

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 631.41

doi: 10.17223/19988591/65/1

Вариабельность кислотности, электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала в двух альфегумусовых почвах национального парка «Смоленское Поозерье»

**Полина Романовна Енчилик¹, Галина Викторовна Клинк²,
Алиса Алексеевна Пеунова³, Елена Сергеевна Прилипова⁴,
Елизавета Алексеевна Сергеева⁵, Николай Сергеевич Соболев⁶,
Иван Николаевич Семенков⁷**

^{1, 3, 4, 5, 6, 7} *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия*

^{1, 7} *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*

² *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия*

¹ *polimail@inbox.ru*

² *galkaklink@gmail.com*

³ *peunovaalisa@yandex.ru*

⁴ *starchikova.e.s@gmail.com*

⁵ *lisa.sergeeva2204@mail.ru*

⁶ *kolyhome2000@yandex.ru*

⁷ *semenkov@geogr.msu.ru*

Аннотация. Вариабельность кислотности, электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала в почвенных горизонтах отражает результаты процессов, влияющих на качество почв, что необходимо учитывать при планировании и анализе результатов эколого-геохимического мониторинга. На территории национального парка «Смоленское Поозерье» (55°32' с.ш., 31°24' в.д.) исследована вариабельность трех почвенных свойств в каждом генетическом горизонте постагrogenных дерново-подбур (Entic Rustic Podzol) под березово-дубово-еловым лесом и подзола (Katogleyic Albic Carbic Podzol) под сосново-еловым лесом. Дерново-подбур был опробован на 7 глубинах в пятикратной повторности (35 образцов). Подзол опробован с 9 глубин в трехкратной повторности (27 образцов). Все показатели определяли в одной водной суспензии в течение суток после отбора проб в пятикратной повторности в образцах из дерново-подбур (175 измерений) и один раз в подзоле (27 измерений). Вариабельность физико-химических свойств почв в каждой выборке данных оценена с помощью коэффициентов вариации. В дерново-подбуре оценивали три типа вариабельности: Cv1 – изменчивость измерений по пяти повторным промерам одной и той же суспензии, Cv1cp – среднее Cv1 для одного слоя; Cv2 рассчитан по 5 осредненным значениям измерений каждой суспензии по отдельности для каждой из 7 глубин. Внутригоризонтная изменчивость (Cv) для подзола рассчитана по 3 образцам с 9 глубин, а для дерново-подбур – по 5 первым измерениям каждой суспензии с 7 обследованных глубин. Коэффициент вариации всех трех показателей менее 50%. Средняя по всему профилю дерново-подбур вариабельность величины pH и электропроводности водной вытяжки в целом ниже, чем

вариабельность в пределах его горизонтов. Вариабельность электропроводности максимальна среди исследованных показателей, а окислительно-восстановительного потенциала – минимальна. В профиле подзола вариабельность кислотности и окислительно-восстановительного потенциала повышена в протогумусовом горизонте, а электропроводности – в почвообразующих флювиогляциальных песках с неравномерным распространением электролитов, представленных в крайне небольшом количестве. В профиле дерново-подбуря вариабельность кислотности возрастает в средней части профиля, где накапливаются фульваты Fe и Al, электропроводности – слабо меняется по профилю, а окислительно-восстановительного потенциала – зависит от изменчивости условий увлажнения и микробиологической активности и поэтому максимальна в лесной подстилке.

Ключевые слова: неоднородность свойств почв, агрохимические показатели почв, физико-химические свойства почв, альфегумусовые почвы (Podzols), вертикальная дифференциация

Источник финансирования: работа выполнена при поддержке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (госзадание № I.4; полевые и химико-аналитические работы) и Российского научного фонда (проект № 21-74-20171; интерпретация результатов).

Благодарности: авторы признательны участникам полевых и химико-аналитических работ – И.Е. Тамаровскому, А.А. Дьяконову, Д.С. Жогову, В.Э. Карпачеву, Д.А. Касимовой, Г.И. Колосу, Д.В. Котову, А.И. Куликовой, А.Д. Наумову, М.С. Осиповой, А.А. Пискуновой, Д.А. Тереховой, П.Д. Чеченкову. При подборе объектов исследования использованы материалы, предоставленные Центром коллективного пользования «Геопортал» (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Для цитирования: Енцилик П.Р., Клинк Г.В., Пеунова А.А., Прилипова Е.С., Сергеева Е.А., Соболев Н.С., Семенков И.Н. Вариабельность кислотности, электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала в двух альфегумусовых почвах национального парка «Смоленское Поозерье» // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2024. № 65. С. 6–26. doi: 10.17223/19988591/65/1

Original article

doi: 10.17223/19988591/65/1

Variability of acidity, electrical conductivity and redox potential in two Podzols at the Smolenskoye Poozerye national park

Polina R. Enchilik¹, Galina V. Klink², Alisa A. Peunova³, Elena S. Prilipova⁴, Elizaveta A. Sergeeva⁵, Nikolay S. Sobolev⁶, Ivan N. Semenkov⁷

^{1, 3, 4, 5, 6, 7} *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

^{1, 7} *Center for Problems of Ecology and Productivity of Forests, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

² *Institute for Information Transmission Problems named after A.A. Kharkevich RAS, Moscow, Russian Federation*

¹ *polimail@inbox.ru*

² *galkaklink@gmail.com*

³ *peunovaalisa@yandex.ru*

⁴ *starchikova.e.s@gmail.com*

⁵ *lisa.sergeeva2204@mail.ru*

⁶ *kolyhome2000@yandex.ru*

⁷ *semenkov@geogr.msu.ru*

Summary. Variability of acidity, electrical conductivity, and redox potential depends on processes affecting the soil quality. The study of these properties is important in planning and analyzing the results of ecological and geochemical monitoring. The purpose of the work is to assess the intrahorizontal variability of acidity, electrical conductivity and redox potential within different depths of automorphic sandy soils of the Smolenskoye Poozerye National Park.

Variability of pH values, electrical conductivity of water extract, and redox potential were studied in each horizon of the postagrogenic Entic Rustic Podzol under a birch-oak-spruce forest and the Katogleyic Albic Carbic Podzol under pine-spruce forest located at the Smolenskoye Poozerye National Park (55°32' N, 31°24' E). Entic Rustic Podzol was sampled at different depths in five repetitions. Samples were taken from the Katogleyic Albic Carbic Podzol from nine depths in triplicate. The pH values, electrical conductivity, and redox potential of the samples from Entic Rustic Podzol were measured five times in aqueous suspension within one day after sampling and once in Katogleyic Albic Carbic Podzol. The variability of the physicochemical properties of soils in each data set was estimated using the three groups of coefficients of variation. In the Entic Rustic Podzol, Cv1 was a measurement variability calculated for five repeated measurements of the same suspension, Cv1av was averaged Cv1; Cv2 was calculated for averaged values of five samples which suspension was measured five times. Cv for Katogleyic Albic Carbic Podzol was calculated from three samples from nine depths and for Entic Rustic Podzol from the first measurement of five in each of five suspensions from seven depths.

Variability of properties of all studied soils was at a low level: $Cv < 50\%$. In comparing with the coefficients of variation calculated for pH and electrical conductivity in different soil horizons, the averaged coefficients of variation of the same properties, which were calculated for the whole data set characterizing Entic Rustic Podzol variability, were generally lower. The variability of the electrical conductivity was the highest among all the parameters studied, and the variability of the redox potential was the lowest. In the Katogleyic Albic Carbic Podzol, acidity variability increased in the Bs horizon. The variability of the redox potential was increased in the uppermost part of the humus horizon. The variability of electrical conductivity was maximum in the middle part of the profile and it was present in an extremely small amount in lacustrine sands with an uneven distribution of electrolytes. In the Entic Rustic Podzol, the variability of acidity increased in the middle part of the profile due to accumulation of Fe and Al fulvates. The variability of electrical conductivity varied slightly along the Entic Rustic Podzol profile. The variability of the redox potential was maximum in the forest litter, since the values of this parameter depend on the variability of moisture and microbiological activity.

The article contains 3 Figures, 3 Tables, 48 References

Keywords: heterogeneity of soil properties, soil fertility, ecological indicators, soil physicochemical properties, Spodosols, vertical differentiation

Funding: This work was supported by MSU (grant №I.4: field and laboratory work) and RSF (grant № 21-74-20171: data processing).

For citation: Enchilik PR, Klink GV, Peunova AA, Prilipova ES, Sergeeva EA, Sobolev NS, Semenov IN. Variability of acidity, electrical conductivity and redox potential in two Podzols at the Smolenskoye Poozerye national park. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology.* 2024;65:6-26. doi: 10.17223/19988591/65/1

Введение

Кислотность, электропроводность и окислительно-восстановительный потенциал почвы являются важными показателями, отражающими функционирование почвы. Их вариабельность – результат разномасштабных процессов, которые могут свидетельствовать об улучшении или ухудшении качества почв [1, 2]. Так, кислотность (рН) влияет на растворимость и биодоступность многих веществ [3]. Электропроводность водной вытяжки (ЕС) связана с емкостью катионного обмена, засолением, концентрацией питательных веществ [4]. Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) меняется при ограничении доступа кислорода, разложении органических веществ, нитрификации, денитрификации, выбросах парниковых газов [5]. Кроме того, растения изменяют ОВП и рН почвы, особенно в ризосфере [6]. Все эти три легко определяемых показателя позволяют получить экспресс-оценку состояния почвы, поэтому, наряду со сложнее получаемым содержанием гранулометрических фракций, их часто используют для характеристики условий миграции. Однако до сих пор очень мало информации об уровнях вариабельности величины рН, электропроводности и окислительного потенциала в альфегумусовых почвах. В отношении другого легко определяемого почвенного показателя – цветовой характеристики по шкале Манселла – вариабельность значения оценена совсем недавно на примере разнообразных почв национального парка «Смоленское Поозерье» [7].

Оценка вариабельности почвенных свойств востребована при планировании и анализе результатов эколого-геохимического мониторинга [8–10], а также при характеристике степени загрязнения по небольшому числу проб. Ранее изучена вариабельность физических (плотности, влажности, водопроницаемости) и химических (величины рН, валового состава, содержания обменных катионов) свойств в разных генетических горизонтах дерново-подзолистых почв [11, 12]. Для почв легкого гранулометрического состава подобные исследования редки.

Одним из основных факторов пространственного варьирования физико-химических свойств почв является неоднородность растительности [13]. Неравномерное распределение опада, травяного покрова, атмосферных осадков с растворенными в них минеральными веществами, отличия в световом режиме, почвенной фауне по мере удаления от ствола дерева определяют пространственную вариабельность свойств верхних горизонтов почв [14]. Так, миграция, разложение и синтез веществ, жизнедеятельность биоты, катионный обмен и выщелачивание оснований определяют в почвенном растворе содержание, состав и соотношение оснований, органических кислот и их солей, определяющих величину рН [13]. Связь показателя рН с пространственным распределением гумуса изучена в подзолах [15] и дерново-подзолистых почвах [16]. В агропочвах вариабельность агрономических показателей изучена достаточно подробно. Однако природным почвам и почвам на поздних этапах лесовосстановления посвящены единичные исследования [17], особенно в генетических горизонтах почв [18]. Оценка вариабельности показателей на разных глубинах в пределах одного генетического горизонта

ранее не проводилась. Кроме того, методы оценки variability почвенных свойств до сих пор дискуссионны [19].

Цель работы – оценка внутригоризонтной variability кислотности, электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала в пределах разных глубин автоморфных песчаных почв национального парка «Смоленское Поозерье».

Район, объекты, материалы и методы исследования

Территория национального парка «Смоленское Поозерье» расположена между Валдайской и Смоленско-Московской возвышенностями, в 70 км севернее г. Смоленска (Россия) и 100 км восточнее г. Витебска (Беларусь), в области умеренно континентального климата в переходной полосе подтаежных широколиственно-хвойных и хвойных лесов [20]. Сложные сочетания разнообразных по гранулометрическому составу ледниковых отложений (валунных суглинков, супесей, флювиогляциальных песков, озерно-ледниковых отложений) обуславливают высокую пестроту почвенного и растительного покрова [20, 21]. Национальный парк «Смоленское Поозерье» находится в провинции среднерусских южнотаежных дерново-мелко- и неглубокоподзолистых почв [22].

Для оценки вертикального изменения уровня variability свойств исследованы дерново-подбур постагрогенный реградированный супесчаный (Entic Rustic Podzol) на покровных супесях, подстилаемых озерными песками с набором горизонтов O – We – AYra – BF – C под сосново-еловым рябиново-лещиновым кисличным лесом, и подзол иллювиально-гумусово-железистый глееватый песчаный (Katogleyic Albic Carbic Podzol) на глееватых флювиогляциальных песках с набором горизонтов O – E(hi) – BHF – BFg – Cg под дубово-березово-еловым черничным лесом (рис. 1, табл. 1), характерным для поздних стадий естественного лесовосстановления на месте заброшенных сельскохозяйственных угодий [23, 24]. Почвы названы в соответствии с Классификацией и диагностикой почв России [25] и Мировой реферативной базой почвенных ресурсов [26].

Таблица 1 [Table 1]

Морфологическое описание изученных почв [Morphological characteristics of soils studied]

Горизонт [Horizon]	Глубина, см [Depth, cm]	Описание горизонта [Morphological characteristics of the horizon]
(1) Дерново-подбур иллювиально-железистый оподзоленный постагрогенный реградированный супесчаный на песках [Entic Rustic Podzol (Arenic)]		
OL [Oi]	Поверхность [Surface]	На поверхности свежий хвойный (70%) и лиственный опад (30%) [Fresh coniferous (70%) and deciduous remnants (30%) is on the soil surface]

Гори- зонг [Horiz- on]	Глубина, см [Depth, cm]	Описание горизонта [Morphological characteristics of the horizon]
OF [Oe]	0–2(3)	Слабо фрагментированная фракция опада: 60% хвойного и 40% лиственного [Weakly fragmented litter: 60 and 40% of coniferous and deciduous remnants, respectively]
We [Oa]	2(3)–5(7)	Неоднородный, седовато-темно-серый с буроватым оттенком (7,5 YR 3/2) с белесыми пятнами, свежий, непрочно-комковатый, пылеватая супесь, рассыпчатый, обильные включения корней (20–30%) диаметром < 5 мм, отмытые зерна первичных минералов (ОЗПМ, 30%) переход ясный по цвету и сложению, граница слабоволнистая [7.5 YR 3/2, crumbly, sandy loam, abundant (20-30%) roots with a diameter < 5 mm, uncoated primary minerals (30%), wavy, gradual distinctness]
AУpa [Ap]	5(7)–10(19)	Серовато-палевый (7,5 YR 4/3-4), однородный, свежий, неясно-комковато-ореховатый, уплотненный, супесь, мелкая дресва диаметром до 2 мм, уголь, мелкие и крупные корни диаметром <7 мм, отмытые зерна (15%), переход очень резкий по цвету, граница слабоволнистая [7.5 YR 4/3-4, subangular blocky-crumby, sandy loam, very few roots with a diameter < 7 mm, uncoated primary minerals (15%), wavy, vey abrupt distinctness]
BF [Bs]	10(19)– 25(32)	Охристо-палевый (7,5 YR 4/6), неоднородный с темно-серыми гумусовыми пятнами, свежий, уплотненный (рыхлее вышележащего), непрочно-ореховато-комковатый, тонко-зернистый песок, 5% корней до 22 см диаметром < 3 мм, переход постепенный по цвету [7.5 YR 4/6, subangular blocky, crumbly, sandy, few (5%) roots up to 22 cm with a diameter < 3 mm, smooth, diffuse distinctness]
Cff [Cs]	> 25(32) [> 25(32)]	Палевый (10 YR 5/6) с темно-бурными псевдофибрами, уплотненный (плотнее вышележащего), непрочно-комковато-ореховатый, песок [10 YR 5/6, subangular blocky, crumbly, sandy]
(2) Подзол иллювиально-гумусово-железистый глубинно глееватый песчаный на глееватых песках [Katogleyic Albic Carbic Podzol (Arenic)]		
OL [Oi]	Поверх- ность [Surface]	Опад листьев дуба, хвоя, шишки, ветки. 40% хвои, 50% листьев, 10% веток и шишек [Oak leaf, pine needles, cones, branches. 40% needles, 50% leaves, 10% branches and cones]
OF [Oe]	0–2	Преобладают хвоя (70%), листья (30%), единичные шишки [Needles (70%), leaves (30%), single cones]
OH [Oa]	2–6(10)	Серый (7,5 YR 4/3) с большим количеством (30%) ОЗПМ. Обильные (30%) корни диаметром < 1 см. Переход к ниже-лежащему горизонту постепенный через маломощный фрагментарный горизонт Ehi [7.5 YR 4/3, crumbly, abundant (20-30%) roots with a diameter < 1 cm, uncoated primary minerals (30%), smooth boundary, smooth, diffuse distinctness]

Горизонт [Horizon]	Глубина, см [Depth, cm]	Описание горизонта [Morphological characteristics of the horizon]
E(hi) [E]	6(10)–17(32), 30-39 пятно слева [Spot in the left]	Однородный пепельно-серый (7,5 YR 5-6/3) с темно-бурыми пятнами по ходам корней, свежий, бесструктурный с элементами неясно-глыбистой структуры, тонкозернистый песок, уплотнённый, единичные (до 5%) корни диаметром до 5 мм, мицелий, единичные угли и дресва, переход ясный по цвету, граница кармановидная [7.5 YR 5-6/3, Single-grain structure, very few roots, subangular blocky, sandy, irregular shape, clear distinctness]
BHF [Bs]	17(32)–35(38)	Буровато-кофейный (2,5 YR 2,5/3). Свежий (близок к влажному), уплотнённый (плотнее вышележащего), непрочно глыбисто-комковатый, тонкозернистый песок, единичные тонкие корни (2%) диаметром до 5 мм, ОЗПМ (по массе до 10%). На глубинах от 17(25)–37(42) см (максимальная мощность 20 см) в левой части передней части разреза присутствует почвенно-ветровальный комплекс (смесь горизонтов BF, BHF, E). Переход ясный по окраске, граница слабоволнистая [2.5 YR 2,5/3, subangular blocky, sandy, very few (2%) roots with a diameter of up to 0,5 cm, grains of primary minerals (10%), wavy boundary, clear distinctness]
BFg [Brs]	35(38) в правой части 48(42) в левой части до 72(78) [35(38) on the right side 48(42) on the left side to 72(78)]	На буровато-охристом фоне (7,5 YR 5/6) палево-охристые пятна. Влажный, уплотнённый (рыхлее вышележащего), непрочно ореховато-глыбистый, супесчаный, частые Mn конкреции, натечное гумусовое пятно высотой 2 см и длиной 14 см, переход ясный по окраске, граница волнистая [7.5 YR 5/6, subangular blocky, sandy loam, common Mn nodules, humus spot (2 cm high, 14 cm long), broken boundary, clear distinctness]
Cg [Cr]	>72(78) [> 72(78)]	На сизовато-палевом фоне (7,5 YR 5/6) палево-охристые пятна, влажный (близок к сырому), тонко-среднезернистый песок, бесструктурный, уплотнённый (плотнее вышележащего), Mn примазки (реже, чем в вышележащем) [7.5 YR 5/6, massive, sandy, few Mn nodules]

Образцы массой 100–150 г естественной влажности отобраны в июле 2021 г. с фиксированных глубин каждого генетического горизонта почв. Пробы отбирали из передней и обеих боковых стенок разреза, т.е. фактически по трем сторонам прямоугольника общей протяженностью около 3,5 м, чтобы каждая проба характеризовала максимально возможный в данном разрезе объем почвенной толщи и была получена из нескольких морфонов строго в пределах одного слоя опробуемого интервала глубин. Дерново-подбур опробован на 7 глубинах в пятикратной повторности – суммарно 35 проб. Из подзола отобраны пробы с 9 глубин в тройной повторности – суммарно 27 проб.

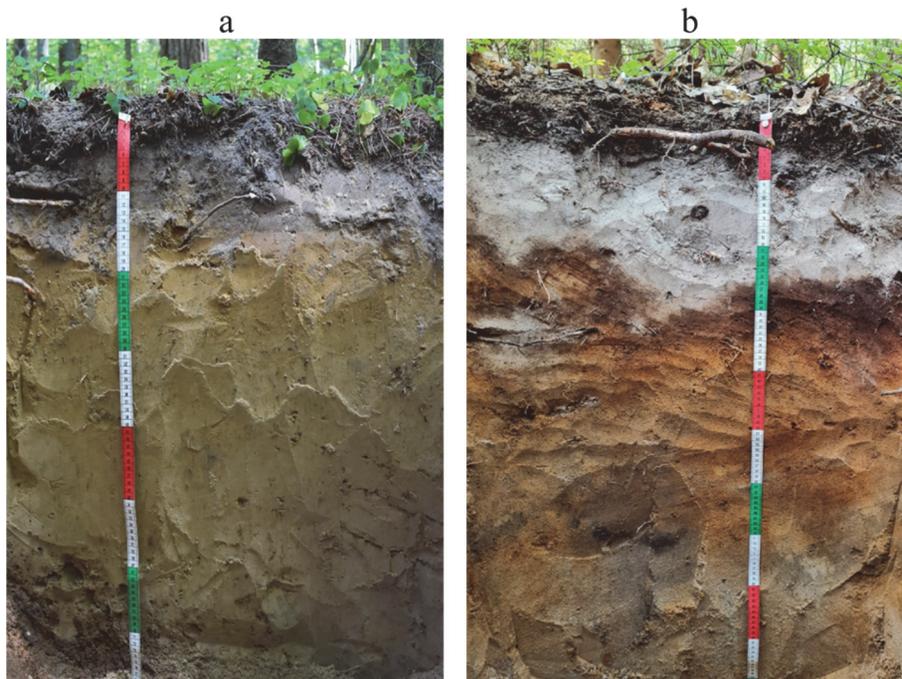


Рис. 1. Фотографии изученных почв: *a* – дерново-подбур, *b* – подзол
[Fig. 1. Photos of the studied soils: (a) Entic Rustic Podzol, (b) Katogleyic Albic Carbic Podzol]

Аналитические исследования. В водной суспензии определяли величину рН (соотношение почва: раствор (1 : 2,5) [27, 28] на рН-метре Эксперт рН, ЕС (1 : 5) [27, 29] и ОВП (1 : 2,5) [30] – на ЕС/TDS-метре COM80 в течение одного дня после пробоотбора в дерново-подбуре в пятикратной повторности и в подзоле – в однократной (суммарно 202 определения каждого из трех показателей).

Обработка данных. Обработка материалов и расчёт описательной статистики произведены в программах MS Excel 2013 и Statistica 8. Вариабельность физико-химических свойств почв в каждой выборке (рис. 2) оценена с помощью коэффициентов вариации (C_v , %).

C_{v1} – вариабельность измерений, «measurement variability» [31] рассчитана только для дерново-подбура по пяти повторным измерениям одной и той же суспензии. C_{v1cp} – это среднее C_{v1} . C_{v2} рассчитан по 5 осредненным значениям измерений каждой суспензии по отдельности для каждой из 7 глубин. C_v получен в подбуре по первым измерениям показателя в суспензии 5 образцов с каждой из 7 опробованных глубин и в подзоле по 3 пробам с 9 глубин. Проверка нормальности распределения рН, ЕС и ОВП в почвах выполнена с помощью теста Шапиро–Уилка (p_{w-s}) в программе Statistica.

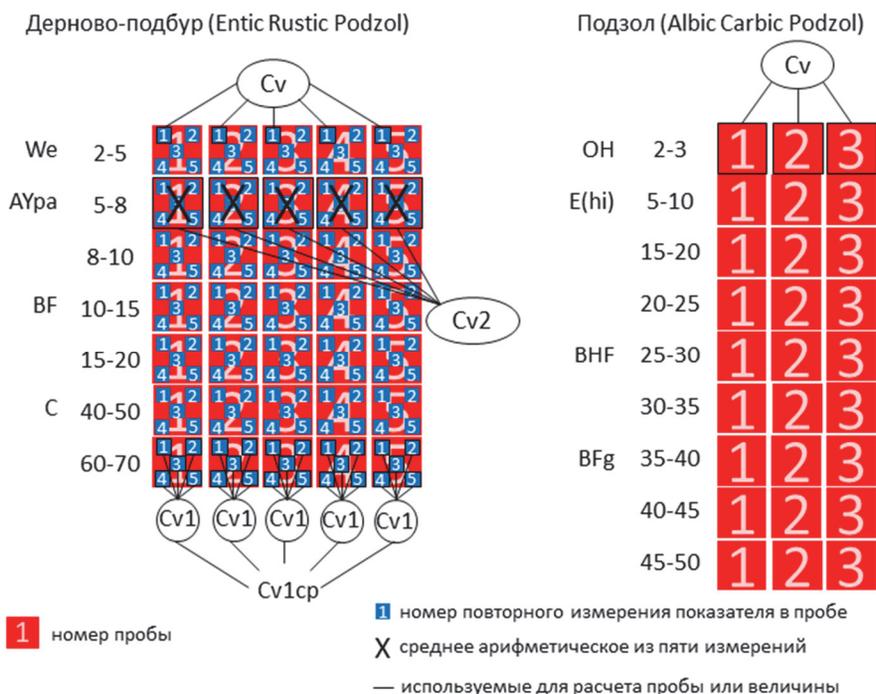


Рис. 2. Выборки данных для расчета вариальности
 [Fig. 2. Data subsamples for calculation of variability]

Результаты

Вариальность химических свойств дерново-подбура.

Кислотность. В профиле дерново-подбура pH имеет логнормальное распределение ($p_{w-s} = 0,01$). Реакция среды минимальна (3,7–3,8; табл. 2, рис. 3) в средней части почвы (на глубине 8–15 см), достигая в горизонтах AY и C значения 4,8. В дерново-подбуре Cv1 значений pH максимальна в горизонте We (4–21%; табл. 3) и минимальна (1–3%) в средней части профиля (на глубине 8–20 см) в горизонте E. Средняя вариальность измерений по всему профилю почвы составляет 3,6%. Вариальность неоднородности (см. табл. 3) по средним значениям измерений (Cv2) кислотности составляет от 1,3% в верхней части горизонта BF до 2,9% в горизонте реградации We. Средняя Cv2 для всего профиля ниже, чем Cv1, и составляет 2%. Значение Cv максимально (14%) в горизонте We и минимально (1,5%) в средней части профиля (8–15 см).

Электропроводность. В дерново-подбуре EC имеет логнормальное распределение ($p_{w-s} = 0,02$), максимальна в верхней части профиля и снижается с глубиной, что отражает активное образование гумусовых кислот в горизонте реградации We. Cv1 EC минимальна в горизонте We и возрастает в породе с 10 до 40%. Cv2 EC находится в диапазоне от 20% в горизонте We до 9–42% в породе (см. табл. 3). Средние значения Cv1 и Cv2 EC по всему

профилю сопоставимы: 20 и 23% соответственно (см. табл. 3). С_v минимальна на глубине 5–8 см и максимальна в иллювиальном горизонте и в породе. В среднем по профилю С_v ЕС обладает максимальными значениями (29%) относительно двух других рассмотренных показателей.

Таблица 2 [Table 2]

Медианные значения (М) и вариабельность (С_v, %) величины рН, ЕС и ОВП в горизонтах альфегумусовых почв, изученных в нацпарке «Смоленское Поозерье»

[Median (M) and variability (C_v, %) of pH, electrical conductivity and redox potential in horizons of Podzols studied in the Smolenskoe Poozerie national park]

Горизонт [Horizons]	Глубина, см [Depth, cm]	n	рН		ЕС, мкСм/см [Conductivity μS/cm]		ОВП, мВ [Redox potential, mV]	
			М	С _v	М	С _v	М	С _v
Дерново-подбур иллювиально-железистый оподзоленный постаграгенный реградируемый супесчаный на песках [Entic Rustic Podzol]								
We [Oa]	2–5	5	4,6	13,6	29	19	481	1,8
АУра [Ap]	5–8	5	4,0	2,1	13	13	489	0,9
	8–10	5	3,7	1,5	15	32	490	0,6
BF [Bs]	10–15	5	3,8	1,5	13	39	498	0,7
	15–20	5	4,0	3,2	8	31	480	1,5
С [C]	40–50	5	4,6	1,8	2	20	475	0,2
	60–70	5	4,8	3,1	3	43	473	1,8
Весь профиль [Whole soil]		35	4,0	3,8	13	28	481	1,1
Подзол иллювиально-гумусово-железистый глубинно-глеватый песчаный на глеватых песках [Katogleyic Albic Carbic Podzol]								
OH [Oa]	2–5	3	3,8	1,5	63	22	424	2,7
E(hi) [E]	5–10	3	4,0	0	65	14	434	1,6
	15–20	3	3,8	2,6	117	25	439	1,3
	20–25	3	3,7	1,5	101	26	471	1,3
ВHF [Bs]	25–30	3	3,7	2,7	80	15	476	1,4
	30–35	3	3,7	3,2	110	21	476	1,1
BFg [Brs]	35–40	3	4,0	1,4	86	18	444	0,9
	40–45	3	4,2	1,4	101	29	432	1,3
	45–50	3	4,6	1,3	67	8	418	0,5
Весь профиль [Whole soil]		27	3,8	1,7	86	20	439	1,3

Окислительно-восстановительный потенциал. В дерново-подбуре ОВП характеризуется нормальным распределением ($p_{w-s} = 0,42$). В верхней части горизонта BF на глубине 10–15 см ОВП достигает максимальных значений и снижается в нижней части почвы, что отражает хорошие условия аэрации верхней части профиля и относительно слабые – нижней. Вариабельность значений ОВП минимальна среди обследованных показателей: С_{v1cp}, С_{v2} и С_v < 2%. С_{v1} минимальна (0,7%) в нижней части старопахотного горизонта и максимальна в горизонте We (2,6%), а также в породе (2–3,4%). С_{v2} и С_v дифференцированы схожим образом.

Вариабельность свойств подзола.

Кислотность. В подзоле величина рН имеет нормальное распределение ($p_{w-s} = 0,09$). Реакция среды минимальна (3,7) в средней части почвы (на глубинах 20–35 см).

Таблица 3 [Table 3]

Медианные значения (M) и вариабельность (Cv1, %; n = 5) измерений рН, ЕС и ОБП в изученном дерново-подбуре
 [Median (M) and measurements variability (Cv1, %; n = 5) of pH, electrical conductivity and redox potential in Carbic Podzol studied]

Горизонт [Horizons]	Глубина, см [Depth, cm]	N*	рН				ЕС, мкСм/см Conductivity $\mu\text{S}/\text{cm}$				ОБП, мВ Redox potential, mV			
			M	Cv1	Cv1cp Cv1av	Cv2	M	Cv1	Cv1cp Cv1av	Cv2	M	Cv1	Cv1cp Cv1av	Cv2
AYe [A]	2-5	1	3,7	21,3	10,7	2,9	41	11	11	20	484	2,6	1,6	0,8
		2	3,8	13,7			25	10			490	0,9		
		3	3,8	9,2			33	14			481	1,3		
		4	3,8	4,9			36	10			490	0,9		
		5	3,8	4,4			25	13			486	2,1		
AYpa [Ap]	5-8	1	3,9	3,1	3,5	1,9	18	20	22	17	489	1,5	1,4	1,2
		2	3,7	3,4			24	30			482	2,2		
		3	3,8	4,4			17	25			489	0,9		
		4	3,7	3,6			18	18			492	1,6		
		5	3,7	2,9			22	15			494	0,8		
	8-10	1	3,8	1,9	1,7	2,0	15	25	17	29	492	0,7	1,0	0,7
		2	3,8	1,9			16	16			495	1,1		
		3	3,7	1,9			20	16			499	0,8		
		4	3,6	1,5			29	12			504	1,4		
		5	3,7	1,5			22	14			498	0,8		
BF [Bs]	10-15	1	3,8	3,0	2,1	1,3	20	29	18	23	498	1,6	1,4	1,2
		2	3,8	2,9			25	4			499	1,2		
		3	3,8	1,9			16	15			486	2,2		
		4	3,8	1,4			15	17			498	1,0		
		5	3,7	1,2			19	23			500	0,9		
	15-20	1	4,1	3,7	2,0	2,2	11	34	22	24	474	2,2	1,8	1,2
		2	3,9	2,1			17	20			485	2,5		
		3	4,1	1,1			9	19			489	1,6		
		4	4,0	1,8			13	12			492	1,2		
		5	4,0	1,4			15	24			491	1,7		
C [C]	40-50	1	4,4	4,4	2,5	1,6	3	0	24	9	459	2,6	2,3	0,4
		2	4,5	2,7			3	26			465	2,0		
		3	4,5	2,5			3	34			459	2,4		
		4	4,7	1,2			3	30			462	2,1		
		5	4,6	1,8			3	30			465	2,5		
	60-70	1	4,6	1,9	2,4	1,8	4	34	24	42	455	3,1	2,9	2,1
		2	4,7	2,9			7	12			459	3,1		
		3	4,7	1,9			6	8			450	2,3		
		4	4,8	1,8			5	24			437	2,6		
		5	4,8	3,5			7	40			435	3,4		
Весь профиль [Whole soil]		35	3,8	3,6	2	16	20	23	489	1,8	1,1			

Низкие значения рН свойственны верхней гумусированной части профиля подзолов. Значения водородного показателя возрастают в породе до 4,8. Вариабельность кислотности максимальна в горизонте ВНФ (3,2%) и

минимальна в ВFg (1,3%). Средняя вариабельность по всему профилю подзола ниже, чем дерново-подбура, и составляет 1,7%.

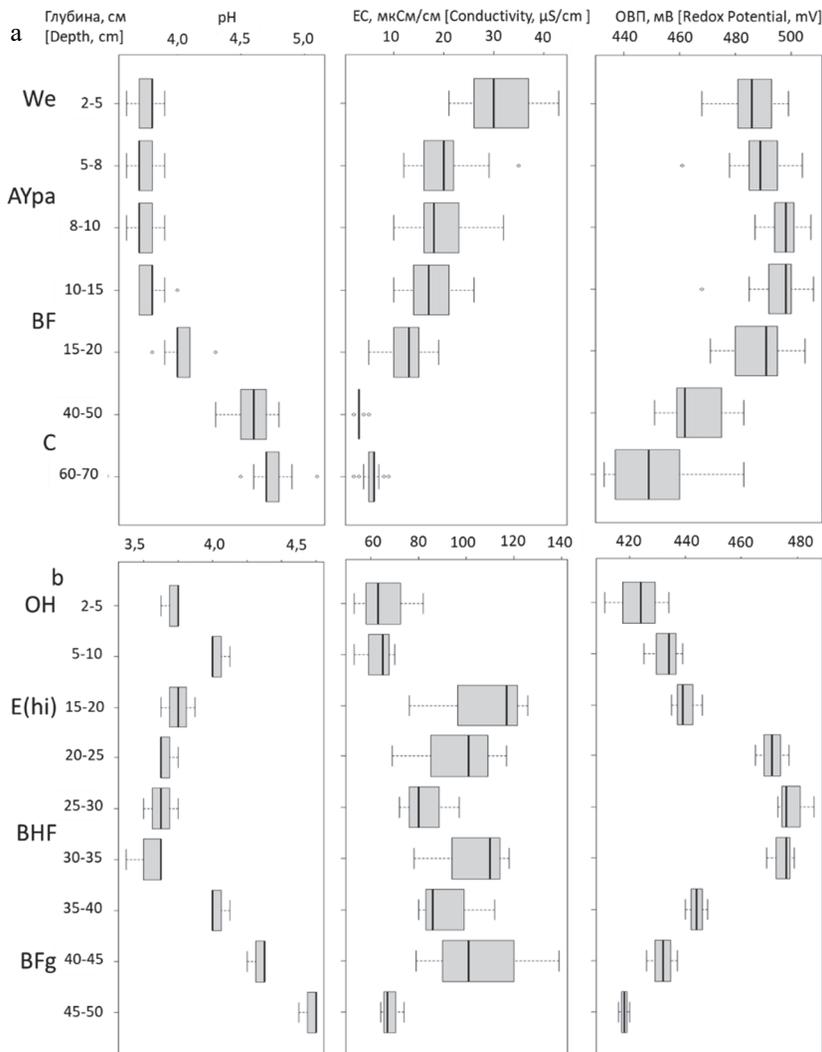


Рис. 3. Вертикальная дифференциация дерново-подбура (а) и подзола (b) по обследованным показателям. Черная линия – медиана, границы серого прямоугольника – первый и третий кватили, усы – 1,5 межкватильного интервала [Fig. 3. Vertical differentiation of Entic Rustic Podzol (a) and Katogleyic Albic Carbic Podzol (b) according to the examined parameters: black line – median, borders of the gray rectangle – the first and third quartiles, whiskers – 1.5 interquartile range]

Электропроводность. В подзоле ЕС характеризуется логнормальным распределением ($p_{w-s} = 0,007$) и более высокими значениями ЕС, чем в дерново-подбуре, достигающими максимальных значений в нижней части горизонта E(hi) и ВHF, что, вероятно, обусловлено накоплением там органоминеральных соединений. Вариабельность ЕС в подзоле колеблется от 8%

на глубине 45–50 см до 26–29% в горизонте E при среднем значении $C_v = 20\%$, которое ниже, чем в дерново-подбуре.

Окислительно-восстановительный потенциал. В подзоле ОВП характеризуется логнормальным распределением ($p_{w-s} = 0,034$). Обе обследованные почвы схожим образом дифференцированы по ОВП: максимум в средней части профиля и пониженные значения в оглеенной почвообразующей породе. Вариабельность ОВП снижается от 2,7% в гумифицированной лесной подстилке до 0,5% в нижней части горизонта Bfg. Средняя вариабельность ОВП в подзоле схожа с C_v в дерново-подбуре и составляет 1,3%.

Обсуждение

Коэффициент вариации величины рН в исследованных почвах составляет всего 1–3% за исключением горизонта We дерново-подбура, где он повышен до 13%, поскольку протогумусовый горизонт реградации наиболее неоднороден, так как формируется под хвойным лесом с густым травянистым покровом, контрастно отличающимся по содержанию зольных элементов и активной миграцией фульвокислот, определяющих водородный показатель в верхней части почв [15, 16]. Снижение вариабельности рН в нижней части профиля исследованного подзола соответствует результатам, полученным для альфегумусовых почв заповедника «Кивач» в Карелии [18]. В средней части подзола вариабельность возрастает до 3,2% в нижней части горизонта BHF. Там увеличивается неоднородность из-за накопления электролитов – фульватов Fe и Al [32, 33]. Увеличение с глубиной в подзоле вариабельности величины рН согласуется с данными других авторов [34]. Пониженную вариабельность водородного показателя в горизонте E подзолов отмечали в подзолистых почвах левобережья реки Конды в центральной части Западной Сибири [35]. Отсутствие выраженного снижения вариабельности значений показателя с глубиной отмечали в почвах тайги [13, 36]. Низкая вариабельность величины рН на уровне 5–9% отмечена в грубогумусовых и иллювиальных горизонтах текстурно-дифференцированных почв Центрально-Лесного заповедника (Тверская область) [19] и в пахотном горизонте агро-дерново-подзолистых почв базы «Чашниково» (Московская область), где у величины рН $C_v = 4–11\%$ на участке 200×200 м [37, 38], а также в других работах [39–41]. Повышенная вариабельность рН в горизонте We согласуется с данными [42, 43], где анализируется восстановление свойств почв после прекращения распашки. Вероятно, это связано с неоднородностью горизонта из-за высокого разнообразия растительности, определяющего контрастный состав формирующегося опада. Значимое влияние состава и возраста древостоя на величину рН песчаных почв подробно описано для подзолов Кольского полуострова [44].

В верхнем (0–10 см) слое дерново-подбура высокую вариабельность (12–15%) величины рН отмечали и в Приморском районе Архангельской области [45]. В этом же исследовании показано сходство внутрипрофильной дифференциации кислотности между подзолистыми почвами и дерново-подбурами оподзоленными.

В почвообразующей породе подбура низкие (близкие к нижнему пределу чувствительности метода) значения ЕС обуславливают повышенные значения $C_v = 43\%$, что объясняется неравномерным распространением электролитов, представленных в крайне небольшом количестве. В подзолах C_v ЕС максимальна в нижней части профиля (на глубине 40–45 см в горизонте BFg) и также обусловлена высокой неоднородностью его материала по содержанию электролитов за счет поступления веществ по преимущественным каналам фильтрации. Кроме того, повышенную вариабельность значений ЕС могут определять неоднородность увлажнённости, минерального состава и содержания органического вещества [46, 47], которые во многом зависят не только от характера растительности и степени антропогенной нагрузки, но и от неоднородности почвообразующих пород [2].

Максимальная C_v значений ОВП в горизонтах We и C может быть связана с неоднородностью поступления кислорода в поверхностный горизонт в условиях обилия корней и в почвообразующую породу за счет ограниченных его перемещения. В подзоле максимальные C_v значений ОВП в гумифицированной подстилке (2–7%) могут быть обусловлены тем, что доступная для микроорганизмов часть органического вещества несет основной запас электронов в почвах [48]. Это подтверждает зависимость ОВП от изменчивости увлажненности и микробиологической активности [49].

Заключение

В дерново-подбуре неоднородность горизонта реградации We приводит к повышенной вариабельности в его пределах кислотности и ОВП. Вариабельность ЕС максимальна в почвообразующей породе в условиях минимального содержания электролитов.

В подзоле вариабельность кислотности возрастает в средней части профиля, где увеличивается неоднородность за счёт локального накопления электролитов – фульватов Fe и Al; ЕС слабо меняется с минимальными значениями в почвообразующей породе, а ОВП максимальна в гумифицированной подстилке.

В горизонтах изученных альфегумусовых почв национального парка «Смоленское Поозерье» вариабельность увеличивается от окислительно-восстановительного потенциала к pH и электропроводности. Средняя по всему профилю дерново-подбура вариабельность измерений pH и электропроводности в целом ниже, чем внутригоризонтная вариабельность. Для всех трех показателей в генетических горизонтах исследованных почв вариабельность находится на низком уровне – 0,2–50%.

Список источников

1. Husson O., Audebert A., Benada J., Soglonou B., Tano F., Dieng I., Bousset L. et al. Leaf EN and pH: A novel indicator of plant stress. Spatial, Temporal and Genotypic Variability in Rice (*Oryza sativa* L.) // *Agronomy*. 2018. № 8 (10). P. 209. doi: 10.3390/agronomy8100209

2. Tano B.F., Brou C.Y., Dossou-Yovo E.R., Saito K., Futakuchi K., Wopereis M.C.S., Husson O. Spatial and temporal variability of soil redox potential, pH and electrical conductivity across a toposequence in the savanna of west Africa // *Agronomy*. 2020. № 10 (11). doi: 10.3390/agronomy10111787
3. Pigozzo A.T.J., Lenzi E., de Luca J., Scapim C.A., da Costa A.C.S. Transition metal rates in latosol twice treated with sewage sludge // *Braz. Arch. Biol. Technol.* 2006. № 49. PP. 515–526.
4. Szafrank-Nakonieczna A., Stepniewska Z. The influence of the aeration status (ODR, Eh) of peat soils on their ability to produce methane // *Wetl. Ecol. Manag.* 2015. № 23. PP. 665–676.
5. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М. : ГЕОС, 2020. 318 с. doi: 10.34756/GEOS.2020.10.37828
6. Husson O. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: A transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy // *Plant and Soil*. 2013. № 362 (3). PP. 389–417. doi: 10.1007/s11104-012-1429-7
7. Klink G.V., Prilipova E.A., Sobolev N.S., Semenov I.N. Perceptual variance of natural soil aggregates with the munsell soil colour charts by unexperienced observers: case study for diverse soils // *Geoderma*. 2023. Vol. 438. PP. 116645. doi: 10.1016/j.geoderma.2023.116645
8. Авдеева Т.Н., Фрид А.С. Неоднородность плодородия почвенного покрова и ее учет при проведении полевых опытов // *Современные проблемы почвоведения. Научные труды почвенного института им. В.В. Докучаева. М., 2000. С. 337–346.*
9. Козлова А.А. Сезонные изменения некоторых свойств почв Южного Предбайкалья, развитых в условиях реликтового микрорельефа // *Вестник КрасГАУ*. 2009. № 11 (38). С. 30–34.
10. Fraterrigo J.M., Rusak J.A. Disturbance-driven changes in the variability of ecological patterns and processes // *Ecol. Lett.* 2008. № 11. PP. 756–770.
11. Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств: на примере дерново-подзолистых почв. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 156 с.
12. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л. Оценка роли рельефа в пространственной изменчивости агрохимически важных почвенных свойств для интенсивно обрабатываемого сельскохозяйственного угодья // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2014. № 3. С. 36–44.
13. Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Артюхов Д.Б., Коробова Н.Л. Пространственное и временное варьирование величин pH в подзолистых почвах Центрально-Лесного биосферного заповедника // *Почвоведение*. 1997. № 11. С. 1339–1348.
14. Холопова Л.Б. Динамика свойств почв в лесах Подмосковья. М. : Наука, 1982. 120 с.
15. Борисичев О.А., Неведров Н.П., Протасова М.В. Особенности пространственного распределения гумуса и его качественные характеристики в подзолах песчаных иллювиально-железистых урочища Горелый лес // *Здоровые почвы – гарант устойчивого развития*. 2018. С. 111–114.
16. Клебанович Н.В., Киндеев А.Л., Сазонов А.А., Червань А.Н., Домась А.С., Ересько М.А., Ефимова И.А., Пространственная неоднородность почвенного покрова и агрохимических показателей почв Солигорского района // *Земля Беларуси*. 2019. № 1. С. 39–48.
17. Шапорина Н.А., Чичулин А.В., Чумбаев А.С. Пространственная вариабельность водно-физических свойств темно-серой лесной почвы в условиях Предсалаирья // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018. № 10. С. 144–149.
18. Бахмет О.Н., Медведева М.В., Мошкина Е.В., Ткаченко Ю.Н., Мамай А.В., Новикова С.Г., Мошникова С.А., Тимофеева В.В., Карпечко А.Ю. Пространственная вариабельность свойств подзолов в зависимости от растительных микрогруппировок в сосняке брусничном // *Лесоведение*. 2022. № 1. С. 47–60. doi: 10.31857/S002411482105003X

19. Енчилик П.Р., Семенов И.Н. Пространственная изменчивость элементного состава почв в катене Центрально-Лесного заповедника // Лесоведение. 2022. № 4. С. 411–418. doi: 10.31857/S0024114822030068
20. Кошкин Г.Н., Березина Н.А. Растительность и почвы национального парка «Смоленское Поозерье». М. : НИА-Природа, 2003. 316 с.
21. Шопина О.В., Герасимова М.И., Бавшин И.М., Хохряков В.Р., Семенов И.Н. Инвентаризация и картографирование почв национального парка «Смоленское Поозерье» // Лесоведение. 2022. № 5. С. 478–493. doi: 10.31857/S0024114822040088
22. Урусевская И.С., Алябина И.О., Винокова В.П., Востокова Л.Б., Дорофеева Е.И., Шоба С.А., Щипихина Л.С. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1 : 2 500 000. М. : Талка+, 2013. 16 с.
23. Терехова Д.А., Смирнова М.А., Гераськина А.П., Шопина О.В., Кузнецова А.И., Бавшин И.М., Клинк Г.В., Енчилик П.Р., Хохряков В.Р., Герасимова М.И., Семенов И.Н. Макрофауна и органическое вещество в постагрогенных песчаных и супесчаных почвах северо-запада Смоленской области (Россия) // Почвоведение. 2023. № 8. С. 981–996. doi: 10.31857/S0032180X23600105
24. Шопина О.В., Гераськина А.П., Кузнецова А.И., Тихонова Е.В., Титовец А.И., Бавшин И.М., Хохряков В.Р., Семенов И.Н. Стадии постагрогенного восстановления компонентов экосистем сосновых лесов национального парка «Смоленское Поозерье» // Почвоведение. 2023. №1. С. 16–28. doi: 10.31857/S0032180X22600706
25. Классификация и диагностика почв России. Смоленск : Универсум. 2004. 341 с.
26. IUSS Working Group WRB, 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Vienna : International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 234 p.
27. Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Аналитические методы исследования. М. : Географический факультет МГУ, 2009. 148 с.
28. FAO. Standard operating procedure for soil pH determination. Rome : Global Soil Partnership, 2021.
29. Wilcox J.C. Determination of electrical conductivity of soil solution // Soil Science. 1947. Vol. 63. PP. 107–117.
30. Semenov I.N., Klink G. V., Lebedeva M.P., Krupskaya V.V., Chernov M.S., Dorzhieva O.V., Kazinskiy M.T. et al. The variability of soils and vegetation of hydrothermal fields in the Valley of Geysers at Kamchatka Peninsula // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Article number 11077. doi: 10.1038/s41598-021-90712-7
31. Westfall J.A., Henning J.G., Edgar C.B. Urban tree measurement variability and the contribution to uncertainty in estimates of ecosystem services // Urban Forestry & Urban Greening. 2021. № 64. Article number 127302. doi: 10.1016/j.ufug.2021.127302
32. Kabata-Pendias A., Szeke B. Trace Elements in Abiotic and Biotic Environments. 1st Edition. Boca Raton : CRC Press, 2015. 468 p. doi: 10.1201/b18198
33. Водяницкий Ю.Н. Гидроксиды железа в почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2010. № 11. С. 1341–1352.
34. Kurasova A.O., Konstantinov A.O., Kulizhskiy S.P., Konstantinova E.Yu., Khoroshavin V. Yu., Loyko S.V. Patterns of soil cover organization within the northern part of the Kondinskaya lowland (Western Siberia) // Tomsk State University Journal of Biology. 2020. №49. PP. 6–24. doi: 10.17223/19988591/49/1
35. Хлуденцов Ж.Г. Особенности изменчивости свойств подзолистых почв средней тайги // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2008. № 10. С. 42–46.
36. Коробова Н.Л. Характеристика кислотно-основного состояния подзолистых почв Центрального лесного государственного биосферного заповедника : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1996. 24 с.
37. Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Артюхов Д.Б., Коробова Н.Л. Пространственное и временное варьирование величин рН в подзолистых почвах Центрально-Лесного биосферного заповедника // Почвоведение. 1997. № 11. С. 1339–1348.

38. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Дмитриев Е.А. Структуры пространственной вариабельности агрохимических свойств пахотной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1999. № 11. С. 1359–1366.
39. Bogunovic I., Mesic M., Zgorelec Z., Aurisic J., Bilandzija D. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil // Soil Till. Res. 2014. № 144. PP. 174–183.
40. Fu W., Zhao K., Jiang P., Ye Z., Tunney H., Zhang C. Fieldscale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements // Soil Res. 2013. № 51. PP. 503–512.
41. Reza S.K., Nayak D.C., Mukhopadhyay S., Chattopadhyay T., Singh S.K. Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system // Arch Agron Soil Sci. 2017. № 63 (11). С. 1489–1498.
42. Телеснина В.М., Ваганов И.Е., Карлсен А.А., Иванова А.Е., Жуков М.А., Лебедев С.М. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) // Почвоведение. 2016. № 1. С. 115–129. doi: 10.7868/S0032180X16010111
43. Енчилик П.Р., Клинк Г.В., Пеунова А.А., Прилипова Е.С., Сергеева Е.А., Соболев Н.С., Семенков И.Н. Постагрогенная динамика рН, электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала в почвах различного гранулометрического состава национального парка «Смоленское Поозерье» (Россия) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2023. № 64. С. 6–29.
44. Лукина Н.В., Орлова М.А., Бахмет О.Н., Тихонова Е.В., Тебенькова Д.Н., Казакова А.И., Крышень А.М., Горнов А.В., Смирнов В.Э., Шашков М.П., Ершов В.В., Князева С.В. Влияние растительности на характеристики лесных почв Республики Карелия // Почвоведение. 2019. № 7. С. 827–842.
45. Besson A., Cousin I., Bourennane H., Nicollaud C., Pasquier C., Richard G. The spatial and temporal organization of soil water at the field scale as described by electrical resistivity measurements // Eur. J. Soil Sci. 2010. № 61. PP. 120–132. doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01211.x
46. Sudduth K.A., Drummond S.T., Kitchen N.R. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. 2001. № 31. PP. 239–264. doi: 10.1016/S0168-1699(00)00185-X
47. Chadwick O.A., Chorover J. The chemistry of pedogenic thresholds // Geoderma. 2001. V. 100. PP. 321–353.
48. Yang J., Hu Y., Bu R. Microscale spatial variability of redox potential in surface soil // Soil Sci. 2006. № 171 (10). PP. 747–753. doi: 10.1097/01.ss.0000230127.86394.45

References

1. Husson O, Audebert A, Benada J, Soglonou B, Tano F, Dieng I, Bousset L, Sarthou J-P, Joseph S, Menozzi P, Boulakia S, Futakuchi K. Leaf Eh and pH: A novel indicator of plant stress. Spatial, Temporal and Genotypic Variability in Rice (*Oryza sativa* L.). *Agronomy*. 2018;8:209. doi: 10.3390/agronomy8100209
2. Tano BF, Brou CY, Dossou-Yovo ER, Saito K, Futakuchi K, Wopereis MCS, Husson O. Spatial and temporal variability of soil redox potential, pH and electrical conductivity across a toposequence in the savanna of west Africa. *Agronomy*. 2020;10(11). doi: 10.3390/agronomy10111787
3. Pigozzo ATJ, Lenzi E, de Luca J, Scapim CA, da Costa ACS. Transition metal rates in latosol twice treated with sewage sludge. *Braz. Arch. Biol. Technol*. 2006;49:515-526.
4. Szafranek-Nakonieczna A, Stepniewska Z. The influence of the aeration status (ODR, Eh) of peat soils on their ability to produce methane. *Wetl. Ecol. Manag*. 2015;23:665-676.
5. Dymov A.A. Sukcessii pochv v boreal'nyh lesah Respubliki Komi. [Soil successions in the boreal forests of the Komi Republic]. Moscow: GEOS; 2020. 318 p. In Russian doi: 10.34756/GEOS.2020.10.37828

6. Klink GV, Prilipova EA, Sobolev NS, Semenov IN. Perceptual variance of natural soil aggregates with the munsell soil colour charts by unexperienced observers: case study for diverse soils. *Geoderma*. 2023;438:116645. doi: 10.1016/j.geoderma.2023.116645
7. Husson O. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: A transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. *Plant and Soil*. 2013;362:389-417. doi: 10.1007/s11104-012-1429-7
8. Avdeeva TN, Frid AS. Neodnorodnost' plodorodija pochvennogo pokrova i ee uchety pri provedenii polevykh opytov [Heterogeneity of soil fertility and its consideration during field experiments]. *Modern Problems of Soil Science*. Moscow: Scientific papers of the V.V. Dokuchaev Soil Institute; 2000;337-346. In Russian
9. Kozlova AA. Sezonnye izmeneniya mikrorel'efa [Seasonal changes in some properties of soils of the Southern Cis-Baikal region, developed under the conditions of a relict microrelief]. *Vestnik KrasGAU*. 2009.;11(38):30-34. In Russian
10. Fraterrigo JM, Rusak JA. Disturbance-driven changes in the variability of ecological patterns and processes. *Ecology Letters*. 2008;11:756-770.
11. Samsonova VP. Prostranstvennaya izmenchivost' pochvennykh svoystv: na primere dernovo-podzolistykh pochv [Spatial variability of soil properties: on the example of Retisols]. Moscow: LKI; 2008. 156 p. In Russian
12. Samsonova VP, Meshalkina JL. Assessing the role of the relief in the spatial variability of agriculturally important soil properties for intensively cultivated agricultural land. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2014;69(3):124-132. doi: 10.3103/S0147687414030065
13. Sokolova TA, Dronova TYa, Artyukhov DB, Korobova NL. Spatial and temporal variation of pH values in podzolic soils of the Central Forest Biosphere Reserve. *Eurasian Soil Science*. 1997; 11:1339-1348.
14. Kholopova LB. Dinamika svoystv pochv v lesakh Podmoskov'ya [Dynamics of soil properties in the forests of the Moscow region]. Moscow: Nauka; 1982. 120 p. In Russian
15. Borischev OA, Nevedrov NP, Protasova MV. Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya gumusa i ego kachestvennyye harakteristiki v podzolah peschanykh illjuvial'no-zhelezistykh urochishha Gorelyj les [Features of the spatial distribution of humus and its qualitative characteristics in sandy illuvial-ferruginous podzols of the Gorely Les tract]. *Zdorovye pochvy – garant ustojchivogo razvitiya*. 2018;111-114. In Russian
16. Klebanovich NV, Kindeev AL, Sazonov AA, Chervan' AN, Domas' AS, Eres'ko MA, Efimova IA. Prostranstvennaya neodnorodnost' pochvennogo pokrova i agrohimicheskikh pokazatelej pochv Soligorskogo rajona [Spatial heterogeneity of soil cover and agrochemical indicators of soils in the Soligorsk region]. *Zemlja Belarusi*. 2019;1:39-48. In Russian
17. Shaporina NA, Chichulin AV, Chumbaev AS. Spatial variability of water-physical properties of dark-gray forest soil under the conditions of Cis-Salair. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2018;10:144-149.
18. Bahmet ON, Medvedeva, MV, Moshkina EV, Tkachenko JuN, Mamaj AV, Novikova SG, Moshnikova SA, Timofeeva VV, Karpechko AJu. Prostranstvennaya variabel'nost' svoystv podzolov v zavisimosti ot rastitel'nykh mikrogruppировок v sosnjake brusnichnom [Spatial variability of podzols properties depending on plant microgroups in lingonberry pine forest]. *Lesovedenie*. 2022;1:47-60. In Russian doi: 10.31857/S002411482105003X
19. Enchilik PR., Semenov IN. Prostranstvennaya izmenchivost' elementnogo sostava pochv v katene Central'no-Lesnogo zapovednika [Spatial variability of the soils' elemental composition in the Central Forest natural reserve catena]. *Lesovedenie*. 2022;4: 411-418. In Russian doi: 10.31857/S0024114822030068
20. Koptsik GN., Berezina NA. Rastitel'nost' i pochvy Nacional'nogo parka "Smolenskoe Poozer'e" [Vegetation and soils of the National Park "Smolensk Poozerye"]. Moscow: NIA-Priroda; 2003. 316 p. In Russian
21. Shopina OV, Gerasimova MI, Bavshin IM, Khokhryakov VR, Semenov IN. Inventarizacija i kartografirovanie pochv nacional'nogo parka "Smolenskoe Poozer'e"

- [Inventory and mapping of soils of the national park "Smolenskoye Poozerye"]. *Lesovedenie*. 2022;5:478-493. In Russian doi: 10.31857/S0024114822040088
22. Urusevskaya IS, Alyabina IO, Vinyukova VP, Vostokova LB, Dorofeeva EI, Shoba SA, Shchipikhina LS. Karta pochvenno-jekologicheskogo rajonirovaniya Rossijskoj Federacii. Masshtab 1:2500000. [Map of soil-ecological zoning of the Russian Federation. Scale 1:2500000.] Moscow: Talka+; 2013. 16 p. In Russian
 23. Terekhova DA, Smirnova MA, Geraskina AP, Shopina OV, Kuznetsova AI, Bavshin IM, Klink GV, Enchilik PR, Khokhryakov VR, Gerasimova MI, Semenov IN. Macrofauna and organic matter in postagrogenic sandy soils at the NW Smolensk region (Russia). *Eurasian Soil Science*. 2023;8:981-996. doi: 10.31857/S0032180X23600105
 24. Shopina OV, Geraskina AP, Kuznetsova AI, Tikhonova EV, Titovets AV, Bavshin IM, Khokhryakov VR, Semenov IN. Stages of restoration of components of post-agrogenic pine forest ecosystems at the National Park "Smolensk Lakeland". *Eurasian Soil Science*. 2023;56(1).
 25. Classification and diagnostics of Russian soils. Smolensk: Universum; 2004. 341 p.
 26. IUSS Working Group WRB, 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 234 p
 27. Krechetov PP, Dianova TM. *Khimiya pochv. Analiticheskie metody issledovaniya* [Soil Chemistry. Analytical methods for soil research] M.: Faculty of geography. 2009. 148 p. In Russian
 28. FAO. Standard operating procedure for soil pH determination. Global Soil Partnership, Rome; 2021
 29. Wilcox JC. Determination of electrical conductivity of soil solution. *Soil Science*. 1947;63:107-117
 30. The variability of soils and vegetation of hydrothermal fields in the Valley of Geysers at Kamchatka Peninsula. *Scientific Reports*. 2021;11:1107. doi: 10.1038/s41598-021-90712-7
 31. Westfall JA, Henning JG, Edgar CB. Urban tree measurement variability and the contribution to uncertainty in estimates of ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021;64:127302. doi: 10.1016/j.ufug.2021.127302
 32. Kabata-Pendias A, Szeke B. Trace Elements in Abiotic and Biotic Environments. 1st Edition. Boca Raton: CRC Press; 2015. 468 p. doi: 10.1201/b18198
 33. Vodyanitsky YuN. Iron Hydroxides in Soils: A Review of Publications). *Eurasian Soil Science*. 2010;43:1244-1254. doi: 10.1134/S1064229310110074
 34. Kurasova AO, Konstantinov AO, Kulizhskiy SP, Konstantinova EYu, Khoroshavin VYu, Loyko SV. Patterns of soil cover organization within the northern part of the Kondinskaya lowland (Western Siberia). *Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;49:6-24. doi: 10.17223/19988591/49/1
 35. Hludencov ZhG. Osobennosti izmenchivosti svojstv podzolistyh pochv srednej tajgi [Peculiarities of variability in the properties of podzolic soils in the middle taiga]. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2008;(10);42-46
 36. Korobova NL. Charakteristika kislотно-osnovnogo sostojaniya podzolistyh pochv Central'nogo lesnogo gosudarstvenno biosfernogo zapovednika [Characteristics of the acid-base state of podzolic soils of the Central Forest State Biosphere Reserve]. [CandSci. Dissertation Abstract, Biology]. Moscow. 1996. 24 p. In Russian
 37. Sokolova TA, Dronova TYa, Artyukhov DB, Korobova NL. Spatial and temporal variation of pH values in podzolic soils of the Central Forest Biosphere Reserve. *Eurasian Soil Sci*. 1997;11:1339-1348.
 38. Samsonova VP, Meshalkina YuL, Dmitriev EA. Spatial variability patterns of the main agrochemical properties of plowed soddy-podzolic soils. *Eurasian Soil Science*. 1999;32(11):1214-1220.
 39. Bogunovic I, Mesic M, Zgorelec Z, Aurisic J, Bilandzija D. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. *Soil Till. Res*. 2014;144:174-183.

40. Fu W, Zhao K, Jiang P, Ye Z, Tunney H, Zhang C. Fieldscale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements. *Soil Research*. 2013;51:503-512.
41. Reza SK, Nayak DC., Mukhopadhyay S., Chattopadhyay T., Singh S.K. Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2017;63(11):1489-1498.
42. Telesnina VM, Vaganov IE, Karlsen AA, Ivanova AE, Zhukov MA, Lebedev SM. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga, Kostroma oblast. *Eurasian Soil Science*. 2016;49(1):102-115. doi: 10.7868/S0032180X16010111
43. Enchilik PR, Klink GV, Peunova AA, Prilipova ES, Sergeeva EA, Sobolev NS, Semenov IN. Postagrogenic Dynamics of pH, Electrical Conductivity and Redox Potential in Soils of Diverse Texture at the Smolensk Poozerie National Park (Russia). *Tomsk State University Journal of Biology*. 2023;64:6-29.
44. Lukina NV, Orlova MA, Tikhonova EV, Tebenkova DN, Kasakova AI, Gornov AV, Smirnov VE, Knyazeva SV, Bakhmet ON, Kryshen AM, Shashkov MP, Ershov VV. The influence of vegetation on the forest soil properties in the republic of Karelia. *Eurasian Soil Science*. 2019;52(7):793-807.
45. Besson A, Cousin I, Bourennane H, Nicollaud C, Pasquier C, Richard G. The spatial and temporal organization of soil water at the field scale as described by electrical resistivity measurements. *European Journal of Soil Science*. 2010;61:120-132. doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01211.x
46. Sudduth KA, Drummond ST, Kitchen NR. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2001;31:239-264. doi: 10.1016/S0168-1699(00)00185-X
47. Chadwick OA, Chorover J. The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma*. 2001;100:321-353.
48. Yang J, Hu Y, Bu R. Microscale spatial variability of redox potential in surface soil. *Soil Science*. 2006;171(10):747-753. doi: 10.1097/01.ss.0000230127.86394.45

Информация об авторах:

Энцилик Полина Романовна – канд. геогр. наук, м.н.с. кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия), н.с. Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (Москва, Россия). E-mail: polimail@inbox.ru

Клинк Галина Викторовна – канд. биол. наук, зав. лабораторией Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН (Москва, Россия). E-mail: galkaklink@gmail.com

Пеунова Алиса Алексеевна – студентка кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия). E-mail: peunovaalisa@yandex.ru

Прилипова Елена Сергеевна – магистрант кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия). E-mail: starchikova.e.s@gmail.com

Сергеева Елизавета Алексеевна – магистрант кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия). E-mail: lisa.sergeeva2204@mail.ru

Соболев Николай Сергеевич – студент кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия). E-mail: kolyhome2000@yandex.ru

Семенов Иван Николаевич – канд. геогр. наук, с.н.с. кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия), с.н.с. Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (Москва, Россия).

E-mail: semenkov@geogr.msu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Polina R. Enchilik, Cand. Sci. (Geogr.), junior researcher, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia), researcher, center for problems of ecology and productivity of forests, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation).

E-mail: polimail@inbox.ru

Galina V. Klink – Cand. Sci. (Biol.), laboratory chief, Institute for Information Transmission Problems named after A.A. Kharkevich RAS (Moscow, Russian Federation).

E-mail: galkaklink@gmail.com

Alisa A. Peunova – student, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation).

E-mail: peunovaalisa@yandex.ru

Elena S. Prilipova – student, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation).

E-mail: starchikova.e.s@gmail.com

Elizaveta A. Sergeeva – student, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation).

E-mail: lisa.sergeeva2204@mail.ru

Nikolay S. Sobolev – student, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation).

E-mail: kolyhome2000@yandex.ru

Ivan N. Semenov – Cand. Sci. (Geogr.), senior researcher, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia), senior researcher, Center for problems of ecology and productivity of forests, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation).

E-mail: semenkov@geogr.msu.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 25.08.2023;
одобрена после рецензирования 03.10.2023; принята к публикации 18.03.2024.*

*The article was submitted 25.08.2023;
approved after reviewing 03.10.2023; accepted for publication 18.03.2024.*