствола d и $h(l)$ и механической устойчивостью деревьев к ветровым и гравитационным нагрузкам отмечал еще Г.Б. Кофман в своей работе “Рост и форма деревьев” (1986). Он с целью нахождения механически устойчивого состояния дерева применял соотношение $h(l) : d \sim 10^2$ (т.е. отношение высота : длина ствола дерева к его диаметру у основания). Теоретически было установлено, что при $h > 110r$ (h — высота, r — радиус у основания) деревьям угрожает потеря упругой механической устойчивости. Однако автор при разработке математической модели, описывающей устойчивость живых деревьев, использовал физико-механические пара-

метры (E — модуль упругости и ρ — плотность древесных тканей) технической (сухой) древесины хвойных пород, чего, по мнению других исследователей (Burgert et al., 2001), делать нельзя. Так, сухая древесина, обладающая высокой жесткостью и хрупкостью, существенно отличается от зеленой, живой древесины, которая является более упругой (имеется в виду значение модуля упругости, которое коррелирует со значением влажности (w)), и менее хрупкой (Burgert et al., 2001). Также значимым фактором механической устойчивости к действию природно-климатических факторов является индивидуальная адаптация древесных видов к условиям среды произрастания (Thomas, 2011). Поэтому расчеты, выполненные на растениях одного вида, без учета условий произрастания и особенностей физико-механических свойств древесины живых растений, некорректно использовать в качестве универсальной модели механического поведения дерева при нагрузках, а также вывода морфометрического коэффициента устойчивости/аварийности (Niklas, Spatz, 2012; Albrecht et al., 2016). В связи с этим актуальной задачей является нахождение для каждого вида древесных растений связи состояния (аварийности) и механической устойчивости с коэффициентом $d : l$, а также диапазона вариации этого соотношения с учетом условий произрастания.

В нашем исследовании при статистической обработке данных методом корреляционного анализа была выявлена сильная положительная связь между морфометрическим коэффициентом $d : l$ и механической устойчивостью ($r = 0.87$), а также аварийностью ($r = 0.79$) деревьев березы повислой (табл. 5).

Отношение $d : l$ для деревьев березы повислой, произрастающих в условиях антропогенной нагруз-

Таблица 5. Связь состояния дерева (аварийность) и его механической устойчивости с коэффициентом $d : l$

Состояние дерева	Отношение диаметра к длине ствола, $d : l$	Жесткость на изгиб, H/m^{-2}
Norm	0.28–0.43	1.59×10^6 – 8.93×10^6
Deform	0.08–0.015	1.01×10^4 – 10.49×10^4
Crushed	0.05–0.017	1.01×10^4 – 8.19×10^5

Примечание. Norm – стволы имеют строго вертикальное направление роста, Deform – деформированные, изогнутые, Crushed – подверглись облому ствола.

ки г. Донецка, в среднем составляло 0.01 ± 0.003 . При таких значениях наблюдались необратимые деформации или обломы стволов/скелетных ветвей. Это может быть объяснено тем, что в условиях антропогенной нагрузки происходит нарушение физиолого-биохимических, клеточных, молекулярных и генетических процессов в растении (Поляков, 2009; Alonso-Serra et al., 2020). Внешним результатом действия загрязнения являются изменения морфометрических параметров стволов и кроны древесных растений (Поляков, 2009). Считается, что морфометрические параметры кроны и ствола древесного растения оказывают большой вклад в вариацию механической устойчивости и аварийности деревьев (Sellier, Fourcaud, 2009). В связи с этим представляется возможным использование коэффициента $d : l$ как морфометрического маркера механической устойчивости деревьев березы повислой в условиях юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж). Возможно, для других видов растений связь диапазона варьирования $d : l$ в пределах 0.01 и состояния дерева будет также прослеживаться, этот показатель может быть универсальным, однако это требует дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено влияние температуры на модуль упругости древесных тканей березы повислой. Показатель достоверно снижается при оттаивании в среднем в 2–2.5 раза, снижение МОЕ происходит неравномерно, ступенчато. Наибольшее влияние на механическую устойчивость дерева имеет скорость изменения модуля упругости ($dMOE:dt$) от скорости оттаивания образца/ствола древесного растения ($dT:dt$).

При оттаивании показатели параметров механической устойчивости снижаются в среднем на 45%. Такие изменения отражаются на углах отклонения ствола от вертикали, углах отхождения его скелетных ветвей, сопротивлении изгибу и устойчивости всего дерева к ветровым и гравитационным нагрузкам. В условиях низкого антропо-

погенного загрязнения показатель механической устойчивости $\log EI$ для растений в возрасте 40–45 лет на $22 \pm 2\%$ выше, чем в условиях повышенной антропогенной нагрузки города ($p < 0.01$). В условиях антропогенной нагрузки под влиянием ветровых нагрузок, температуры, снежных и ледяных бурь происходит трансформация архитектуры кроны березы повислой. Такие изменения приводят к необратимой деформации или обломам стволов, в условиях снежной бури и ледяного дождя. В результате 168 растений подверглись необратимой деформации и имели высокую аварийность, выпало 63 дерева. Обломы были зафиксированы у растений на высоте 2–4 м (35%), 5–6 м (17%), 7–8 м (52%) и 9 м (6%).

В процессе корреляционного анализа была выявлена сильная положительная связь между морфометрическим коэффициентом $d : l$ и механической устойчивостью ($r = 0.87$), а также аварийностью ($r = 0.79$) деревьев березы повислой. В связи с этим представляется возможным использование коэффициента $d : l$ как морфометрического маркера механической устойчивости деревьев березы повислой в условиях юга Восточно-Европейской равнины (Донецкий кряж).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глухов А.З., Хархота Л.В., Пастернак Г.А., Лихацкая Е.Н. Современное состояние дендрофлоры города Донецка // Самарский научный вестник. 2016. Т. 2(15). С. 20–24.
- Корниенко В.О., Калаев В.Н. Механическая устойчивость древесных пород и рекомендации по предотвращению их аварийности в городских насаждениях. Воронеж: Роза Ветров, 2018. 92 с.
- Корниенко В.О., Калаев В.Н., Елизаров А.О. Влияние температуры на биомеханические свойства древесных растений в условиях закрытого и открытого грунта // Сибирский лесной журн. 2018. № 6. С. 91–102.
- Корниенко В.О., Нецветов М.В. Влияние отрицательных температур на механическую устойчивость дуба красного (*Quercus rubra* L.). // Промышленная ботаника. 2013. Вып. 13. С. 180–186.
- Корниенко В.О., Нецветов М.В. Криоскопия влаги и температурная зависимость модуля упругости древесины // Вісті Біосферного заповідника "Асканія-Нова". 2014. Т. 16. С. 88–94.
- Корниенко В.О., Нецветов М.В., Нікуліна В.М., Сулова О.П. Дослідження стійкості дерев до вібрацій // Вісник Львівського університету. Серія фізична. 2009. Вип. 44. С. 185–193.
- Кофман Г.Б. Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука, 1986. 211 с.
- Михеева М.А., Федорова А.И. Влияние высоких температур на устойчивость древесных растений в городской среде // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2011. № 2. С. 166–175.
- Нецветов М.В., Сулова Е.П., Нікуліна В.М., Корниенко В.О. Механическая устойчивость деревьев к антропо-

- погенным вибрационным нагрузкам // Фізичні методи в екології, біології та медицині. Програма і збірник тез II міжнародної конференції. Львів–Ворохта, Україна, 2–6 вересня 2009 р. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2009. С. 22–23.
- Нецветов М.В., Сулова Е.П. Механическая устойчивость деревьев и кустарников к вибрационным нагрузкам // Промышленная ботаника. 2009. № 9. С. 60–67.
- Поляков А.К. Интродукция древесных растений в условиях техногенной среды. Донецк: Ноулидж, 2009. 268 с.
- Раздорский В.Ф. Архитектоника растений. М.: Советская наука, 1955. 432 с.
- Савельева Л.С. Устойчивость деревьев и кустарников в защитных лесных насаждениях. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 168 с.
- Сарбаева Е.В., Воскресенская О.Л., Воскресенский В.С. Оценка устойчивости древесно-кустарниковых растений в урбанизированной среде // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=9011> (дата обращения: 27.04.2020).
- Сулова О.П., Поляков О.К., Нецветов М.В., Дацько О.М., Лихацька О.М. Життєздатність деревних рослин у міських вуличних насадженнях на південному сході України // Промышленная ботаника. 2012. Вып. 12. С. 12–18.
- Чистякова А.А., Заугольнова Л.Б., Полтинкина И.В., Кутына И.С., Лищинский Н.Н. Диагнозы и ключи возрастных состояний лесных растений. Деревья и кустарники: методические разработки для студентов биологических специальностей. М.: Прометей, 1989. 106 с.
- Albrecht A., Badel E., Bonnesoeur V., Brunet Y., Constant T., Defosse P., Langre E., Dupont S., Fournier M., Gardiner B., Mitchell S. J., Moore J. R., Moulia B., Nicoll B. C., Niklas K. J., Schelhaas M., Spatz H.-Ch., Telewski F. W. Comment on “Critical wind speed at which trees break” // Physical review. 2016. E 94. P. 067001-1–067001-2.
- Alonso-Serra J., Shi X., Peaucelle A., Rastas P., Bourdon M., Immanen J., Takahashi J., Koivula H., Eswaran G., Murrant S., Help H., Smolander O., Su Ch., Safronov O., Gerber L., Salojärvi J., Hagqvist R., Mähönen A., Nieminen K., Helariutta Y. Elimäki locus is required for vertical proprioceptive response in birch trees // Current Biology. 2020. V. 30. Is. 4. P. 589–599.
- Burgert I., Bernasconi A., Niklas K.J., Eckstein D. The influence of rays on the transverse elastic anisotropy in green wood of deciduous trees // Holzforschung. 2001. V. 55. Is. 5. P. 449–454.
- Curtis P.S., Gough C.M. Forest aging, disturbance and the carbon cycle // New Phytol. 2018. V. 219. P. 1188–1193.
- Dahle G.A., James K.R., Kane B., Grabosky J.C., Detter A. A review of factors that affect the static loadbearing capacity of urban trees // Arboriculture & Urban Forestry. 2017. V. 43. Is. 3. P. 89–106.
- Dahle G.A., Grabosky J.C. Variation in modulus of elasticity (E) along *Acer platanoides* L. (Aceraceae) branches // Urban Forestry & Urban Greening. 2010. V. 9. P. 227–233.
- Fahey R.T., Atkins J.W., Campbell J.L., Rustad L.E., Duffy M., Driscoll Ch.T., Fahey T.J., Schaberg P. G. Effects of an experimental ice storm on forest canopy structure // Canadian J. Forest Research. 2020. V. 50. Is. 2. P. 136–145.
- Fournier M., Dlouhá J., Jaouen G., Almeras T. Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strength // J. Experimental Botany. 2013. V. 64. № 15. P. 4793–4815.
- Green D.W., Evans J.W., Logan J.D., Nelson W.J. Adjusting modulus of elasticity of lumber for changes in temperature // Forest Products J. 1999. V. 49(10). P. 82–94.
- James K.R., Dahle G.A., Grabosky J., Kane B., Detter A. Tree biomechanics literature review: dynamics // Arboriculture & Urban Forestry. 2014. V. 40. Is. 1. P. 1–15.
- James K.R., Haritos N., Ades P.K. Mechanical stability of trees under dynamic loads // American Journal of Botany. 2006. V. 93. Is. 10. P. 1522–1530.
- Jelonek T., Tomczak A., Karaszewski Z., Jakubowski M., Arasimowicz-Jelonek M., Grzywiński W., Kopacz J., Klimek K. The biomechanical formation of trees // Drewno 2019. V. 62. № 204. P. 5–22.
- Klein R.W., Koeser A.K., Kane B., Landry S.M., Shields H., Lloyd S., Hansen G. Evaluating the likelihood of tree failure in Naples, Florida (United States) following hurricane Irma // Forests. 2020. V. 11. Is. 485. P. 1–10.
- Mishiro A., Asano I. Mechanical properties of wood at low temperatures: effect of moisture content and temperature on bending properties of wood. Part I. Moisture content below the fiber saturation point // J. Japan Wood Research Society. 1984a. V. 30(3). P. 207–213.
- Mishiro A., Asano I. Mechanical properties of wood at low temperatures: effect of moisture content and temperature on bending properties of wood. Part II. Moisture content beyond the fiber saturation point // Ibid. 1984b. V. 30(4). P. 277–286.
- Neverova O.A., Legoshchina O.M., Bykov A.A. Anatomy of leaves of *Betula pendula* (Roth.) affected by air emissions in industrial area of Kemerovo city // Middle East J. Scientific Research. 2013. V. 17. Is. 3. P. 354–358.
- Niklas K.J., Spatz H.-C. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density // American J. Botany. 2010. V. 97. Is. 10. P. 1587–1594.
- Niklas K.J., Spatz H.-C. Plant Physics. Chicago: University of Chicago Press, 2012. 426 p.
- Nocetti M., Brunetti M., Bacher M. Effect of moisture content on the flexural properties and dynamic modulus of elasticity of dimension chestnut timber // European J. Wood and Wood Products. 2015. V. 73. P. 51–60.
- Nock C.A., Lecigne B., Taugourdeau O., Greene D.F., Dauzat J., Delagrance S., Messier Ch. Linking ice accretion and crown structure: towards a model of the effect of freezing rain on tree canopies // Annals of Botany. 2016. V. 117. Is. 7. P. 1163–1173.
- Sell J. Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten // Lignum, Bauverlag AG Zürich. 1989. 87 p.
- Sellier D., Fourcaud T. Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds // American J. Botany. 2009. V. 96(5). P. 885–896. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800226>
- Spatz H.-C., Pfisterer J. Mechanical properties of green wood and tree risk assessment // Arboriculture & Urban Forestry. 2013. V. 39(5). P. 218–225.
- Szmutku M.B., Campean M., Laurenzi W. Influence of cyclic freezing and thawing upon spruce wood properties // Pro Ligno. 2012. V. 8(1). P. 35–43.

Szmutku M.B., Campean M., Sandu A.V. Microstructure modifications induced in spruce wood by freezing // *Ibid.* 2011. V. 7. Is. 4. P. 26–31.

Thomas S.C. Size- and age-related changes in tree structure and function // *Tree Physiology*. 2011. Ch. 2. P. 33–64.

Virost E., Ponomarenko A., Dehandschoewercker E., Quere D., Clanet C. Critical wind speed at which trees break // *Physical Review*. 2016. E 93. P. 023001-1–023001-7.

Wood handbook—Wood as an engineering material. Madison: WI, Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

Wood handbook—Wood as an engineering material. Madison: WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 p.

Zelinka S.L., Stone D.S., Rammer D.R. Equivalent circuit modeling of wood at 12% moisture content // *Wood Fiber Science: Journal of the Society of Wood Science and Technology*. 2007. V. 39(4). P. 556–565.

The Impact of Natural Climatic Factors on a Mechanical Stability and Accident Proneness of the Silver Birch Trees in Donetsk City Area

V. O. Korniyenko^{1, *} and V. N. Kalaev²

¹Donetsk National University, Universitetskaya st. 24, Donetsk, 83001 Ukraine

²Voronezh State University, Universitetskaya sq. 1, Voronezh, 394018 Russia

*E-mail: kornienkovo@mail.ru

The research established a correlation between the temperature factor and biomechanical parameters (such as the elasticity modulus) of silver birch (*Betula pendula* Roth) tissues. When the wood thaws, the elasticity modulus decreases on average by 2–2.5 times. This decrease is not uniform, but rather occurs in steps. The rate of elasticity modulus' change speed during the process of thawing of a specimen/trunk of a woody plant has the greatest influence on the mechanical stability of a tree. During thawing, the mechanical stability parameters get reduced by an average of 45%. Such changes are reflected in the angles of the trunk's divergence from the vertical axis, the angles of its skeletal branches relative to the trunk, tree's resistance to bending under wind and gravitational stress. Under the conditions of lower anthropogenic pollution, the bending stiffness of the plant at the age of 40–45 years is up to $22 \pm 2\%$ higher than under the conditions of increased city anthropogenic burden. Under the conditions of anthropogenic stress, the influence of wind, temperature and other weather factors results in the transformation of birch's crown's architectonic, that leads to irreversible deformation or a complete break-off of trunks during blizzards or freezing rains. As a result, during the period from 2014 to 2020, 63 trees fell, and 168 plants underwent irreversible deformation and obtained a high accident risk status on the Donetsk experimental plots. Break-offs were found on plants at a height of 2.4 m (35%), 5.6 m (17%), 7.8 m (52%) and 9 m (6%). The correlation analysis revealed a strong positive relationship between the morphometric coefficient $d : l$ (the ratio of the diameter to the length of the trunk) and mechanical stability ($R = 0.87$), as well as the accident rate ($R = 0.79$) of silver birch trees. In this regard, it seems possible to use the coefficient $d : l$ as a morphometric marker of the silver birch trees' mechanical stability in the conditions of the south of the East European Plain (Donetsk ridge).

Keywords: *Betula pendula* Roth, silver birch, mechanical stability, accident proneness, freezing rain, urban environment, urban plantations.

REFERENCES

- Albrecht A., Badel E., Bonnesoeur V., Brunet Y., Constant T., Defossez P., Langre E., Dupont S., Fournier M., Gardiner B., Mitchell S.J., Moore J.R., Moulia B., Nicoll B.C., Niklas K.J., Schelhaas M., Spatz H.-Ch., Telewski F.W., Comment on "Critical wind speed at which trees break", *Physical review*, 2016, E 94, pp. 067001-1–067001-2.
- Alonso-Serra J., Shi X., Peaucelle A., Rastas P., Bourdon M., Immanen J., Takahashi J., Koivula H., Eswaran G., Murrinen S., Help H., Smolander O., Su Ch., Safronov O., Gerber L., Salojärvi J., Hagqvist R., Mähönen A., Nieminen K., Helariutta Y., Elimäki locus is required for vertical proprioceptive response in birch trees, *Current Biology*, 2020, Vol. 30, Issue 4, pp. 589–599.
- Burgert I., Bernasconi A., Niklas K.J., Eckstein D., The influence of rays on the transverse elastic anisotropy in green wood of deciduous tree, *Holzforschung*, 2001, Vol. 55, Issue 5, pp. 449–454.
- Chistyakova A.A., Zaigol'nova L.B., Poltinkina I.V., Kut'ina I.S., Lshtinskii N.N., *Diagnozy i klyuchi vozrastnykh sostoyanii lesnykh rastenii. Derev'ya i kustarniki* (The keys to diagnosis of the age state of forest plants. Trees and shrubs), Moscow: Prometei, 1989, 106 p.
- Curtis P.S., Gough C.M., Forest aging, disturbance and the carbon cycle, *New Phytol*, 2018, Vol. 219, pp. 1188–1193.
- Dahle G.A., James K.R., Kane B., Grabosky J.C., Detter A., A review of factors that affect the static loadbearing capacity of urban trees, *Arboriculture & Urban Forestry*, 2017, Vol. 43, Issue 3, pp. 89–106.
- Dahle G.A., Grabosky J.C., Variation in modulus of elasticity (E) along *Acer platanoides* L. (Aceraceae) branches,

- Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, Vol. 9, pp. 227–233.
- Fahey R.T., Atkins J.W., Campbell J.L., Rustad L.E., Duffy M., Driscoll Ch.T., Fahey T.J., Schaberg P. G., Effects of an experimental ice storm on forest canopy structure, *Canadian J. Forest Research*, 2020, Vol. 50, Issue 2, pp. 136–145.
- Fournier M., Dlouhá J., Jaouen G., Almeras T., Integrative biomechanics for tree ecology: beyond wood density and strength, *J. Experimental Botany*, 2013, Vol. 64, No. 15, pp. 4793–4815.
- Glukhov A.Z., Kharkhota L.V., Pasternak G.A., Likhatskaya E.N., Sovremennoe sostoyanie dendroflory goroda Donetska (Current state of Donetsk dendroflora), *Samarskii nauchnyi vestnik*, 2016, Vol. 2(15), pp. 20–24.
- Green D.W., Evans J.W., Logan J.D., Nelson W.J., Adjusting modulus of elasticity of lumber for changes in temperature, *Forest Products J.*, 1999, Vol. 49(10), pp. 82–94.
- James K.R., Dahle G.A., Grabosky J., Kane B., Detter A., Tree biomechanics literature review: dynamics, *Arborealiculture & Urban Forestry*, 2014, Vol. 40, Issue 1, pp. 1–15.
- James K.R., Haritos N., Ades P.K., Mechanical stability of trees under dynamic loads, *American J. Botany*, 2006, Vol. 93, Issue, 10, pp. 1522–1530.
- Jelonek T., Tomczak A., Karaszewski Z., Jakubowski M., Arasimowicz-Jelonek M., Grzywiński W., Kopaczyk J., Klimek K., The biomechanical formation of trees, *Drewno*, 2019, Vol. 62, No. 204, pp. 5–22.
- Klein R.W., Koeser A.K., Kane B., Landry S.M., Shields H., Lloyd S., Hansen G., Evaluating the likelihood of tree failure in Naples, Florida (United States) following hurricane Irma, *Forests*, 2020, Vol. 11, Issue 485, pp. 1–10.
- Kofman G.B., *Rost i forma derev'ev* (Growth and form of trees), Novosibirsk: Nauka, 1986, 210 p.
- Kornienko V.O., Kalaev V.N., Elizarov A.O., Vliyanie temperatury na biomekhanicheskie svoistva drevesnykh rastenii v usloviyakh zakrytogo i otkrytogo grunta (The influence of temperature on biomechanical properties of woody plants in the conditions of protected and open grounds), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2018, No. 6, pp. 91–102.
- Kornienko V.O., Kalaev V.N., *Mekhanicheskaya ustoichivost' drevesnykh porod i rekomendatsii po predotvrashcheniyu ikh avariinosti v gorodskikh nasazhdeniyakh* (Mechanical stability of tree species and recommendations for preventing their accident rate in urban plantings), Voronezh: Roza Vetrov, 2018, 92 p.
- Kornienko V.O., Netsvetov M.V., Krioskopiya vlagi i temperaturnaya zavisimost' modulya uprugosti drevesiny (Cryoscopy of wood moisture and temperature dependence of wood elasticity modulus), *Visti Biosfernogo zapovidnika "Askaniya-Nova"*, 2014, Vol. 16, pp. 88–94.
- Kornienko V.O., Netsvetov M.V., Vliyanie otritsatel'nykh temperatur na mekhanicheskuyu ustoichivost' duba krasnogo (*Quercus rubra* L.) (The influence of negative temperatures on the mechanical resistance of red oak (*Quercus rubra* L.)), *Promyshlennaya botanika*, 2013, Vol. 13, pp. 180–186.
- Kornienko V.O., Netsvetov M.V., Nikulina V.M., Suslova O.P., Doslidzhennya stiikosti derev do vibratsii (Investigation of the trees' endurance for vibrations), *Visnik L'vivskogo universitetu. Seriya fizichna*, 2009, No. 44, pp. 185–193.
- Mikheeva M.A., Fedorova A.I., Vliyanie vysokikh temperatur na ustoichivost' drevesnykh rastenii v gorodskoi srede (Effect of high temperatures on the stability of trees in urban environments), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2011, No. 2, pp. 166–175.
- Mishiro A., Asano I., Mechanical properties of wood at low temperatures: effect of moisture content and temperature on bending properties of wood. Part I. Moisture content below the fiber saturation point, *J. Japan Wood Research Society*, 1984a, Vol. 30(3), pp. 207–213.
- Mishiro A., Asano I., Mechanical properties of wood at low temperatures: effect of moisture content and temperature on bending properties of wood. Part II. Moisture content beyond the fiber saturation point, *Ibid*, 1984b, Vol. 30(4), pp. 277–286.
- Netsvetov M.V., Suslova E.P., Mekhanicheskaya ustoichivost' derev'ev i kustarnikov k vibratsionnym nagruzkam (Mechanical stability of trees and shrubs under vibration loads), *Promyshlennaya botanika*, 2009, No. 9, pp. 60–67.
- Netsvetov M.V., Suslova E.P., Nikulina V.M., Kornienko V.O., Mekhanicheskaya ustoichivost' derev'ev k antropogennym vibratsionnym nagruzkam (Mechanical resistance of trees to anthropogenic vibration loads), *Physical methods in ecology, biology and medicine*, Program and Proc. of II International Conf., Lviv–Vorokhta, Ukraine, September 2–6, 2009, Lviv: Vidavniczii tsentr LNU im. I. Franka, pp. 22–23.
- Neverova O.A., Legoshchina O.M., Bykov A.A., Anatomy of leaves of *Betula pendula* (Roth.) affected by air emissions in industrial area of Kemerovo city, *Middle East J. Scientific Research*, 2013, Vol. 17, Issue 3, pp. 354–358.
- Niklas K.J., Spatz H.-C., Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density, *American J. Botany*, 2010, Vol. 97, Issue 10, pp. 1587–1594.
- Niklas K.J., Spatz H.-Ch., *Plant Physics*, Chicago: University of Chicago Press, 2012, 426 p.
- Nocetti M., Brunetti M., Bacher M., Effect of moisture content on the flexural properties and dynamic modulus of elasticity of dimension chestnut timber, *European J. Wood and Wood Products*, 2015, Vol. 73, pp. 51–60.
- Nock C.A., Lecigne B., Taugourdeau O., Greene D.F., Dauzat J., Delagrangé S., Messier Ch., Linking ice accretion and crown structure: towards a model of the effect of freezing rain on tree canopies, *Annals of Botany*, 2016, Vol. 117, Issue 7, pp. 1163–1173.
- Polyakov A.K., *Introduktsiya drevesnykh rastenii v usloviyakh tekhnogennoi sredy* (Introduction of woody plants in a technogenic environment), Donetsk: Noulidzh, 2009, 268 p.
- Razdorskii V.F., *Arkhitektonika rastenii* (Plant architectonics), Moscow: Sovetskaya nauka, 1955, 432 p.

- Sarbaeva E.V., Voskresenskaya O.L., Voskresenskii V.S., available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=9011> (April 27, 2020).
- Savel'eva L.S., *Ustoichivost' derev'ev i kustarnikov v zashchitnykh lesnykh nasazhdeniyakh* (Resilience of trees and shrubs in protective forest stands), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1975, 168 p.
- Sell J., *Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten*, Lignum, Baufachverlag AG Zürich. 1989, 87 p.
- Sellier D., Fourcaud T., Crown structure and wood properties: influence on tree sway and response to high winds, *American J. Botany*, 2009, Vol. 96(5), pp. 885–896, DOI 10.3732/ajb.0800226
- Spatz H.-C., Pfisterer J., Mechanical properties of green wood and tree risk assessment, *Arboriculture & Urban Forestry*, 2013, Vol. 39(5), pp. 218–225.
- Suslova O.P., Polyakov O.K., Netsvetov M.V., Dats'ko O.M., Likhats'ka O.M., Zhitezdatnist' derevnikh roslin u mis'kikh vulichnikh nasazhennyakh na pivdennomu skhodi Ukraïni (Viability of woody plants in urban street stands in the South-East of Ukraine), *Promyshlennaya botanika*, 2012, Vol. 12, pp. 12–18.
- Szmutku M.B., Campean M., Laurenzi W., Influence of cyclic freezing and thawing upon spruce wood properties, *Pro Ligno*, 2012, Vol. 8(1), pp. 35–43.
- Szmutku M.B., Campean M., Sandu A. V., Microstructure modifications induced in spruce wood by freezing, *Ibid*, 2011, Vol. 7, Issue 4, pp. 26–31.
- Thomas S.C., Size- and age-related changes in tree structure and function, *Tree Physiology*, 2011, Ch. 2, pp. 33–64.
- Viro E., Ponomarenko A., Dehandschoewercker E., Quere D., Clanet C., Critical wind speed at which trees break, *Physical Review*, 2016, E 93, pp. 023001-1–023001-7.
- Wood handbook—Wood as an engineering material*, Madison: WI, Forest Products Laboratory, 2010, 508 p.
- Wood handbook—Wood as an engineering material*, Madison: WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999, 463 p.
- Zelinka S.L., Stone D.S., Rammer D.R., Equivalent circuit modeling of wood at 12% moisture content, *Wood Fiber Science: J. Society of Wood Science and Technology*, 2007, Vol. 39(4), pp. 556–565.

**IX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
“ЛЕСНЫЕ ПОЧВЫ И ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА”
(РОССИЯ, ОНЛАЙН-ЗАСЕДАНИЯ, 21–24 СЕНТЯБРЯ 2021 г.)**

DOI: 10.31857/S0024114822030093

Конференция по лесному почвоведению является научной площадкой, для обсуждения результатов исследований в области лесного почвоведения и лесной биогеоценологии, знакомства с новыми методами и инструментами, поиска решений возникающих в ходе исследований проблем, а также для обмена опытом.

На IX Всероссийской научной конференции с международным участием “Лесные почвы и изменение климата” участвовало более 100 человек, среди них члены РАН, доктора и кандидаты наук, молодые ученые. Научная программа включала 8 пленарных и 75 устных докладов. Большое внимание уделено использованию междисциплинарных подходов к решению проблем лесного почвоведения в современных условиях изменения климата, а также решению прикладных научных задач с учетом необходимости адаптации к этим изменениям.

На конференции обсуждались фундаментальные научные проблемы по следующим направлениям:

- механизмы комбинированного влияния растительности, животных и микроорганизмов на экосистемные функции лесных почв;
- применение методов математического моделирования для оценки экосистемных функций лесных почв;
- пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем;
- оценка и прогноз динамики функций лесных почв в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов;
- влияние истории землепользования и климата на лесные почвы;
- лесоразведение, лесовосстановление и свойства почв.

В рамках конференции проведен семинар “Методические вопросы по организации карбоновых полигонов в лесах”. На семинаре обсуждались вопросы организации и методологии работы по проектам карбоновых полигонов. Отмечена необходимость создания методического центра, координирующего исследования на организо-

ванных полигонах, включая методы сбора, анализа, обработки данных, интеграцию данных в общую сеть мониторинга, координацию разработки методов секвестрации углерода, включая инновации в лесохозяйственных и сельскохозяйственных практиках и другие мероприятия.

В ходе работы конференции участники обозначили ряд пробелов в знаниях, которые необходимо устранить, для решения важных фундаментальных и прикладных задач. Одним из пробелов является отсутствие классификации форм гумуса, которую необходимо разработать на основе отечественных и зарубежных подходов для введения этой информации в классификацию почв России. Отмечено, что при диагностике лесных почв зачастую не учитываются компоненты почвенной биоты, включая почвенных сапрофагов. Особое внимание следует уделить структуре и функциям грибов – микоризообразователей, процессам в ризосфере, которые регулируют биогеохимические циклы и естественное плодородие почв. Важно диагностировать пирогенную историю землепользования, поскольку пожары являются фактором утраты биоразнообразия и функций лесных почв. Участники конференции также обозначили необходимость создания интеграционной научной инфраструктуры для исследований лесных почв России. Очевидна необходимость подготовки научно обоснованного учебного пособия по теоретическим и прикладным аспектам лесного почвоведения, рекомендуемого для подготовки кадров на экологических, биологических и лесохозяйственных факультетах высших учебных заведений.

По итогам работы конференции, на основе обсуждения пленарных, секционных докладов и вопросов семинара, сформулированы предложения для дальнейшего развития, которые внесены в Резолюцию конференции:

- 1) создать интегрированную сеть лесных стационаров для внедрения интеграционной научной инфраструктуры;

2) создать национальные базы данных по лесным почвам для развития возможностей использования технологий big data;

3) создать “Методический центр по вопросам организации исследований на карбоновых полигонах в лесах” для организации интегральной системы оценки климаторегулирующих функций почв в лесах России с согласованием применяемых методик;

4) разработать Федеральную программу развития агролесомелиорации и агролесоводства в борьбе с опустыниванием на основе “Стратегии развития защитного лесоразведения в Российской Федерации на период до 2025 г.” (разработанная ФНЦ агроэкологии РАН);

5) восстановить образовательные программы по агролесомелиорации и агролесоводству для подготовки квалифицированных кадров в современных условиях глобальных климатических изменений в рамках специализаций “Лесная мелиорация и защитное лесоразведение”, восстановить

лесомелиоративные и лесохозяйственные факультеты;

б) ввести специальные образовательные курсы по лесному почвоведению в программу подготовки кадров высшей квалификации на биологических и лесохозяйственных факультетах высших учебных заведений.

В специальном выпуске журнала “Лесоведение” опубликованы статьи, по результатам исследований комбинированного влияния природных (абиотических и биотических) и антропогенных факторов на динамику лесных почв. Такие исследования позволяют раскрыть механизмы динамики лесных почв и служат основой для краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования динамики лесных почв в условиях изменения климата.

А.П. Гераськина, А.И. Кузнецова, Н.В. Лукина*

**E-mail: angersgma@gmail.com*