

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4:574.4:504.06

АНАЛИЗ ЭКОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЧВ
ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ
В ЗОНЕ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННЫХ ЛЕСОВ

© 2023 г. Г. Н. Копцик^а, * (ORCID: 0000-0003-4142-3571), И. Е. Смирнова^а, С. В. Копцик^б

^аФакультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, Москва, 119991 Россия

^бФизический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, Москва, 119991 Россия

*e-mail: koptsik@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2023 г.

После доработки 26.05.2023 г.

Принята к публикации 27.05.2023 г.

Достоверная оценка состава и свойств почв в лесных экосистемах является основой экологического мониторинга, включая мониторинг пулов и потоков углерода, приобретающего особое значение в условиях глобальных изменений природной среды и климата. Проанализированы эколого-генетические особенности и уточнена классификационная принадлежность почв на стационарных участках интенсивного мониторинга в основных типах лесных экосистем государственного природного заказника “Звенигородская биостанция МГУ и карьер Сима” (Московская область, Россия). Мониторинг почв организован и проводится с учетом рекомендаций Международной совместной программы по оценке и мониторингу воздействия загрязнения воздуха на леса (ICP Forests). Доминирующие в почвенном покрове заказника элювоземы и дерново-элювоземы на двучленных отложениях характеризуются легким гранулометрическим составом (содержание илистой фракции <0.002 мм 3.3–7.0%), кислой реакцией (рН_{H₂O} 4.6–5.7), низкой емкостью катионного обмена, невысоким содержанием обменных оснований (0.6–7.5 смоль(+)/кг в минеральных горизонтах и 30–52 смоль(+)/кг в подстилках) и низкой степенью насыщенности (11–51 и 49–67% соответственно). Содержание потенциально токсичных металлов (Pb, Cd, Cu, Ni и Zn) в почвах заказника не превышает фоновых уровней. Экологическое состояние почв, оцененное на основании совокупности их химических и физических свойств, улучшается в ряду: элювозем контактно-осветленный – дерново-элювозем псевдофибровый – дерново-элювозем ожелезненный, влияя на функционирование и устойчивость лесных экосистем к внешним воздействиям в условиях нарастающей антропогенной нагрузки и изменения климата.

Ключевые слова: экологическое состояние почв, элювозем, дерново-элювозем, Dystric Cambisol, двучленные породы, хвойно-широколиственные леса, Звенигородская биостанция МГУ

DOI: 10.31857/S0032180X23600592, **EDN:** UKBCZF

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние и динамика лесных экосистем в условиях изменения климата отражают совокупное воздействие многочисленных факторов, включающих метеорологические и почвенные условия, патологические агенты, лесные пожары и загрязнение окружающей среды [22, 26, 34]. Нарушения лесных экосистем могут быть в значительной степени связаны с состоянием почв, их питательным режимом и уровнем загрязнения [26]. Изменения свойств почв в результате антропогенного подкисления, истощения или загрязнения способны оказать влияние на структуру, функционирование и динамику растительных сообществ. Поскольку основные изменения почв приурочены к слою лесной подстилки и верхним минеральным горизонтам, особый

стресс от негативного воздействия могут испытывать деревья с поверхностной корневой системой, в том числе ель, древесный подрост и напочвенный покров. Дополнительный вклад в угнетение лесного фитоценоза вносит нарушение микоризообразования, которое играет важную роль в обеспечении древесных растений питательными веществами [17]. Изменение эдафических условий может также затруднять прорастание семян и, следовательно, нарушать процессы естественного возобновления в растительном сообществе. В итоге свойства почв, прямо или косвенно, могут влиять на климаторегулирующие функции лесных экосистем, их способность к поглощению углерода. Внимание к эдафическим аспектам нашло отражение в учении об экологических функциях почв, экологическом почвоведении [5] и

эдафологии – науке о почве как среде обитания живых организмов [19]. Прикладная значимость изучения разнообразия и современной динамики свойств лесных почв обусловлена востребованностью в лесоводстве и природопользовании в целом [19], в поддержании биоразнообразия [26, 28], в оценках последствий природных и антропогенных нарушений [25–27, 35] и трансформации экосистем в условиях глобальных изменений природной среды и климата [19, 34, 36].

В этой связи большое значение приобретает проведение длительного систематического мониторинга почв в лесных экосистемах. К настоящему времени национальная оценка состояния лесов на основе полевой инвентаризации и/или дистанционного зондирования проведена в 112 странах, охватывающих 83% площади лесов мира [29]. Однако лесным почвам уделяется недостаточно внимания. Наиболее представительной является Международная совместная программа по оценке и мониторингу воздействия загрязнения воздуха на леса (ICP Forests), действующая в Европе с 1985 г. в рамках Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. ICP Forests включает экстенсивный (около 6000 участков в сети 16 × 16 км) и интенсивный (около 860 участков в основных типах лесных экосистем) мониторинг [27, 35]. В России, обладающей пятой частью лесов мира [30], необходимость мониторинга окружающей среды закреплена законодательно на федеральном (Федеральный закон “Об охране окружающей среды” № 7-ФЗ от 10.01.2002 (ред. от 30.12.2021)) и региональном (“Об охране окружающей среды в Московской области” № 16/202-П от 13.12.2006) уровнях. Дальнейшее развитие вопросы мониторинга состояния окружающей среды и климата получили в недавно принятой Федеральной научно-технической программе в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021–2030 гг.

В целом экологическая ситуация Центральной эколого-экономической зоны Московской области, куда входит район исследований, уже к концу XX в. имела кризисный характер, природные системы практически полностью утратили способность к самовосстановлению, в земельном фонде возросла доля антропогенно-измененных почв, снизилась доля почв ненарушенных природных ландшафтов [13]. Государственный природный заказник “Звенигородская биостанция МГУ и карьер Сима” (ЗБС) – уникальный природный комплекс, сохранивший, несмотря на близость к Москве, высокое биологическое разнообразие [15]. Лесные экосистемы заказника являются эталоном для территории области. Одновременно заказник служит учебно-научной базой Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Проведение на

территории заказника интенсивного почвенно-экологического мониторинга в соответствии с рекомендациями ICP Forests позволяет получить объективную и полную информацию о состоянии лесных экосистем по единым международным принципам и методам [9].

Цель работы – анализ эколого-генетических особенностей лесных почв для уточнения их классификационной принадлежности и оценки устойчивости к внешним воздействиям в условиях изменений как природных, так и антропогенных факторов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Природные условия. Государственный природный заказник “Звенигородская биостанция МГУ и карьер Сима” расположен в южной части Смоленско-Московской возвышенности вне пределов распространения последнего оледенения. На его территории отчетливо выделяются водораздельное плато, древние террасы и современная пойма р. Москвы. Водораздельное плато покрыто мощным чехлом среднеплейстоценовых флювиогляциальных отложений, представленных песками с редкой галькой. В западной части плато выходящие на поверхность флювиогляциальные отложения, в верхней части супесчаные, служат почвообразующими породами. В восточной части территории они прикрыты маломощным (30–40 см) чехлом отсортированного суглинка; почвообразующие породы представлены здесь двучленным наносом [16].

Район Звенигорода входит в зону хвойно-широколиственных лесов. 83% площади биостанции (600 га), занятые водоразделом, покрыты преимущественно хвойными лесами, прежде всего еловыми [15]. В настоящее время роль еловых лесов заметно снизилась в связи с массовой гибелью ели, распадом еловых древостоев и санитарными рубками. Распространены смешанные леса, березняки и осинники.

Почвенный покров характеризуется значительным разнообразием. На пестрых почвообразующих породах водораздельного плато распространены почвы подзолистого, дерново-глеевого, болотно-подзолистого и торфяных болотных типов [4, 8, 10, 11, 16]. Нынешний облик, свойства и разнообразие почв обусловлены сочетанием различных природных и антропогенных факторов, действовавших на протяжении последних тысячелетий. Биомы лесостепи и широколиственных лесов, распространенные здесь в первой половине голоцена, во второй половине сменились южно-таежными, а темногумусовые почвы – серогумусовыми и дерново-подзолистыми; в последние века в пойме сформировались аллювиальные почвы [1]. Издавна происходило массовое выжи-

гание лесов под пастбища, а позднее – и под пашню. Современный лесной покров на территории ЗБС сформировался под влиянием выборочных и сплошнолесосечных рубок XIX в. и сельскохозяйственной деятельности, в том числе выпаса и ежегодного сенокосения [2].

Контрольные участки мониторинга были заложены в основных типах лесных экосистем водораздельного плато (табл. 1).

Полевые методы. Исследование твердой фазы почв проводили в соответствии с рекомендациями международной программы мониторинга ICP Forests [24, 32]. Образцы почв отбирали на каждом из трех участков мониторинга размером 30×40 м, разбитых на квадраты 10×10 м, в 24-кратной повторности. Точки отбора выбирали систематическим случайным образом. Образцы отбирали с помощью бура из подстилки и с глубин 0–5, 5–10, 10–20, 20–40, 40–80 см; указанные унифицированные глубины в первом приближении соответствовали генетическим горизонтам исследованных почв. Для химических анализов 24 индивидуальных образца каждого горизонта объединяли по шесть в четыре смешанных образца. Всего в трех типах лесных экосистем отобрали 432 индивидуальных образца почв, из которых приготовили 72 смешанных образца почв для анализов. Перед анализами образцы просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм.

Аналитические методы. Гранулометрический состав определяли методом пипетки по соотношению содержания трех фракций: <0.002 , $0.002–0.063$ и $0.063–2$ мм. Удаление цементирующих компонентов проводили 30%-ным раствором H_2O_2 . Для диспергации использовали 3.3% ($NaPO_3$)₆ и 0.7% Na_2CO_3 .

Экстракцию элементов (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) для определения их “псевдовалового” содержания проводили смесью концентрированных соляной и азотной кислот в соотношении 3 : 1 (“царская водка”, международный стандарт ISO 11466). Содержание металлов определяли после окисления смесью концентрированных кислот в течение 16 ч при комнатной температуре и 2 ч при кипячении. Полученные экстракты фильтровали и разбавляли 0.5 М раствором HNO_3 , после чего измеряли концентрацию металлов методом масс-спектропии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS 7500a, Agilent). Содержание оксалаторастворимых Al_O , Fe_O и Mn_O измеряли после извлечения смесью $(COONH_4)_2H_2O$ и $(COOH)_2H_2O$ (с концентрацией оксалат-ионов 0.2 М и pH 3) с помощью ICP MS. Содержание обменных катионов (Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn) определяли в вытяжке 0.1 М раствором $BaCl_2$ тем же методом. Кислотность почв измеряли в водной и солевых (0.01 М $CaCl_2$ и 1 М

KCl) суспензиях при соотношении почва : раствор 1 : 5 потенциметрически на иономере Mettler-Toledo Seven Multi с электродом Mettler Toledo Inlab 413. Обменную кислотность определяли титрованием в вытяжке 0.1 М $BaCl_2$, гидролитическую – в вытяжке 1 М CH_3COONa при pH 8.2. Эффективную (реальную) емкость катионного обмена рассчитывали как сумму обменных катионов и обменной кислотности.

Результаты обрабатывали методами описательной статистики, предполагая нормальность распределения свойств смешанных образцов почв. Значимость различий средних оценивали по классическому двухвыборочному *t*-критерию для независимых выборок, основанному на распределении Стьюдента. Использовали альтернативный вариант этого критерия для ситуации с неравными дисперсиями как более жесткий, приводящий к несколько меньшему (на $\approx 10\%$) количеству пар значимо различающихся свойств. Проводили также корреляционный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологические свойства и диагностика почв. В соответствии с традиционной, преимущественно факторной диагностикой в классификации почв СССР [6] основу почвенного покрова заказника составляют кислые подзолистые и дерново-подзолистые почвы, типичные для таежно-лесной зоны. Поверхностный горизонт почв представлен лесной подстилкой, запасы которой возрастают от березово-елового (0.87 кг/м^2) к сложному сосново-еловому (1.2 кг/м^2) и сложному еловому (1.6 кг/м^2) лесам. Строение минеральной части почв позволяет отнести их к подтипам подзолистых и дерново-подзолистых почв в соответствии с [6].

Характерной особенностью почв водораздела является выраженная гранулометрическая неоднородность вследствие формирования на двучленных почвообразующих породах, в которых верхний суглинистый нанос подстиляется песками и супесями, – “обратных двучленах”. Специфика профиля этих почв заключается в наличии под органическим или гумусово-аккумулятивным горизонтом осветленного элювиального горизонта, который, при отсутствии срединных горизонтов, сменяется подстилающей породой. В соответствии с субстантивно-генетической классификацией почв России [7] почвы со слабоили недифференцированными по элювиально-иллювиальному типу профилями на двучленных породах относятся к отделу элювиальных почв – элювоземам и дерново-элювоземам. При этом в почвах под сложным сосново-еловым лесом в нижней части элювиального горизонта наблюдается отбеливание в результате периодического за-

Таблица 1. Почвы на участках интенсивного мониторинга лесных экосистем ЗБС

Классификация и диагностика почв СССР (1977)		Классификация почв России (2004)		Глубина, см	Глубина отбора образцов, см	WRB (2014) почва
почва	горизонт	почва	горизонт			
Сложный сосново-еловый разнотравно-кисличный лес (5E4C1B)						
Глубокоподзолистая легкосуглинистая почва на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями	A ₀	Элювом контактно-осветленный сверхглубокоэлювиальный сильноненасыщенный легкосуглинистый на двучленных отложениях	O	0–1.5(2.5)	O	Dystric Cambisol (Endogeoabruptic, Ochric, Nechic)
	A ₁ A ₂		A _{Ye1}	1.5–4	0–5	
	A ₂		ELf EL	4–12 12–48	5–10 10–20 20–40	
	IIВ ₁ IIВ ₂ (f) IIС		Del Df D	48–60 60–99 99–136 и глубже	40–80	
Березово-еловый разнотравно-костянично-кисличный лес (5E4B1Oс)						
Слабодерново-глубокоподзолистая легкосуглинистая почва на покровных суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями	A ₀	Дерново-элювом ожелезненный маломощный глубокоэлювиальный сильноненасыщенный легкосуглинистый на двучленных отложениях	O	0–2	O	Dystric Cambisol (Endogeo-abruptic, Anoloamic, Ochric, Nechic)
	A ₁		A _Y	2–6	0–5	
	A ₁ A ₂		A _{Ye1}	6–10	5–10	
	A ₂		ELf	10–16	10–20	
	IIA ₂ B		Del	16–36	20–40	
	IIВ ₁ (f) IIВ ₂ IIС		Df1 Df2 D	36–51 51–77 77–106 106–150 и глубже	40–80	
Сложный еловый разнотравно-кисличный лес (8E2Oс + Лп)						
Слабодерново-подзолистая слабодифференцированная легкосуглинистая почва на суглинках, подстилаемых флювиогляциальными отложениями	A ₀	Дерново-элювом псевдофибровый маломощный сильноненасыщенный супесчаный на двучленных отложениях	O	0–3(4)	O	Dystric Cambisol (Endogeoabruptic, Endoarenic, Ochric)
	A ₁		A _Y	3(4)–6(8)	0–5	
	A ₁ A ₂		A _{Ye1}	6(8)–22	5–10	
	A ₂ B		ELf	22–54	10–20 20–40	
	IIВ(f) IIВC(f) IIС(f)		Df Df1 Df2	54–84 84–107 107–152 и глубже	40–80	

стаивания влаги на контакте с уплотненной подстилающей толщей, в верхней части которой проявляются признаки элювиальной деградации в виде белесых языков, что позволяет отнести их к элювоземам контактно-осветленным. Почвы под березово-еловым лесом, вместе с наличием серо-гумусового горизонта, отличаются желтовато-охристыми тонами окраски подстилающей породы, указывающими на аккумуляцию оксидов железа, что позволяет диагностировать их как дерново-элювоземы иллювиально-ожеженненные (ожеженненные). Наряду с ними на более легких двучленах под сложным еловым лесом формируются дерново-элювоземы, которые по наличию в подстилающей песчаной породе ржаво-охристых уплотненных, сцементированных оксидами железа тонких извилистых прослоек диагностируются как псевдофибровые.

Согласно WRB [14], исследуемые почвы относятся к одной реферативной почвенной группе – Cambisols (Dystric Cambisol, табл. 1). Это доминирующая (22.9%) группа в лесах Европы, согласно данным широкомасштабной почвенной съемки BioSoil, охватывающей соответственно 4928 и 127 участков мониторинга 1-го (экстенсивного) и 2-го (интенсивного) уровней программы ICP Forests [25]. Примерно такую же долю составляют Cambisols во всесторонней базе данных мониторинга лесных экосистем ICP Forests, включающей до 130 почвенных свойств совместно с динамическими показателями состава почвенных вод, осадков, опада, растительности, атмосферного воздуха и метеорологических условий на 286 участках мониторинга 2-го уровня [27].

Физические и химические свойства почв наследуются от почвообразующих пород и изменяются в процессе почвообразования. Легкий гранулометрический состав пород и их двучленность определяют строение и свойства исследуемых почв. Во всех горизонтах преобладают песчаные и пылеватые фракции (рис. 1). Все почвы сформированы на обратных двучленах, представленных легкими покровными суглинками, подстилаемыми флювиогляциальными песками и супесями. В элювоземе контактно-осветленном и дерново-элювоземе ожеженненном содержание песчаных фракций возрастает в среднем от 45–60% в верхних горизонтах до 71–81% в нижних, в этом же направлении уменьшается содержание пылеватых (от 36–50 до 16–25%) и илистой (от 3.9–7.0 до 3.3–4.1%) фракций. Таким образом, верхние слои опесчаненного суглинка (легкого суглинка, местами до пылеватого суглинка) на глубине около 40 см сменяются пылеватым песком (супесью). Дерново-элювозем псевдофибровый характеризуется более легким гранулометрическим составом и его меньшей дифференциацией по профилю. Содержание песчаных фракций с глубиной возрастает (от 56–63 до 83%), а пыли (от 35–39 до

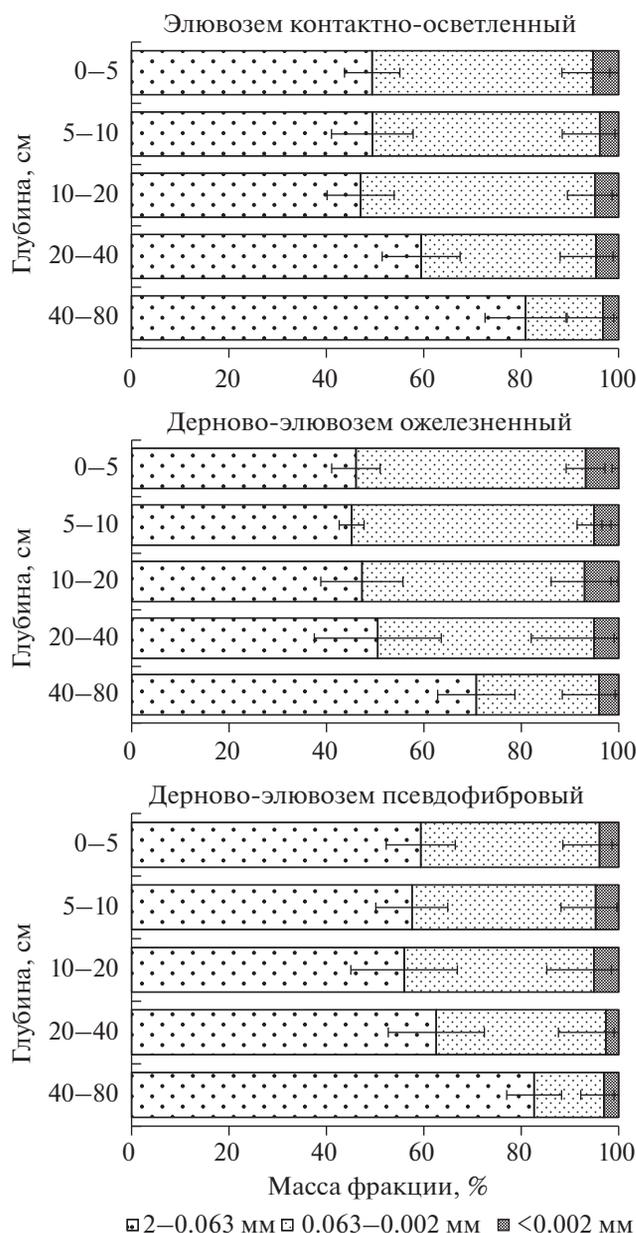


Рис. 1. Гранулометрический состав почв. Здесь и далее приведены средние и их 95%-ные доверительные интервалы.

14%) и ила (от 3.9–5.1 до 2.7–3.1%) снижается. В целом гранулометрический состав облегчается в ряду: дерново-элювозем ожеженненный – элювозем контактно-осветленный – дерново-элювозем псевдофибровый. Эти данные хорошо согласуются с результатами исследования лесных почв Европы, где Cambisols преимущественно распространены на пылеватых суглинках, суглинках или опесчаненных суглинках [25].

Выход элементов при определении их “псевдовалового” содержания с помощью экстракции “царской водкой” различается в зависимости от ис-

следуемого элемента и свойств почв. При этом высвобождаются элементы, находящиеся в составе аморфных и органических соединений, а также слоистых силикатов (преимущественно железосодержащих). Разложение с помощью “царской водки” считается подходящим для анализа извлекаемых из почв как макро-, так и микроэлементов и оценки их максимально возможной доступности для растений [23, 33]. По данным [31], в грубых песчаных и супесчаных почвах “царской водкой” вытесняется до 95% Cu, Ni и Zn, до 80% Cd и до 60% Cr и Pb. При этом смесь концентрированных HCl и HNO₃ вытесняет большее количество элементов из почв более тяжелого гранулометрического состава [20]. В настоящее время этот метод широко используется для определения “псевдовалового” состава почв в экологических исследованиях [23], геохимическом картографировании [33] и международных программах мониторинга [24].

В подстилках на первое место по количеству экстрагируемых “царской водкой” элементов выходит Ca, за ним следуют Mn, Fe, Al, K и Mg (табл. 2). Стоит отметить, что в подстилках валовое содержание элементов и их количество, экстрагируемое “царской водкой”, очень близки. Наиболее богата макро- (Ca, Mg, K) и микроэлементами (Mn, Zn, Cu, Ni) подстилка дерново-элювозема березово-елового леса, тогда как подстилка дерново-элювозема сложного ельника обогащена K, Fe, Al, а также Pb.

В кислотных экстрактах из всех минеральных горизонтов преобладают Fe и Al, которыми в наибольшей степени обогащен сравнительно утяжеленный по гранулометрическому составу дерново-элювозем ожелезненный. Профильная дифференциация Fe и Al в нем выражена слабо вследствие относительно небольшой литолого-гранулометрической дифференциации пород. Распределение Fe и Al по профилю двух других почв отражает, в первую очередь, литолого-гранулометрическую неоднородность двучленных отложений. В профиле элювозема контактно-осветленного содержание Fe постепенно увеличивается с продвижением вглубь легкосуглинистой толщи и резко сокращается в подстилающих супесчаных флювиогляциальных отложениях. В пределах верхней легкосуглинистой толщи проявляется обеднение Al слоя 5–10 см и его накопление в слое 20–40 см, возвращающееся к минимуму со сменой пород. Сходное профильное распределение Fe и Al свойственно и дерново-элювозему псевдофибровому.

Распределение других металлов в минеральной толще отражает влияние как биотического фактора, так и литолого-гранулометрической неоднородности. Для всех почв характерна биогенная аккумуляция Ca и K не только в подстилке,

но и в подподстилочном слое. Содержание Mg в минеральных слоях близко или чуть выше такового в подстилках, а Na практически не различается между слоями, что характерно и для лесных почв Европы [25]. Среди потенциально токсичных металлов содержание Pb, Cd, Zn и Mn максимально в верхних горизонтах и уменьшается с глубиной, отражая как вероятное поступление с атмосферными выпадениями (Pb, Cd), так и преимущественно биогенное накопление (Mn, Zn). Содержание Ni и Co, напротив, нарастает с глубиной, свидетельствуя об их геогенном происхождении. Содержание большинства металлов в элювоземе резко снижается на глубине 50–80 см с облегчением гранулометрического состава при смене пород. В дерново-элювоземах изменения по профилю менее выражены.

По сравнению с лесными почвами Европы [25] подстилки содержат среднее количество биогенных элементов – Ca, Mg, K, Fe, Zn, тогда как легкие по гранулометрическому составу минеральные горизонты – пониженные. Все почвы сравнительно обогащены Na и Mn и обеднены Cu, Ni и Pb. Содержание всех потенциально токсичных металлов – Cd, Cu, Ni, Pb и Zn – очень низкое и низкое, даже с учетом неполноты извлечения, соответствует их валовым уровням в фоновых почвах региона [13].

Изучение содержания и профильного распределения оксалаторастворимых Al_o, Fe_o и Mn_o, как наиболее молодых, свежесожденных соединений, характеризующих современные процессы почвообразования, позволяет уточнить классификационную принадлежность почв. Минимальное количество этих соединений отмечено в органических горизонтах. Выход Fe_o составил до 2200–2500 мг/кг в верхних минеральных слоях и до 850–1030 мг/кг в нижнем (50–80 см) слое почв или соответственно до 27–33 и 12–17% от “псевдовалового” содержания. Абсолютный и относительный выход Al_o вдвое меньше по сравнению с Fe_o в верхней части и не отличается в нижней части профиля.

Специфической чертой исследуемых почв является аккумулятивное распределение оксалаторастворимых Fe и Al по профилю с максимумами в серогумусовом и элювиальном горизонтах, обусловленное литологической неоднородностью – формированием на двучленных отложениях с тяжелым верхним наносом (рис. 2). В горизонтах AY, AYel, ELf и EL содержание Fe_o выше, чем в горизонте D, в 1.6–2.6 раз, Al_o – до 1.5 раз. Такая специфика не позволяет исследуемым почвам соответствовать критериям текстурно-дифференцированных и разрешает отнести их к отделам элювиальных и железисто-метаморфических почв [7]. Наиболее выраженное прогрессивно-аккумулятивное распределение по профилю свойственно

Таблица 2. Содержание экстрагируемых “царской водкой” элементов в почвах лесных экосистем ЗБС: *M* – среднее, *CI*_{1/2} – полуширина 95% доверительного интервала среднего, *n* = 4 (смешанных из 6 индивидуальных образцов)

Глубина, см	Параметр	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Mn	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
		г/кг								мг/кг			
Элювозем контактно-осветленный													
0	<i>M</i>	7.38	0.85	1.46	0.09	1.57	1.58	2.20	1.00	2.5	4.1	8.2	53
	<i>CI</i> _{1/2}	1.85	0.18	0.20	0.04	0.42	0.38	0.82	0.56	1.3	1.3	2.6	19
0–5	<i>M</i>	0.71	0.97	1.14	0.11	6.69	6.73	0.56	0.05	2.6	5.1	12.5	25
	<i>CI</i> _{1/2}	0.30	0.06	0.08	0.03	0.23	0.09	0.27	0.03	0.7	0.5	5.4	4.4
5–10	<i>M</i>	0.91	0.88	0.63	0.13	5.40	7.17	0.83	0.11	2.6	5.6	15.8	29
	<i>CI</i> _{1/2}	0.56	0.03	0.12	0.05	0.26	0.14	0.48	0.07	0.6	0.7	5.1	7.1
10–20	<i>M</i>	0.27	0.97	0.53	0.16	6.06	7.59	0.57	0.04	3.1	5.4	6.6	31
	<i>CI</i> _{1/2}	0.06	0.03	0.06	0.01	0.33	0.18	0.05	0.01	2.0	0.2	0.8	8.2
20–40	<i>M</i>	0.61	1.23	0.75	0.11	7.61	8.93	0.35	0.05	10.7	7.2	5.0	23
	<i>CI</i> _{1/2}	0.33	0.17	0.12	0.06	1.05	0.79	0.05	0.02	17.0	1.1	0.6	3.3
40–80	<i>M</i>	0.33	0.78	0.42	0.06	5.08	5.43	0.19	0.04	1.2	5.7	3.7	14
	<i>CI</i> _{1/2}	0.13	0.13	0.15	0.05	0.70	1.47	0.06	0.01	1.3	0.5	1.3	5.7
Дерново-элювозем ожелезненный													
0	<i>M</i>	11.3	1.33	1.71	0.11	1.53	1.59	2.31	0.67	4.6	5.0	6.0	78
	<i>CI</i> _{1/2}	0.91	0.16	0.08	0.02	0.38	0.39	0.45	0.04	1.4	0.8	0.5	9.4
0–5	<i>M</i>	1.64	1.26	1.00	0.25	7.20	7.51	1.27	0.19	4.5	6.4	11.9	27
	<i>CI</i> _{1/2}	0.25	0.08	0.08	0.06	0.40	0.34	0.24	0.06	2.1	0.3	0.8	1.1
5–10	<i>M</i>	0.57	1.16	1.05	0.19	7.15	7.57	0.74	0.06	2.5	5.6	8.9	22
	<i>CI</i> _{1/2}	0.15	0.11	0.08	0.02	0.67	0.70	0.10	0.02	0.7	0.6	1.3	3.1
10–20	<i>M</i>	0.32	1.04	0.57	0.19	6.40	7.74	0.66	0.05	2.1	5.8	6.5	24
	<i>CI</i> _{1/2}	0.05	0.08	0.04	0.05	0.41	0.55	0.10	0.01	0.3	0.6	0.6	0.6
20–40	<i>M</i>	0.29	1.27	0.61	0.18	7.02	8.28	0.38	0.05	26.0	7.7	5.1	22
	<i>CI</i> _{1/2}	0.05	0.21	0.03	0.03	0.68	0.85	0.07	0.01	19.0	1.1	0.8	1.3
40–80	<i>M</i>	0.61	1.21	0.71	0.06	7.41	8.70	0.25	0.06	3.3	7.4	4.4	18
	<i>CI</i> _{1/2}	0.10	0.17	0.09	0.01	1.01	0.82	0.03	0.05	0.9	1.3	0.3	2.5
Дерново-элювозем псевдофибровый													
0	<i>M</i>	8.54	0.98	1.73	0.19	2.04	2.06	2.10	0.68	2.0	4.1	10.6	58
	<i>CI</i> _{1/2}	2.01	0.18	0.40	0.16	0.12	0.29	0.51	0.17	1.6	0.7	2.1	11
0–5	<i>M</i>	1.39	0.95	1.07	0.25	5.79	6.34	1.18	0.24	3.0	4.8	13.8	26
	<i>CI</i> _{1/2}	0.39	0.18	0.11	0.01	0.82	0.57	0.15	0.12	0.7	0.6	1.8	4.7
5–10	<i>M</i>	0.59	0.92	0.91	0.17	5.79	7.27	0.50	0.04	1.8	4.5	9.0	23
	<i>CI</i> _{1/2}	0.21	0.25	0.54	0.05	1.61	0.63	0.11	0.02	0.4	0.7	1.0	2.5
10–20	<i>M</i>	0.35	0.91	0.52	0.16	5.55	6.97	0.54	0.06	2.5	4.8	5.9	24
	<i>CI</i> _{1/2}	0.07	0.12	0.07	0.01	0.64	0.45	0.07	0.01	1.3	0.6	0.4	1.5
20–40	<i>M</i>	0.65	1.15	0.64	0.06	6.61	8.66	0.32	0.04	2.3	6.5	4.7	25
	<i>CI</i> _{1/2}	0.21	0.13	0.14	0.04	0.96	1.11	0.02	0.01	0.8	0.9	0.4	2.7
40–80	<i>M</i>	0.46	0.80	0.60	0.05	4.94	7.09	0.19	0.04	2.6	4.9	3.6	13
	<i>CI</i> _{1/2}	0.08	0.14	0.07	0.01	0.63	0.61	0.01	0.01	0.5	0.4	0.3	1.6

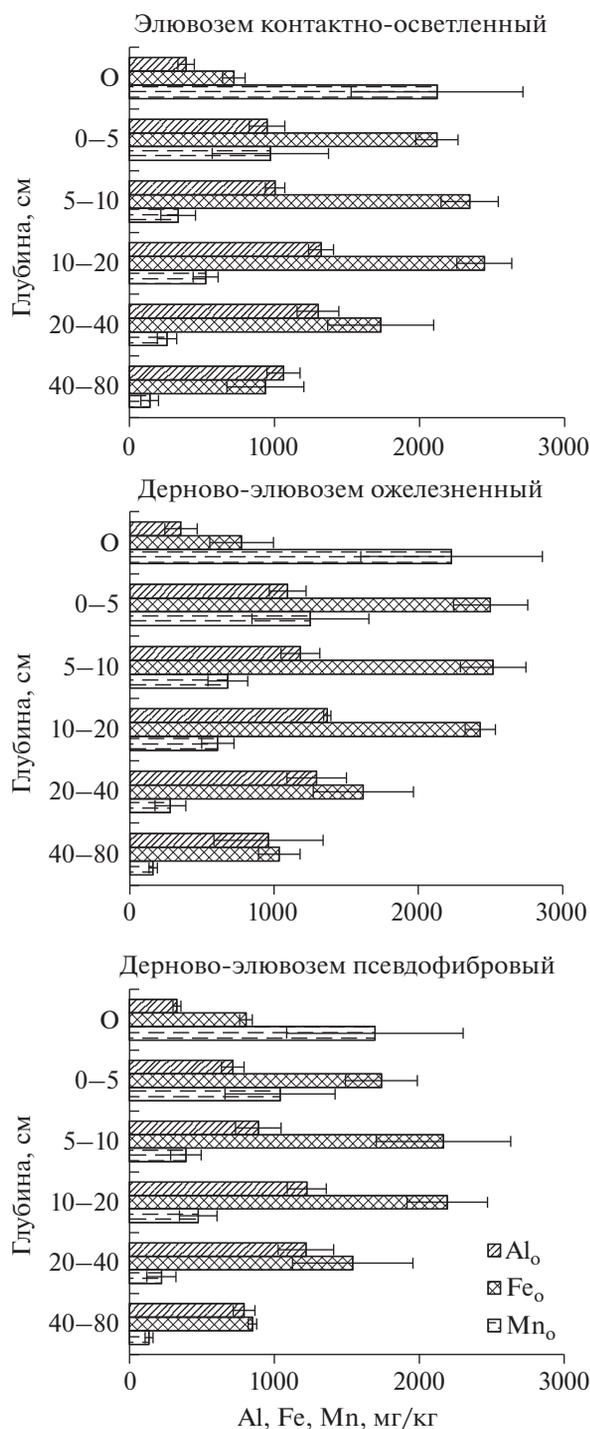


Рис. 2. Содержание оксалорастворимых соединений алюминия, железа и марганца в почвах.

аморфным и слабокристаллизованным соединениям Fe. Одновременно в пределах элювиальной толщи элювозема и дерново-элювоземов, совпадающей по мощности с верхним легкосуглинистым наносом, наблюдается небольшое накопление Al_0 в слое 10–40 см (горизонты E_{Lf}, E_L)

по сравнению с верхним слоем 0–10 см (горизонты A_У, A_{Уel}). Однако слабая выраженность этой дифференциации не позволяет с уверенностью предположить элювиально-иллювиальное распределение Al_0 вследствие развития альфегумусового процесса в ходе наложенной эволюции, как это происходит в суглинистых текстурно-дифференцированных подзолистых почвах [18]. Существенных качественных различий в распределении по профилю Fe_0 и Al_0 в разных почвах, сформировавшихся под различными фитоценозами, не выявлено.

На распределение Mn_0 значительное влияние оказывает поглощение растениями, что подтверждается его заметной аккумуляцией в подстилках, где содержание Mn_0 в несколько раз превышает таковое Fe_0 и Al_0 . С глубиной содержание Mn_0 плавно снижается.

Кислотность почв влияет на рост и развитие растений. Наряду с этим она обуславливает многие свойства почв, влияя на подвижность элементов и их доступность растениям, на реальную емкость катионного обмена (**ЕКО**) и состав обменных катионов, на состав и активность почвенной биоты, на физические свойства почв.

Почвы лесных экосистем заказника – кислые. Наибольшие значения pH_{H_2O} в профиле свойственны подстилкам (5.2–5.7), наименьшие – элювиальным горизонтам (4.6–4.8); с глубиной они повышаются до 5.0–5.1 (рис. 3). Значения pH увеличиваются в ряду: дерново-элювозем псевдофибровый – элювозем контактно-осветленный – дерново-элювозем ожеженный. Значения pH_{H_2O} превышают pH_{CaCl_2} на 0.4–0.7 ед., а pH_{KCl} – на 0.8–1.0 ед. (за исключением подстилок сложного елового и березово-елового лесов, где pH_{KCl} меньше pH_{H_2O} на 0.5–0.6 ед.).

Высокая кислотность верхней части профиля и ее снижение с глубиной типичны для подзолистых и дерново-подзолистых почв таежно-лесной зоны [12, 13]. Как свидетельствуют результаты масштабных обследований лесных почв Европы, большая часть их обладает высокой кислотностью, особенно в верхней части профиля. Так, средние значения pH_{H_2O} изменялись от 5.1 и 4.5 в подгоризонтах OL и OFH подстилки до 4.8, 5.1, 5.3 и 5.5 в слоях 0–10, 10–20, 20–40 и 40–60 см [25]. Средние значения pH_{CaCl_2} составляли 4.8 и 4.15 в подстилке и 4.5, 4.2, 4.7 и 4.9 в минеральных горизонтах соответственно. Ранее значения pH_{CaCl_2} ниже 3.5 отмечены в 42% подстилок, 22% верхних и только 4% нижележащих минеральных горизонтов [37]. В связи с различной природой органических соединений pH органических горизонтов может варьировать в широких пределах; 80% значений изменяется в диапазоне от 3.0 до

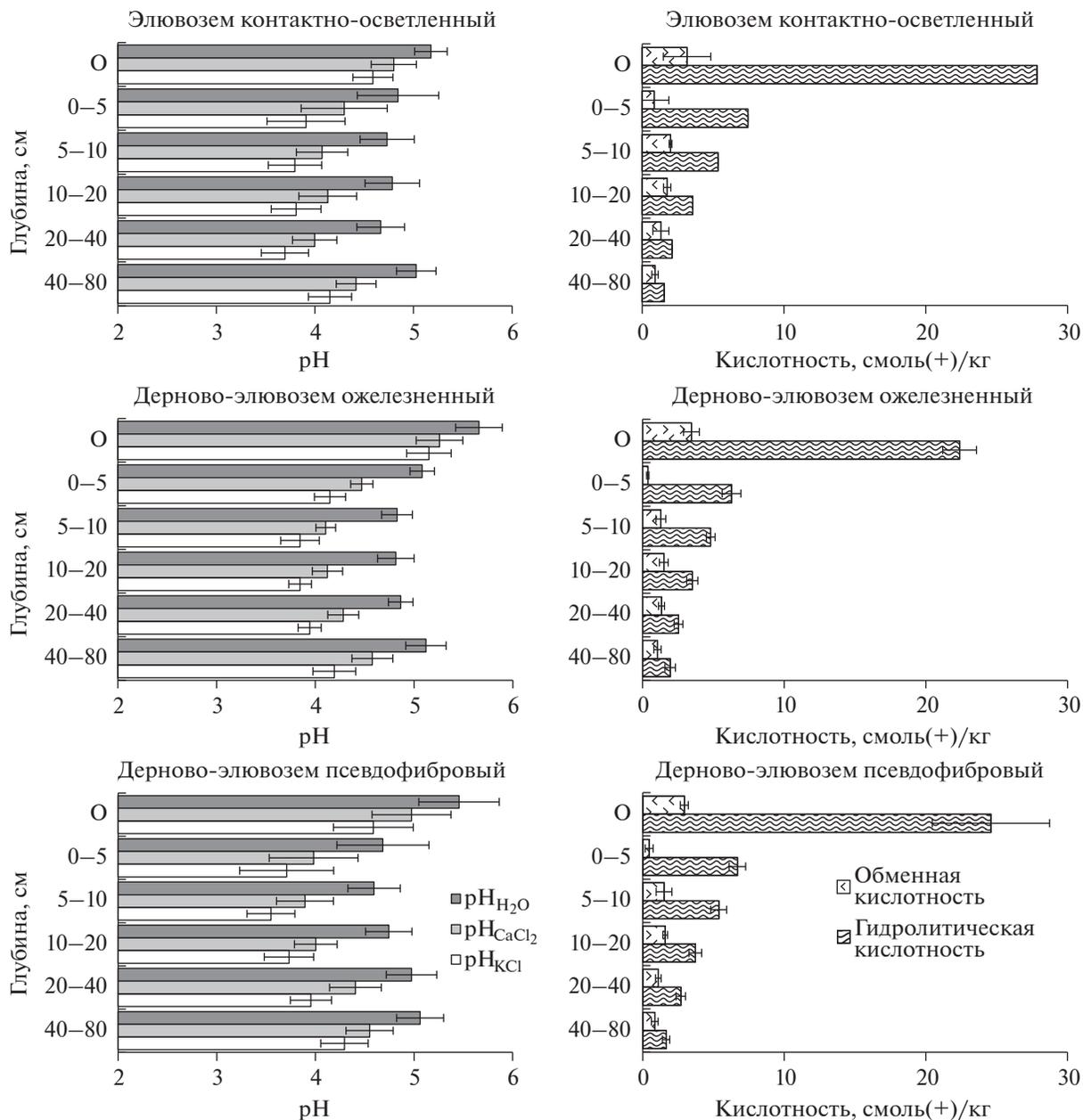


Рис. 3. Значения pH (слева) и обменная и гидролитическая кислотность (справа) в почвах.

5.4 [37]. Заметное влияние на кислотность почв оказывает тип растительности в связи с различиями в химическом составе опада. Почвы под хвойными лесами обычно более кислые, чем под лиственными. Однако эти различия не всегда достоверны, и причинно-следственные связи не ясны. В связи с различной толерантностью растений к почвенной кислотности свойства почв могут определять состав растительных сообществ в большей степени, чем сообщества влияют на реакцию почв.

Подстилки исследуемых экосистем характеризуются максимальными значениями обменной и гидроли-

тической кислотности (3.0–3.5 и 22–28 смоль(+)/кг соответственно). Величины обменной кислотности возрастают в ряду: дерново-элювозем псевдофибровый – элювозем контактно-осветленный – дерново-элювозем ожелезненный, а гидролитической кислотности – в ряду: дерново-элювозем ожелезненный – дерново-элювозем псевдофибровый – элювозем контактно-осветленный. Обменная кислотность минеральных горизонтов отличается ниже, минимальными значениями отличаются гумусово-аккумулятивные горизонты (0.4–0.8 смоль(+)/кг). Вниз по профилю следует небольшое увеличение значений в элювиальных горизонтах (1.5–2.0 смоль(+)/кг) и плавное

уменьшение при переходе к почвообразующей породе (0.8–1.0 смоль(+)/кг) в зависимости от гранулометрического состава и содержания органического вещества. Обменная кислотность представлена преимущественно ионами водорода в подстилках и алюминия — в минеральных горизонтах. Для гидролитической кислотности характерно постепенное уменьшение значений в минеральной части профиля (от 7.5 до 1.6 смоль(+)/кг) без выраженных максимумов. Песчаный гранулометрический состав определяет низкие значения кислотности минеральных горизонтов, различия которой между исследованными почвами в нижней части профиля не значимы.

Обеспеченность растений элементами питания можно оценить по содержанию обменных оснований в почвах. Легкие по гранулометрическому составу почвы заказника сравнительно бедны обменными основаниями (табл. 3). Их содержание минимально в элювоземе сосново-елового леса (30 смоль(+)/кг в подстилке, 5.6 смоль(+)/кг в гумусово-элювиальном горизонте). Нарастание доли березы в составе древостоя сопровождается обогащением верхних горизонтов формирующегося дерново-элювозема обменными основаниями (52 смоль(+)/кг в подстилке и 7.5 смоль(+)/кг в серогумусовом горизонте). Несмотря на некоторое облегчение гранулометрического состава, повышенное содержание обменных оснований (50 и 6.4 смоль(+)/кг соответственно) характерно и для дерново-элювозема сложного ельника, по-видимому, в силу заметного участия широколиственных пород.

Среди обменных оснований преобладает кальций (24–40 смоль(+)/кг в подстилках и 4.7–6.2 смоль(+)/кг в верхних минеральных горизонтах), содержание магния и калия не превышает единиц и десятых смоль(+)/кг соответственно. При этом дерново-элювоземы под сложным ельником и березово-еловым лесом несколько обогащены калием по сравнению с элювоземом. Наиболее богаты обменными основаниями подстилки и подподстилочные горизонты, вниз по профилю их содержание резко уменьшается, опускаясь до минимума в элювиальных горизонтах. При этом различия в обогащенности обменными основаниями, выявленные для верхних горизонтов, сохраняются и в нижней части профиля.

Содержание и профильное распределение кислых обменных катионов — Al, Fe и Mn — в почвах заказника различно. Содержание Al, в значительной степени обуславливающего обменную кислотность, нарастает от подстилки к аккумулятивно-элювиальным и элювиальным горизонтам и постепенно вновь снижается с глубиной. Содержание обменного Fe очень низкое, часто ниже пределов обнаружения. Повышенный уровень свойственен обменному Mn, обладающему аккумуля-

тивным характером распределения по профилю. Органические горизонты почв отличаются обычно повышенным содержанием микроэлементов, являющихся жизненно необходимыми растениям, в силу биологической аккумуляции.

ЕКО сходна во всех исследованных почвах из-за близости гранулометрического состава. Она составляет 37–59 смоль(+)/кг в подстилках и 1.9–8.7 смоль(+)/кг в верхних минеральных горизонтах, снижаясь до 1.7–2.1 смоль(+)/кг на глубине 40–80 см. Степень насыщенности основаниями минимальна в элювоземе сосново-елового леса (82% в подстилке и 18% в элювиальном горизонте) и максимальна в дерново-элювоземе березово-елового леса (88% в подстилке и 85% в серогумусовом горизонте); с глубиной различия сглаживаются.

Различия свойств почв проанализированы путем сравнения их усредненных характеристик. В центре внимания такого подхода находится характеристика объекта на основании относительно большого ансамбля измерений группы свойств в различных местоположениях, т.е. характеристика пространственно-протяженного объекта как единого целого. Подобный подход концептуально соответствует статистическому подходу в физике, исследованиям на популяционном уровне в биологии и хорошо соответствует задаче исследования сложных изменчивых объектов, таких как почвы под разными растительными сообществами.

Свойства почв под разными типами леса на ограниченной по площади территории заказника достаточно близки, не являются контрастными. В то же время характер растительного покрова оказывается чувствительным к свойствам почв, является хорошим интегральным индикатором их различий. Средние значения ряда свойств почв достоверно различаются при 95%-ном уровне значимости для всех трех типов леса и для всех исследованных слоев, всего более чем для 25% исследованных слоев-свойств, а для верхнего подподстилочного слоя — более чем для 30% исследованных случаев (рис. 4).

Конечно, приведенные цифры достоверных различий имеют условный характер, поскольку определяются договорным пороговым значением уровня значимости. Естественно, возникает вопрос, насколько хорошо принятое значение порога соответствует решаемой задаче и нельзя ли выбрать свое, характерное для анализируемых данных значение порога. В физике и некоторых других естественных науках в качестве порогов могут выбираться области резкого изменения свойств, разрывы в ряду квазинепрерывно изменяющихся дискретных значений свойств. В данной работе также применили этот подход. Построив гистограмму вероятности различий представленных на рис. 4 пар свойств и увеличив

Таблица 3. Катионообменные свойства почв лесных экосистем ЗБС: ЕКО – потенциальная емкость катионного обмена, СНО – степень насыщенности основаниями. *M* – среднее, $CI_{1/2}$ – полуширина 95% доверительного интервала среднего, $n = 4$ (смешанных из 6 индивидуальных образцов), DL – предел обнаружения

Глубина, см	Параметр	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺	Mn ²⁺	ЕКО	СНО
		смоль(+)/кг								
Элювозем контактно-осветленный										
0	<i>M</i>	23.7	3.60	2.54	0.35	0.99	0.014	2.47	61.4	48.7
	$CI_{1/2}$	4.4	1.44	1.05	0.12	1.25	0.022	0.48	7.0	6.2
0–5	<i>M</i>	4.68	0.50	0.30	0.13	1.22	0.014	0.86	14.1	39.3
	$CI_{1/2}$	1.49	0.10	0.03	0.03	0.59	0.005	0.25	1.4	7.7
5–10	<i>M</i>	1.22	0.15	0.12	0.08	2.38	0.019	0.20	7.31	21.2
	$CI_{1/2}$	0.45	0.02	0.02	0.03	0.24	0.013	0.06	0.59	4.7
10–20	<i>M</i>	0.28	0.05	0.07	0.07	1.77	<DL	0.12	4.31	10.6
	$CI_{1/2}$	0.12	0.02	0.01	0.02	0.14	–	0.02	0.26	3.6
20–40	<i>M</i>	0.16	0.03	0.07	0.09	1.26	<DL	0.05	2.69	13.4
	$CI_{1/2}$	0.08	0.01	0.05	0.03	0.11	–	0.009	0.41	6.0
40–80	<i>M</i>	0.34	0.08	0.07	0.14	0.81	<DL	0.03	2.37	25.8
	$CI_{1/2}$	0.12	0.03	0.02	0.09	0.14	–	0.01	0.30	7.0
Дерново-элювозем ожелезненный										
0	<i>M</i>	40.0	7.76	3.52	0.54	0.24	0.064	2.49	77.7	66.7
	$CI_{1/2}$	2.7	0.70	0.05	0.06	0.06	0.017	0.47	3.0	1.8
0–5	<i>M</i>	6.24	0.82	0.33	0.08	0.56	0.011	0.69	14.6	50.8
	$CI_{1/2}$	1.11	0.23	0.06	0.02	0.16	0.004	0.13	1.2	5.5
5–10	<i>M</i>	1.66	0.23	0.18	0.09	1.54	<DL	0.28	7.41	28.7
	$CI_{1/2}$	0.46	0.05	0.01	0.003	0.11	–	0.02	0.71	4.3
10–20	<i>M</i>	0.63	0.08	0.15	0.14	1.23	<DL	0.14	4.83	20.7
	$CI_{1/2}$	0.18	0.02	0.05	0.09	0.11	–	0.02	0.49	2.5
20–40	<i>M</i>	0.32	0.04	0.10	0.09	1.02	<DL	0.03	3.29	16.5
	$CI_{1/2}$	0.07	0.008	0.01	0.02	0.04	–	0.008	0.24	1.6
40–80	<i>M</i>	0.60	0.10	0.11	0.10	0.88	<DL	0.02	3.05	29.9
	$CI_{1/2}$	0.10	0.03	0.006	0.01	0.14	–	0.004	0.33	4.1
Дерново-элювозем псевдофибровый										
0	<i>M</i>	40.2	5.69	4.02	0.46	0.32	0.031	4.09	80.2	62.4
	$CI_{1/2}$	11.4	1.61	1.56	0.24	0.24	0.030	2.36	20.2	3.2
0–5	<i>M</i>	5.32	0.49	0.38	0.22	0.46	0.013	0.79	14.1	45.0
	$CI_{1/2}$	1.32	0.12	0.26	0.22	0.26	0.009	0.08	1.8	7.5
5–10	<i>M</i>	1.18	0.13	0.09	0.07	1.21	0.005	0.20	7.20	20.3
	$CI_{1/2}$	0.40	0.05	0.009	0.02	0.23	0.004	0.01	0.24	6.1
10–20	<i>M</i>	0.44	0.07	0.17	0.19	1.22	0.003	0.10	4.83	17.9
	$CI_{1/2}$	0.20	0.06	0.13	0.16	0.53	0.006	0.04	0.45	3.6
20–40	<i>M</i>	0.29	0.04	0.15	0.18	0.81	<DL	0.03	3.54	17.7
	$CI_{1/2}$	0.10	0.02	0.20	0.24	0.35	–	0.009	0.53	10.3
40–80	<i>M</i>	0.39	0.05	0.12	0.07	0.59	0.008	0.01	2.48	25.3
	$CI_{1/2}$	0.13	0.02	0.12	0.02	0.18	0.010	0.003	0.26	5.5

число столбцов для вероятностей различия, наблюдаем постепенно возникающие прогалины – незаполненные столбцы-саквожи. Такое поведение характерно для относительно небольших значений вероятностей, это так называемая флуктуационная катастрофа, когда в силу случайных причин никакое из значений не попадает в классифицирующий столбец. Но прогалины воз-

никают и при больших вероятностях в области значений, когда их при квазинепрерывном изменении вероятностей не может быть. Другими словами, в ряду наблюдаемых вероятностей различия есть разрывы-прогалины нефлуктуационной природы. В качестве характерного для данных порогового значения вероятности можно взять верхнюю границу наибольшей уединенной не-

флуктуационной прогалины. С этой точки зрения вполне допустимой является естественная для данных пороговая граница $P = 0.73$, весьма близкая к границе верхнего квартиля, широко используемого в статистике понятия, что облегчает сравнение с литературными данными.

Возвращаясь к различию химических свойств почв под разными типами леса на территории заказника, при обсужденном в предыдущем разделе значении естественного порога доверия свойства различаются существенно чаще, чем при использовании общепринятого 95%-ного уровня доверия. Так, для верхнего подподстилочного слоя свойства различаются в 65% случаев, и в 60% случаев (с точностью 2%) — для остальных слоев, кроме слоев 5–10 и 20–40 см, где различия составляют 55 и 43% соответственно. А различия по почвам в целом наблюдаются в 60% случаев. С этой точки зрения, высокая чувствительность растительности к свойствам почв оказывается более понятной. По всей вероятности, при изучении приуроченности растительности к почвам следует опираться на более близкие к реальности уровни доверия, чем получившее широкое распространение значение 95%.

Наиболее информативным показателем, характеризующим различия почв под разными типами леса, является плотность сложения. В меньшей степени различается содержание экстрагируемых “царской водкой” Mg, Al и Ca, оксалаторастворимых Al₀ и Fe₀, обменных Ca, K и Al, ЕКО и СНО, а также песка и ила. Почвы почти не различаются по показателям кислотности.

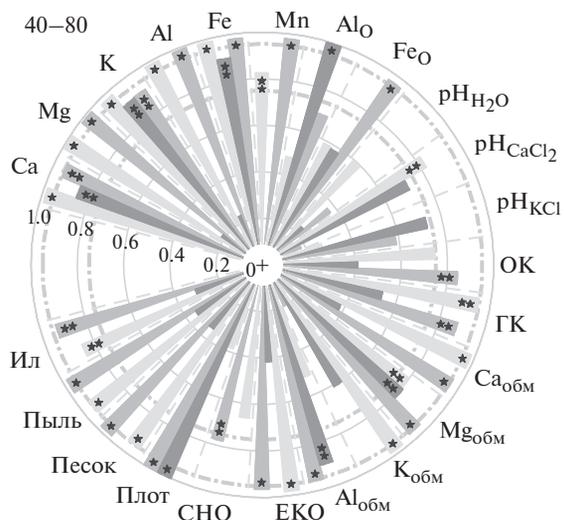
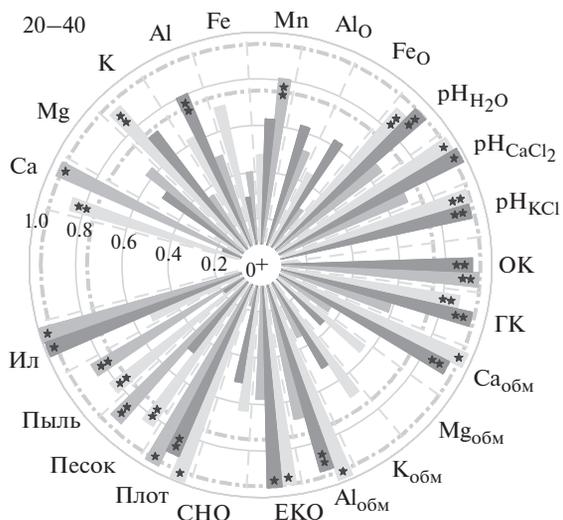
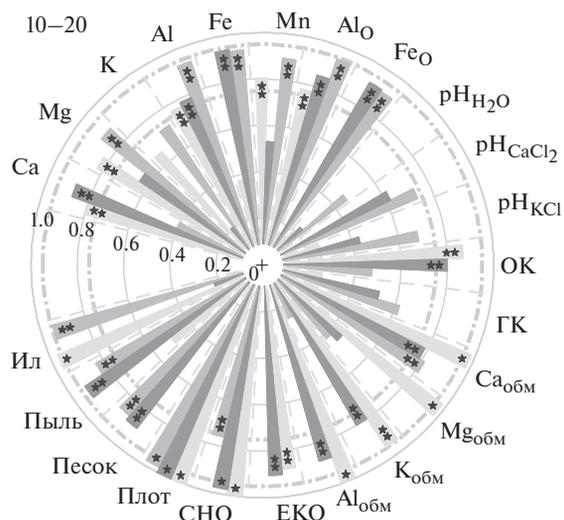
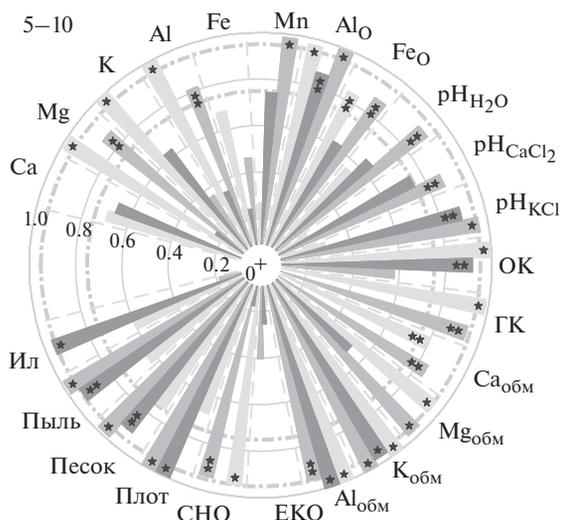
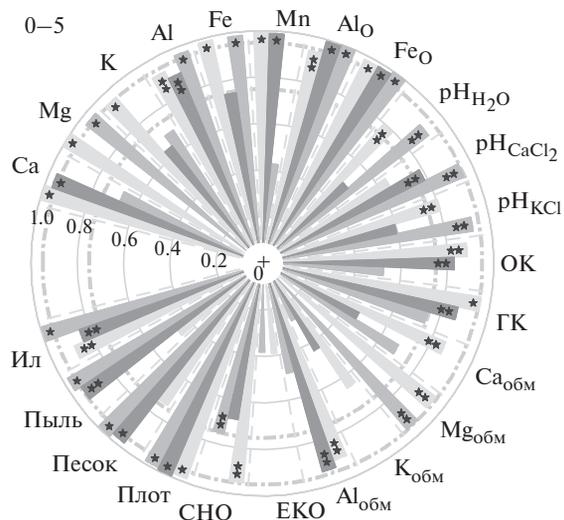
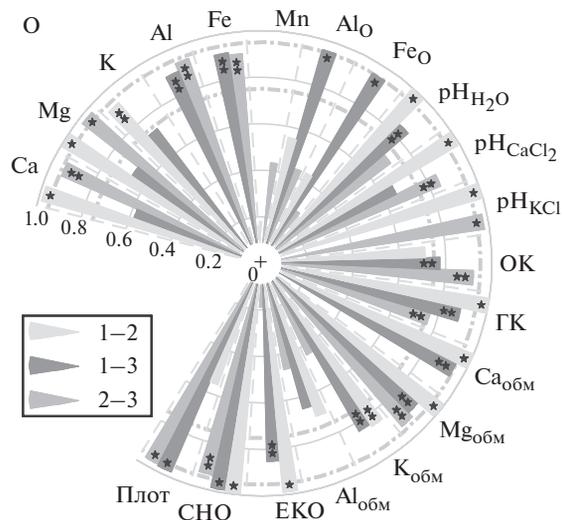
При сравнении свойств почвенных горизонтов/слоев в разных типах леса видно, что наиболее существенные различия характерны для верхнего минерального слоя (0–5 см, горизонты АУ, АУel) и для наиболее глубокого слоя (40–80 см, горизонты Del и Df)). Меньшие различия свойственны для органического горизонта и слоя 5–10 см лесных почв. Элювиальные горизонты, особенно их нижняя часть (20–40 см), в разных почвах сравнительно близки по свойствам. Сходство свойств лесных подстилок, скорее всего, обусловлено близким составом древостоев с преобладанием ели. Отмеченные закономерности вполне естественны и могут быть интерпретированы как проявление взаимовлияния растительности и свойств почв на фоне педо- и литологи-

ческих различий. Наиболее сильно различаются химические свойства почв под лесами в паре элювозем контактно-осветленный–дерново-элювозем ожелезненный, в меньшей степени — в паре дерново-элювозем псевдофибровый–дерново-элювозем ожелезненный, и минимально — в паре элювозем контактно-осветленный–дерново-элювозем псевдофибровый.

С помощью корреляционного анализа выявлена тесная связь многих почвенных свойств во всех типах лесных экосистем. Для всех горизонтов характерны значимые тесные прямые связи между величинами pH водной и солевых суспензий ($r = 0.95–1.00$, $P \geq 0.95$) и их обратные связи с содержанием обменного Al ($r = -0.55–0.87$). Степень насыщенности основаниями в большинстве случаев тесно связана с содержанием их обменных форм ($r = 0.64–0.70$). Обращает на себя внимание тесная прямая связь содержания кислото- и оксалаторастворимых Fe ($r = 0.70–0.95$) и Al ($r = 0.67–0.89$) с обогащенностью тонкодисперсными фракциями — пылью и илом. Из числа потенциально токсичных металлов с этими фракциями прямо связано содержание экстрагируемых “царской водкой” Co ($r = 0.69–0.91$) и зачастую Ni ($r = 0.32–0.43$), и обратно — Mn, Zn, Cd ($r = -0.53–0.81$), отражая средство металлов преимущественно к минеральной фазе или органическому веществу. Разнонаправленный характер связей содержания обменных катионов и илистой фракции свидетельствует о ее незначительной роли в создании обменного пула металлов в почвах легкого гранулометрического состава.

В лесных экосистемах природные факторы, в первую очередь, эдафические и климатические, во многом определяют разнообразие и продуктивность растительных сообществ. В то же время почва является конечным приемником большинства техногенных химических веществ, вовлекаемых в биосферу. Представляя важнейший геохимический барьер на пути миграции поллютантов, почва предохраняет сопредельные среды от техногенного воздействия. Знание потенциальных возможностей почвы в нейтрализации, аккумуляции и трансформации загрязняющих компонентов атмосферных выпадений вблизи крупнейшего мегаполиса необходимо для своевременного выявления и оценки вероятного негативного воздействия на экосистемы. Результаты ком-

Рис. 4. Полярные гистограммы достоверности различий свойств элювозема контактно-осветленного (1), дерново-элювозема псевдофибрового (2) и дерново-элювозема ожелезненного (3) в подстилках (O) и минеральных слоях на глубинах 0–5, 5–10, 10–20, 20–40 и 40–80 см. Доверительные вероятности различий $P \geq 0.07$ свойств между парами почв (в соответствии с легендой на O гистограмме) представлены радиусами соответствующих круговых секторов с центрами, отмеченными крестиками. Одной звездочкой помечены сектора с вероятностью различий $P \geq 0.95$, двумя звездочками — сектора с вероятностью различий в интервале $0.75 \leq P < 0.95$. Символами элементов обозначены их экстрагируемые “царской водкой” соединения, индексом “O” — оксалаторастворимые соединения, индексом “обм” — обменные формы, ОК — обменная кислотность, ГК — гидролитическая кислотность, ЕКО — емкость катионного обмена, СНО — степень насыщенности основаниями, Плот — плотность почв.



плексного почвенно-экологического мониторинга позволяют в первом приближении дать объективную оценку устойчивости почв к антропогенному воздействию. Составляющие основу почвенного покрова заказника элювоземы и дерново-элювоземы под еловыми и смешанными лесами характеризуются легким гранулометрическим составом, высокой кислотностью, бедностью обменными основаниями и низкой степенью насыщенности. Эти почвы можно отнести к чувствительным к антропогенному воздействию, в том числе загрязнению азотом, серой и потенциально токсичными металлами. В условиях возрастающей антропогенной нагрузки и изменения климата экологическое состояние и устойчивость почв могут в значительной степени влиять на структуру и функционирование растительных сообществ в лесных экосистемах, определяя необходимость почвенно-экологического мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе детальной характеристики морфологических, физических и химических свойств почв выявлены их эколого-генетические особенности и уточнена классификационная принадлежность на основе классификации почв России [7]. Почвы под сложным сосново-еловым, березово-еловым и сложным еловым лесами на двухчленных отложениях относятся к элювоземам контактно-осветленным, дерново-элювоземам ожелезненным и дерново-элювоземам псевдофибровым отдела элювиальных почв.

Составляющие основу почвенного покрова заказника элювоземы и дерново-элювоземы характеризуются обедненностью илстой фракцией (3.3–7.0%), кислой реакцией (рН 4.6–5.7), низкой ЕКО, бедностью обменными основаниями (30–52 и 0.6–7.5 смоль(+)/кг в подстилке и минеральных горизонтах) и низкой степенью насыщенности (49–67 и 11–51% соответственно). Содержание потенциально токсичных металлов (Pb, Cd, Cu, Ni и Zn) в почвах лесных экосистем заказника соответствует региональным фоновым уровням. Содержание тонкодисперсных фракций и элементов минерального питания увеличивается, а кислотность уменьшается в ряду: элювоземы контактно-осветленные—дерново-элювоземы псевдофибровые—дерново-элювоземы ожелезненные, приводя к улучшению экологического состояния почв.

Легкий гранулометрический состав, кислая реакция и бедность обменными основаниями свидетельствуют о невысокой устойчивости лесных почв заказника к внешним воздействиям в условиях нарастающей антропогенной нагрузки и меняющегося климата. Для оценки потенциальной способности лесных почв к секвестрации и депонированию углерода и смягчению послед-

ствий климатических изменений необходимы дальнейшие исследования.

На основе анализа разрывов в квазинепрерывном ряду наблюдаемых дискретных значений вероятностей различий почвенных свойств введен пороговый уровень доверительной вероятности различий, определяемый только самими проанализированными данными. Он оказался близким к граничному значению верхнего квартиля, как следствие, оба уровня практически одинаково и, похоже, лучше характеризуют картину различий свойств. Естественный (а не получивший широкое распространение условный 95%-ный) уровень позволяет лучше объяснить отмечаемую исследователями высокую чувствительность растительных сообществ к свойствам почв. Вопрос о переносимости использованного подхода на другие ситуации остается открытым и требующим дальнейшего изучения.

Апробация системы интенсивного почвенно-экологического мониторинга, в соответствии с рекомендациями ICP Forests, на территории государственного природного заказника “Звенигородская биостанция МГУ и карьер Сима” подтвердила целесообразность организации и осуществления систематических комплексных долговременных исследований почв особо охраняемых природных территорий с учетом международного опыта. Использование унифицированных методов делает возможным корректное сравнение состояния почв лесных экосистем в региональном и глобальном масштабах. Полученный массив уникальных данных может служить основой долговременного систематического мониторинга лесных экосистем заказника. Используемые методологические и методические подходы полезны при создании национальной системы мониторинга пулов углерода и потоков климатически активных газов в лесной зоне страны в связи с проблемой изменения климата.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выполнение обширных полевых и аналитических работ при организации и проведении мониторинга было бы невозможно без энтузиазма и деятельного участия сотрудников и студентов факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, в первую очередь С.Ю. Ливанцовой и И.В. Ермакова. Авторы благодарны директору Звенигородской биостанции имени С.Н. Скадовского МГУ им. М.В. Ломоносова профессору В.М. Гаврилову за поддержку почвенных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционно-

го мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600592>.

Рис. S1. Фитоценозы (А, С, Е) и почвы (В, D, F) сложного сосново-елового разнотравно-кисличного леса на элювоземе контактно-осветленном (А, В), березово-елового разнотравно кустянично-кисличного леса на дерново-элювоземе ожеженном (С, D) и сложного елового разнотравно-кисличного леса на дерново-элювоземе псевдофибровом (Е, F).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский А.Л., Еришова Е.Г., Пономаренко Е.В., Кренке Н.А., Скрипкин В.В. Природно-антропогенные изменения почв и среды в пойме Москвы-реки в голоцене: педогенные, пыльцевые и антракологические маркеры // Почвоведение. 2018. № 6. С. 659–673.
2. Браславская Т.Ю. Леса и лесопользование на территории Звенигородской биостанции МГУ: XIX век // Russ. J. Ecosystem Ecology. 2020. V. 5. <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-2-2>
3. Герасимова М.И., Лебедева И.И., Хитров Н.Б. Индексация почвенных горизонтов: состояние вопроса, проблемы и предложения // Почвоведение. 2013. № 5. С. 627–638.
4. Гришина Л.А., Копцик Г.Н., Первова Н.Е. О подходах к изучению свойств почв лесных биогеоценозов в целях мониторинга (на примере Звенигородской биостанции) // Экология. 1991. № 5. С. 14–20.
5. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 410 с.
6. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 225 с.
7. Классификация почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
8. Копцик Г.Н., Багдасарова Т.В., Горленко О.В. Взаимосвязь видового состава растений и свойств почв в экосистемах южной тайги // Бюл. МОИП, отдел биологии. 2001. Т. 106. Вып. 2. С. 31–38.
9. Копцик Г.Н., Владыченский А.С., Гаврилов В.М. Организация почвенно-экологического мониторинга лесных экосистем Звенигородской биостанции МГУ // Тр. Звенигородской биологической станции. Т. 5. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. С. 8–17.
10. Копцик Г.Н., Копцик С.В., Ливанцова С.Ю. Мониторинг почв лесных биогеоценозов Звенигородской биостанции // Тр. Звенигородской биологической станции. Т. 4. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. С. 29–44.
11. Первова Н.Е., Копцик Г.Н., Рыжова И.М. Почвы как основа структурно-функциональной организации биогеоценозов // Тр. Звенигородской биологической станции. Том 3. М., 2001. С. 22–37.
12. Подзолистые почвы запада европейской части СССР. М., 1977. 286 с.
13. Почвы Московской области и их использование. Т. 1. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2002. 500 с.
14. Рабочая группа IUSS WRB 2015. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014, исправленная и дополненная версия 2015. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Доклады о мировых почвенных ресурсах, № 106. Рим: ФАО, 2018. 206 с.
15. Руководство по летней учебной практике студентов-биологов на Звенигородской биостанции им. С.Н. Скадовского. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 432 с.
16. Смирнова К.М. Почвы // Природа Звенигородской биологической станции Московского государственного университета. Вып. 1. М., 1962. 74 с.
17. Смит С.Э., Рид Д.Дж. Микоризный симбиоз / Пер. с англ. Ворониной Е.Ю. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 776 с.
18. Соколова Т.А., Толпешта И.И., Изосимова Ю.Г. Подвижные соединения Al и Si в палево-подзолистых почвах Центрального лесного заповедника: содержание, распределение по профилю и гранулометрическим фракциям // Почвоведение. 2017. № 6. С. 672–679.
19. Чертов О.Г., Надпорожская М.А., Паленова М.М., Припутина И.В. Эдафология в структуре почвоведения и экосистемной экологии // Russ. J. Ecosystem Ecology. 2018. V. 3. 11 p. <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2018-3-2>
20. Andersen M.K., Raulund-Rasmussen K., Strobel B.W., Hansen H.C.B. The effects of tree species and site on the solubility of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in soils // Water, Air, Soil Pollut. 2004. V. 154. P. 357–370. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000022991.59456.01>
21. Bolte A., Block J., Eichhorn J., Sanders T.G.M., Wellbrock N. Sustainable Use and Development of Forests and Forest Soils: A Resume // Status and Dynamics of Forests in Germany. 2019. Ecological Studies 237. P. 355–374. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_12
22. Bussotti F., Pollastrini M. Observing climate change impacts on European forests: What works and what does not in ongoing long-term monitoring networks // Front. Plant Sci. 2017. V. 8: 629. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00629>
23. Chen M., Ma L.Q. Comparison of three aqua regia digestion methods for twenty Florida soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 2001. V. 65. P. 491–499. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652491x>
24. Cools N., De Vos B. Part X: Sampling and Analysis of Soil. Version 2020-1 // UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Eberswalde, Germany: Thünen Institute of

- Forest Ecosystems, 2020. 29 p.
<http://www.icp-forests.org/manual.htm>
25. *De Vos B., Cools N.* Second European Forest Soil Condition Report. Volume I: Results of the BioSoil Soil Survey. INBO.R.2011.35. Brussel: Research Institute for Nature and Forest, 2011. 369 p.
 26. *De Vries W., Dobbertin M.H., Solberg S., van Dobben H.F., Schaub M.* Impacts of acid deposition, ozone exposure and weather conditions on forest ecosystems in Europe: an overview // *Plant Soil*. 2014. V. 380. P. 1–45.
<https://doi.org/10.1007/s11104-014-2056-2>
 27. *Fleck S., Cools N., De Vos B., Meesenburg H., Fischer R.* The Level II aggregated forest soil condition database links soil physicochemical and hydraulic properties with long-term observations of forest condition in Europe // *Ann. For. Sci.* 2016. V. 73. P. 945–957.
<https://doi.org/10.1007/s13595-016-0571-4>
 28. *Forest Soil and Biodiversity Monitoring in the EU.* Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010. 32 p.
 29. *Global Forest Resources Assessment 2015. How are the world's forests changing?* Rome: FAO, 2016. 46 p.
 30. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report.* Rome: FAO, 2020. 168 p.
<https://doi.org/10.4060/ca9825en>
 31. *Kaasalainen M., Yli-Halla M.* Use of sequential extraction to assess metal partitioning in soils // *Environ. Pollut.* 2003. V. 126. P. 225–233.
[https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00191-X](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00191-X)
 32. *Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests. Part IIIa. Sampling and Analysis of Soil.* UN-ECE, CLRTAP, 2006. 26 p.
 33. *Reimann C., Kashulina G., de Caritat P., Niskavaara H.* Multi-element, multi medium regional geochemistry in the European Arctic: element concentration, variation and correlation // *Appl. Geochem.* 2001. V. 16. P. 759–780.
[https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00070-6](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00070-6)
 34. *Russian Forests and Climate Change. What Science Can Tell Us / Eds. Kulikova E., Hassegawa M., Lerink B. Joensuu: European Forest Institute, 2020. 137 p.*
<https://doi.org/10.36333/wsctu11>
 35. *Sanders T.G.M., Michel A.K., Ferretti M.* 30 Years of Monitoring the Effects of Long-Range Transboundary Air Pollution on Forests in Europe and Beyond. Eberswalde: UNECE/ICP Forests. 2016. 67 p.
 36. *Shao P., Han H., Sun J., Xie H.* Effects of global change and human disturbance on soil carbon cycling in boreal forest: A review // *Pedosphere*. 2023. V. 33. P. 194–211.
<https://doi.org/10.1016/j.pedosph.2022.06.035>
 37. *Vanmechelen L., Groenemans R., Van Ranst E.* Forest Soil Conditions in Europe. Results of a Large-Scale Soil Survey. Brussels, Geneva: EC, UN/ECE, Ministry of the Flemish Community, 1997. 259 p.

Analysis of Ecological and Genetic Soil Properties for Forest Ecosystem Monitoring in the Zone of Coniferous-Broad-Leaved Forests

G. N. Koptsik¹*, I. E. Smirnova¹, and S. V. Koptsik²

¹*Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*e-mail: koptsik@mail.ru

A reliable assessment of the composition and properties of soils in forest ecosystems is the basis for environmental monitoring, including monitoring of carbon pools and fluxes, which is of particular importance in the context of global changes in the natural environment and climate. Ecological and genetic features and classification of soils are analyzed at permanent sites of intensive monitoring in the main types of forest ecosystems of the state nature reserve “Zvenigorod Biostation of Moscow State University and the Sima Quarry” (Moscow Region, Russia). Soil monitoring is organized and conducted on the basis of national experience and recommendations of the International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests). Eluvozems and soddy-eluvozems on two-layer deposits dominating in the soil cover of the reserve are characterized by a sandy loam texture (content of clay fraction <0.002 mm 3.3–7.0%), acidic reaction (pH_{H₂O} 4.6–5.7), low cation exchange capacity, low content of exchangeable bases (30–52 cmol_c/kg in organic and 0.6–7.5 cmol_c/kg in mineral horizons) and low base saturation (49–67 and 11–51%, respectively). The content of potentially toxic metals (Pb, Cd, Cu, Ni and Zn) in the soils of the reserve does not exceed background levels. The ecological state of soils improves in the series of contact-albic eluvozem – pseudofibrous soddy eluvozem – ferruginous soddy eluvozem, determining the stability of forest ecosystems to external effects under conditions of increasing anthropogenic pressure and climate change.

Keywords: ecological state of soils, eluvozem, soddy-eluvozem, Dystric Cambisol, coniferous-deciduous forests, Zvenigorod Biostation of Moscow State University