

## ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Научная статья  
УДК 631.41  
doi: 10.17223/19988591/64/1

### **Постагрогенная динамика рН, электропроводности и окислительно-восстановительного потенциала в почвах различного гранулометрического состава национального парка «Смоленское Поозерье» (Россия)**

**Полина Романовна Енчилик<sup>1</sup>, Галина Викторовна Клиник<sup>2</sup>,  
Алиса Алексеевна Пеунова<sup>3</sup>, Елена Сергеевна Прилипова<sup>4</sup>,  
Елизавета Алексеевна Сергеева<sup>5</sup>, Николай Сергеевич Соболев<sup>6</sup>,  
Иван Николаевич Семенов<sup>7</sup>**

*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*

*<sup>1</sup> polimail@inbox.ru*

*<sup>2</sup> galkaklink@gmail.com*

*<sup>3</sup> peunovaalisa@yandex.ru*

*<sup>4</sup> starchikova.e.s@gmail.com*

*<sup>5</sup> lisa.sergeeva2204@mail.ru*

*<sup>6</sup> kolyhome2000@yandex.ru*

*<sup>7</sup> semenkov@geogr.msu.ru*

**Аннотация.** Постагрогенное восстановление почв характерно для многих лесных территорий Европейской России. Поэтому необходимо понимать трансформацию химических свойств, влияющих на качество почвы в таёжной зоне. В национальном парке «Смоленское Поозерье» изучена дифференциация водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала и электропроводности генетических горизонтов почв разного гранулометрического состава под растительностью стадий постагрогенной сукцессии: агроценозом, лугом и лесом с возрастом древостоя < 30 лет, 30–50 лет, 50–65 лет и > 66 лет. Величина рН гумусового горизонта луговых почв лёгкого гранулометрического состава выше, чем лесных, за счет сельскохозяйственных мероприятий и меньшей буферной способности. В супесчаных почвах рН среды меняется на большей глубине и проявляется контрастнее, чем в суглинистых. Водородный показатель материнских пород супесчаных почв восстанавливается до природного уровня на более поздних стадиях сукцессии. Окислительно-восстановительный потенциал органических горизонтов в луговых почвах ниже, чем в лесных. В гумусовых горизонтах суглинистых почв в процессе восстановления он изменяется контрастнее, чем в супесчаных. В минеральных горизонтах песчаных и супесчаных почв окислительно-восстановительный потенциал зависит от рН. Степень влияния сельскохозяйственной деятельности на электропроводность почв зависит от гранулометрического состава: в супесчаных почвах внесение удобрений способствует увеличению электропроводности, а на суглинистые почвы, благодаря их высокой буферной способности, воздействие незначительно. Внутри исследованных групп

почв максимальная вариабельность у электропроводности (коэффициент вариации 14–136%). Вариабельность величины рН и окислительно-восстановительного потенциала существенно ниже: 1–18 и 1–22% соответственно. Из-за высокой пространственной вариабельности электропроводности для целей исследования её временной изменчивости рекомендуется большее количество повторностей с комплексным определением физико-химических свойств почв.

**Ключевые слова:** агрохимические показатели, плодородие почвы, сельское хозяйство, физико-химические свойства почв, хроносерия

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

**Для цитирования:** Енчилик П.Р., Клинк Г.В., Пеунова А.А., Прилипова Е.С., Сергеева Е.А., Соболев Н.С., Семенов 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. doi: 10.17223/19988591/64/1

Original article

doi: 10.17223/19988591/64/1

## **Postagrogenic Dynamics of pH, Electrical Conductivity and Redox Potential in Soils of Diverse Texture at the Smolensk Poozerie National Park (Russia)**

**Polina R. Enchilik<sup>1</sup>, Galina V. Klink<sup>2</sup>, Alisa A. Peunova<sup>3</sup>, Elena S. Prilipova<sup>4</sup>, Elizaveta A. Sergeeva<sup>5</sup>, Nikolay S. Sobolev<sup>6</sup>, Ivan N. Semenkov<sup>7</sup>**

<sup>1, 3, 4, 5, 6, 7</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

<sup>1, 7</sup> *Center for Problems of Ecology and Productivity of Forests, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

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

<sup>1</sup> *polimail@inbox.ru*

<sup>2</sup> *galkaklink@gmail.com*

<sup>3</sup> *peunovaalisa@yandex.ru*

<sup>4</sup> *starchikova.e.s@gmail.com*

<sup>5</sup> *lisa.sergeeva2204@mail.ru*

<sup>6</sup> *kolyhome2000@yandex.ru*

<sup>7</sup> *semenkov@geogr.msu.ru*

**Summary.** Postagrogenic soil restoration is typical for many areas of European Russia. Therefore, it is necessary to understand the transformation of chemical properties that affect soil quality. Oxidation-reduction potential (Eh), electrical conductivity (EC), and pH value of humus and mineral horizons were studied in the Smolenskoye Poozerie National Park (55°32'N, 31°24'E) soils under the vegetation of different stages of postagrogenic succession: agrocenosis, meadow, and forest with diverse age of the tree stand: <30 years, 30-50 years, 50-65 years, and > 66 years old. The variability of the chemical properties of soils under vegetation within one stage of succession was also investigated.

According to the tree stand age of forests and field soils descriptions, the stage of postagrogenic succession was determined for 76 soil sampling sites (See Table 1). Within one day after sampling in an aqueous suspension, the pH value was determined using an Expert-pH pH meter (Saint Petersburg, Russia). EC and Eh were measured using a COM80 EC/TDS meter HM DIGITAL (USA, South Korea). Data processing and calculation of descriptive statistics was carried out in the MC Excel (2013) and Statistica 8 programs: Spearman correlation analysis, coefficient of variation, nonparametric Wilcoxon test (See Table 2, Table 3).

The pH value of the humus horizon of sandy soils under meadows is higher than that of soils under forests (See Figure 1). In sandy soils, due to lower buffer capacity, pH value changed at a greater depth and changes were more noticeable than in loamy soils. In parent materials, i.e. sands, pH value was restored to the natural level at later stages of succession. The redox potential of organic soil horizons depended on the pH value and vegetation. Eh was lower in meadows than in forest soils. In humus horizons, it changed more contrast in loamy soils than in sandy soils. In mineral horizons of sandy soils, Eh depended on the pH value (see Table 1). The electrical conductivity of post-agrogenic soils of the Smolenskoye Poozerye National Park depended on soil texture. In sandy soils, the application of fertilizers increased EC. Mixing and plowing of loamy soils resulted in decrease of EC. In the studied groups of soils under diverse vegetation, the variability was maximum for EC (the coefficient of variation was 14-136%, see Table 2), which confirmed the dependence of this property not only on vegetation and anthropogenic impact, but also parent materials and topography. The variability of pH and Eh was lower (the coefficient of variation was 1-18% and 1-22%, respectively). For studying temporal variability of soil EC, a larger number of replicates with a comprehensive determination of the physicochemical properties is recommended due to the high spatial variability.

*The article contains 2 Figures, 4 Tables and 65 References.*

**Keywords:** ecological indicators, agriculture, chronosequence, physical and chemical properties of soils, soil fertility, space-for-time substitution

**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. Postagrogenic Dynamics of pH, Electrical Conductivity and Redox Potential in Soils of Diverse Texture at the Smolensk Poozerye National Park (Russia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2023;64:6-29. doi: 10.17223/19988591/64/1

## Введение

Со второй половины XX в. многие пахотные земли были заброшены в результате упадка сельского хозяйства, это привело к естественному лесовосстановлению. За счет увеличения площади выводимых из использования пахотных земель образовались постагrogenные экосистемы. Такое явление характерно для многих территорий центра Европейской России, основная часть этих земель (45% их общей площади) расположена в южнотаежной зоне [1, 2]. На месте прежних сельскохозяйственных угодий развиваются постагrogenные фитоценозы, что не может не влиять на морфологические, физико-химические, химические и биологические свойства почв [3]. Характер и направление изменений зависят от разных факторов, однако механизмы их воздействия на свойства почв остаются малоизученными.

Восстановление бывших сельскохозяйственных угодий протекает по классической сукцессии в направлении формирования зональных лесных экосистем [4–7], где важную роль играет смена растительности и состава почвенной макрофауны, участвующей в преобразовании опада.

Согласно О.В. Шопиной [7], постагрогенное восстановление лесных почв Смоленского Поозерья происходит в несколько этапов. В первые 7–10 лет после прекращения распашки под залежными лугами формируются дернина и подстилка, а пахотный горизонт Р преобразуется в серогумусовый постагрогенный (АУра). На следующем этапе (20–30 лет) под мелколиственным или молодым хвойным лесом вследствие минерализации опада, накапливается грубый гумус и формируется пронизанный корнями гумусовый слабо развитый горизонт W. Далее мощность этого горизонта увеличивается, что приводит к формированию горизонта, схожего по свойствам с природным АУра. Главные отличия АУра от природного гумусового горизонта заключаются в его большей мощности и однородности.

При исследовании постагрогенного восстановления почв необходимо понимание изменения химических свойств почв, влияющих на их функционирование при смене условий их формирования в ходе сукцессии. Водородный показатель влияет на растворимость и биодоступность многих веществ [8–11], разнообразие почвенных бактерий [12]. С электропроводностью (ЕС) связаны различные свойства и характеристики: емкость катионного обмена, засоление, концентрация питательных веществ, в том числе удобрений, а также остаточная влажность и гранулометрический состав [13–15].

Окислительно-восстановительный потенциал (Eh) зависит от интенсивности разложения некоторых веществ, нитрификации, денитрификации, метаногенеза, выбросов парниковых газов [16–18]. Кроме того, Eh и рН почвы в значительной степени влияют на растительность, и, наоборот, растения меняют почвенную кислотность и окислительно-восстановительный потенциал, особенно в ризосфере [19].

Подробно описанные изменения морфологических свойств постагрогенных почв и растительности [20–23] весьма тесно связаны с рядом химических и биологических свойств почв [24–28]. Так, на поздних стадиях восстановления сельскохозяйственных и постагрогенных почв Владимирской [29] и Костромской областей [23, 28] снижались значения рН и плодородие почв. Постагрогенная динамика рН, Eh и ЕС генетических горизонтов почв на разных стадиях сукцессии на настоящий момент изучена недостаточно, хотя эти факторы очень важны для оценки интенсивности и качества восстановления почв.

Цель работы – оценка внутрипрофильной дифференциации водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала и электропроводности в автоморфных почвах легкого и тяжелого гранулометрического состава разных стадий постагрогенной сукцессии. В рамках нашего исследования мы проверяли следующие научные гипотезы. 1. От пахотных почв к восстановившимся после распашки за счет поступления хвойного опада увеличивается кислотность. В почвах легкого гранулометрического состава с меньшей буферностью изменения рН в процессе восстановления протекают быстрее, чем

в суглинистых. 2. Вне зависимости от гранулометрического состава, в пахотных почвах окислительно-восстановительный потенциал ниже, чем в почвах на поздних стадиях сукцессии (фоновых). 3. Изменение электропроводности постагрогенных почв зависит от их гранулометрического состава.

### Материал и методы

Национальный парк «Смоленское Поозерье» (55°32'00" N, 31°24'00" E) расположен между Валдайской и Смоленско-Московской возвышенностями в 70 км к северу от г. Смоленска (Россия) и в 100 км восточнее г. Витебска (Беларусь) в области умеренно континентального климата в переходной полосе между подтаежными широколиственно-хвойными и хвойными лесами [30]. Почвообразующие породы разнообразны по гранулометрическому составу, представлены валунными суглинками, супесями, флювиогляциальными песками, озерно-ледниковыми отложениями. Их сложные сочетания обуславливают высокую пестроту почвенного и растительного покрова [1, 30, 31]. Согласно почвенно-экологическому районированию России, почвы национального парка «Смоленское Поозерье» принадлежат к провинции Среднерусских южнотаёжных дерново-мелко- и неглубоко-подзолистых почв [32].

На территории Смоленского Поозерья заброшенные пашни зарастают лесом либо вначале проходят луговую стадию [33]. В зависимости от этапа восстановления и возраста лесов постагрогенные почвы территории делят на 7 групп [7]. По карте лесной таксации 2015 г. и полевым описаниям определена стадия постагрогенной сукцессии сообщества для 76 участков почвенного опробования, выполненным на выровненных поверхностях между речья (табл. 1): 0 – пашня – агрофитоценозы с низким биологическим разнообразием и молодыми (пашня годичной давности) залежами; 1 – луг – залежные луговые сообщества; 2 – молодые сосняки и березняки (древостой < 30 лет); 3 – средневозрастные (30–50 лет) сосняки и березняки *Betula pendula* Roth, иногда с примесью ели *Picea abies* (L.) Н. Karst.; 4, 5 – леса 50–65 лет и 66–180 лет соответственно. Почвы последней группы приняты за условный фон. Более подробное описание почв и растительности данных стадий постагрогенной сукцессии представлено в статье [7]. Исследованные почвы развивались преимущественно на валдайских моренных отложениях. Почвы разделены по гранулометрическому составу на основе данных полевого описания. В одну группу были объединены песчаные и супесчаные почвенные разности, во вторую – суглинистые. Такая группировка сохраняется далее по тексту и на иллюстрациях.

Генетические горизонты исследованных почв объединены в группы согласно Классификации (2004): органогенные (O, H) / грубогумусовые, т.е. возникшие в верхней части старопахотного горизонта в ходе естественного лесовосстановления (W, AO, ao), органоминеральные (AY и переходные к нему, P и AYra), элювиальные (E, EL, BEL), срединные (BH, BHF, BF, BC, VT), породе (C).

Таблица 1 [Table 1]

**Группы изученных почв национального парка «Смоленское Поозерье»  
под растительностью разных стадий постагрогенной сукцессии  
[Groups of the “Smolenskoye Poозerye” National Park soils under the vegetation  
of different stages of postagrogenic succession]**

Группа [Groups]	(Су)песчаные почвы [sandy soils]			Суглинистые почвы [loamy soils]		
	Название [Soils, WRB [65]] (N*)	Гори- зонты, n [Horizons], n	Диапазоны глубин гори- зонтов (см) [Depth, cm]	Название [Soils] (n*)	Гори- зонты, n [Horizons], n	Диапазоны глубин гори- зонтов (см) [Depth, cm]
0	Агрозем [Anthrosols] (2)	P, 4 (AY), 3 (E), 1 (BH), 3 C, 15	5–20 15–50 32–40 40–70 40–70	Агрозем [Anthrosols] (3)	P, 6 BT, 1	0–20 5–70
1	Серогумусо- вая поста- агрогенная [Arenosol] (1)	W, 2 AYpa, 3 C, 5	0–2 15–20 40–82	Серогуму- совая поста- агрогенная [Arenosol] (2)	W, 1 AYpa, 3 C, 1	0–10 5–20 40–70
	Дерново- подбур поста- агрогенный [Podzol] (1)	AYpa, 3 BF, 1 C, 1	0–20 30–50 50–100	Дерново- подзолистая постагро- генная [Retisol] (3)	W, 1 AYpa, 6 EL, 6 BT, 3 C, 1	0–2 5–30 20–60 60–70 60–120
2	Псаммозем [Arenosols] (2)	O, 1 W, 1 C, 10	0–3 0–3 3–90	Дерново- подзолистая постагро- генная [Retisol] (1)	AYpa, 3 BEL, 2 BT, 0 C, 0	0–20 60–70 60–70 30–70
	Серогумусо- вая постагро- генная регра- дированная [Arenosol] (1)	ao, 1 AYpa, 2 C, 1	3–6 5–20 40–50	Серогуму- совая поста- агрогенная реградиро- ванная [Umbrisol] (2)	W, 1 AYpa, 4 C, 2	0–3 5–20 40–70
3	Дерново- подбур поста- агрогенный реградиро- ванный [Podzol] (1)	W, 1 AYpa, 3 BF, 1 C, 1	0–3 7–38 40–50 60–70	Дерново- подзолистая постагро- генная ре- градирован- ная [Retisol] (6)	W, 3 AYpa, 15 EL, 2 BT, 7 C, 4	0–3 3–50 30–70 40–70 70–80
	Дерново- подзол поста- агрогенный реградиро- ванный [Podzol] (1)	O, 1 AYpa, 2 E, 1 BF, 1 C/D, 1	3–6 7–20 40–50 60–70 60–80			

Группа [Groups]	(Су)песчаные почвы [sandy soils]			Суглинистые почвы [loamy soils]		
	Название [Soils, WRB [65]] (N*)	Горизонты, n [Horizons], n	Диапазоны глубин горизонтов (см) [Depth, cm]	Название [Soils] (n*)	Горизонты, n [Horizons], n	Диапазоны глубин горизонтов (см) [Depth, cm]
4	Подзол [Podzol] (1)	O, 1 E, 3 ВНF, 2 BFg, 3 Cg, 0	2–1 5–25 25–35 35–50 50–70	Дерново- подзолистая [Retisol] (4)	O, 1 AY, 8 EL, 2 BT, 3 C, 1	0–3 1–20 60–70 40–90 70–90
	Серогуму- совая [Arenosol] (6)	O, 7 AY, 15 C, 14	0–3 30–40 40–70			
	Дерново- подбур [Podzol] (5)	OH, 2 W, 1 AY, 11 BF, 8 C, 8	0–3 3–5 5–20 20–40 40–70		Серогуму- совая [Umbrisols] (4)	W, 1 AY, 10 C, 2
5	Дерново- подбур [Podzol] (8)	O, 4 W, 3 AY, 11 E, 2 ВНF, 1 BF, 7 C, 26	0–8 2–20 10–50 30–70	Дерново- подзолистая [Retisol] (5)	AY, 10 EL, 5 BT, 3 C, 2	0–20 20–40 30–50 50–70
	Серогуму- совая [Arenosol] (13)	O AY C	0–3 0–20 40–70			
	Дерново- подзол [Podzol] (2)	O, 2 H, 1 E, 3 BF, 5 C, 2	1–5 5–20 20–40 40–50 50–80			

Примечание. \*N – количество профилей [number of profiles], n – количество проб [number of samples].

Образцы отбирали в июле 2021 г. из генетических горизонтов почв каждого участка (см. табл. 1). В течение одного дня после пробоотбора в водной суспензии определяли величину pH (соотношение почва: раствор 1:2,5) на pH-метре «Эксперт-pH» [34, 35], EC (1:5) [34, 36] и Eh (1:2,5) на EC/TDS метре COM80 [37]. Обработка данных и расчёт описательной статистики произведен в программах MS Excel 2013 и Statistica 8. Для оценки связей между показателями pH, Eh и EC проводился корреляционный анализ Спирмана [38]. Вариабельность физико-химических свойств почв в каждой выборке оценена с помощью коэффициента вариации (Cv, %). Для определения значимости различий свойств почв на разных стадиях сукцессии использован непараметрический критерий Уилкоксона. Различия считали значимыми при уровне  $p < 0,05$  [39].

## Результаты

**Водородный показатель.** Органогенные и пахотные горизонты почв ранних (0–2) стадий сукцессии слабокислые (табл. 2). Почвы под лесом с возрастом древостоя старше 30 лет сильнокислые и кислые. Вариабельность величины рН органогенных горизонтов почв под молодым лесом (< 30 лет) составляет 2–24% и слабо увеличивается к более поздним стадиям. В органо-минеральных горизонтах почв легкого гранулометрического состава медианные значения рН значимо ( $p = 0,03$ ) снижаются от нейтральных и слабокислых значений в пахотных и луговых почвах до сильнокислых в лесу возрастом 30–50 лет (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2 [Table 2]

**Описательная статистика свойств горизонтов изученных групп почв национального парка «Смоленское Поозерье» под растительностью разных стадий постагрогенной сукцессии**  
**[Descriptive statistics for chemical properties of the horizons of groups of soils studied at the “Smolenskoye Poozerye” National Park under the vegetation cover of different stages of postagrogenic succession]**

Группа почв* [Groups]	n*	рН			Eh, mV			ЕС, $\mu\text{S/cm}$		
		Медиана [Median]	Cv,%	p*	Медиана [Median]	Cv,%	p	Медиана [Median]	Cv,%	p
Органогенные горизонты всех изученных почв [Organogenic topsoil (O horizons, all soils)]										
0	1	6,1	–	–	321	–	–	25	–	–
1	3	6,1	2	0,25	346	15	1	104	83	1
2	4	6,3	13	0,13	310	22	0,62	17	115	0,13
3	5	4,1	16	1	480	5	1	50	71	0,37
4	13	4,7	18	1	429	9	1	63	102	0,39
5	20	4	24	–	431	15	–	72	65	–
Песчаные и супесчаные почвы [sandy soils]										
Гумусовые горизонты [Organo-mineral horizons (A-horizons)]										
0	4	6,7	13	0,25	355	5	0,13	85	73	0,13
1	10	5,8	17	<b>0,03</b>	424	15	0,75	62	73	<b>0,03</b>
2	2	4,9	1	0,045	432	1	0,47	7	20	0,48
3	10	4,2	12	0,34	462	13	0,75	29	67	0,75
4	29	4,9	11	0,34	441	7	0,71	33	96	0,7
5	43	4,9	18	–	445	11	–	27	111	–
Элювиальные горизонты [E-horizons]										
0	1	7,4	–	–	345	–	–	49	–	–
1	3	5,5	3	0,25	419	20	0,25	11	14	1
3	1	3,8	–	–	493	–	–	5	–	–
4	5	4	28	0,61	435	13	0,37	69	107	0,37
5	6	4,2	11	–	496	5	–	31	80	–
В-горизонты [B-horizons]										
0	2	7,4	0	0,48	355	2	0,48	66	47	0,48
3	2	4,1	3	0,48	429	14	0,48	16	96	0,48
4	14	4,6	14	1	439	7	0,18	76	86	1
5	17	4,1	13	–	481	10	–	18	126	–
Почвообразующая порода [C-horizons]										
0	9	6,7	7	<b>0,01</b>	347	6	<b>0,04</b>	29	82	0,72
1	5	6,3	2	0,07	351	8	0,29	54	65	0,72
2	11	6,8	14	<b>0,003</b>	290	13	<b>0,003</b>	19	40	0,75

Группа почв* [Groups]	n*	pH			Eh, mV			ЕС, $\mu\text{S/cm}$		
		Медиана [Median]	Cv,%	p*	Медиана [Median]	Cv,%	p	Медиана [Median]	Cv,%	p
3	1	4,3	–	–	404	–	–	183	–	–
4	24	5	10	–	423	9	–	29	109	–
5	30	4,9	15	–	420	10	–	26	130	–
Суглинистые почвы [loamy soils]										
Гумусовые горизонты [A-horizons]										
0	6	5,7	3	0,22	388	5	<b>0,04</b>	29	136	0,68
1	8	5,7	10	0,07	301	22	0,28	42	103	0,72
2	9	5,5	6	0,13	422	13	0,72	73	29	<b>0,04</b>
3	12	4,7	13	0,34	469	12	0,34	56	45	0,75
4	19	4,7	17	0,75	412	13	0,75	60	118	0,75
5	10	5	14	–	433	5	–	59	62	–
Элювиальные горизонты [E-horizons]										
1	1	5,5	–	–	430	–	–	10	–	–
2	1	5,3	–	–	437	–	–	74	–	–
3	6	5,2	13	0,61	452	11	0,13	46	52	0,61
4	2	5,1	19	0,48	438	10	0,48	79	86	0,48
5	4	5,4	21	–	408	3	–	63	69	–
В-горизонты [B-horizons]										
0	1	5,8	–	–	355	–	–	17	–	–
1	2	5,2	3	0,48	437	9	0,48	62	105	0,48
2	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3	6	4,5	5	1	460	10	1	66	88	1
4	4	5,4	20	1	416	14	1	58	136	1
5	3	4,6	13	–	408	7	–	58	88	–
Почвообразующая порода [C-horizons]										
1	2	5,7	1	0,48	362	21	0,48	41	41	0,48
2	5	5,2	9	0,48	463	14	0,48	20	92	0,48
3	3	4,3	7	0,48	437	7	0,48	29	75	0,48
4	4	5,9	12	0,48	391	11	0,48	61	78	0,48
5	2	6,1	15	–	323	1	–	62	33	–

Примечание. \*Группы почв: 0 – пашня; 1 – луг; 2 – лес < 30 лет; 3 – лес 30–50 лет; 4 – лес 50–65 лет; 5 – лес > 66 лет. n – количество проб. p – уровень значимости различий между фоновыми почвами (5-я группа) и другими; **полужирным** выделены  $p < 0,05$ .

[Note. \*Soil groups: 0 – agrocenosis, 1 – meadow, 2-4 – forest with different age of the tree stand: 2 – <30 years, 3 – 30-50 years, 4 – 50-65 years, and 5 – > 66 years old. n – number of samples. p – level of significance of differences between background soils (group 5) and others;  $p < 0.05$  **bold** indicates significant differences with  $p$  value < 0.05].

В суглинистых почвах различия незначимы ( $p > 0,05$ ). Вариабельность водородного показателя органоминеральных горизонтов (су)песчаных и суглинистых почв менее 20%. Элювиальные горизонты песчаных почв рассмотренных групп значимо не отличаются по водородному показателю. Хотя стоит отметить, что ее медианные значения снижаются от 7,4 на пашне до 3,8–4,0 в почвах под лесом возрастом старше 30 лет. При этом в суглинистых почвах всех стадий восстановления медианные значения величины pH находятся в более узком диапазоне (4,5–5,8). Вариабельность водородного показателя песчаных и супесчаных почв в элювиальном горизонте достигает максимальных значений ( $Cv = 28\%$ ). Водородный показатель альфегумусовых (BF, ВНГ и ВН) горизонтов почв лёгкого гранулометрического

состава варьирует в более широком диапазоне (от 4,1 до 7,4), чем в суглинистых (от 4,5 до 5,8) при понижении от луговых почв к почвам под молодыми лесами. Во всех группах почв  $C_v$  водородного показателя < 20%. В материнских породах легкого гранулометрического состава на первых трех стадиях сукцессии (пашня, луг, лес < 30 лет) величина рН значимо выше ( $p = 0,003-0,04$ ) относительно фоновых почв, вероятно, за счет известкования и миграции избыточных щелочных растворов в нижележащие горизонты. Величина рН почв снижается до 4,3 на более поздних стадиях (лес > 30 лет) сукцессии. Водородный показатель суглинистых пород в рассматриваемых группах почв значимо не отличается. В материнских породах всех групп почв  $C_v$  водородного показателя < 15%.

Полученные результаты по рН почв, на которую в большей степени влияет характер растительности, позволяют объединить рассмотренные почвы в две группы: формирующиеся под лесами и лугами. Показатель рН гумусового горизонта луговых почв лёгкого гранулометрического состава значимо выше, чем лесных ( $p = 0,006$ , табл. 3). В нижних горизонтах эта тенденция сохраняется, но значимость различий теряется (рис. 2).

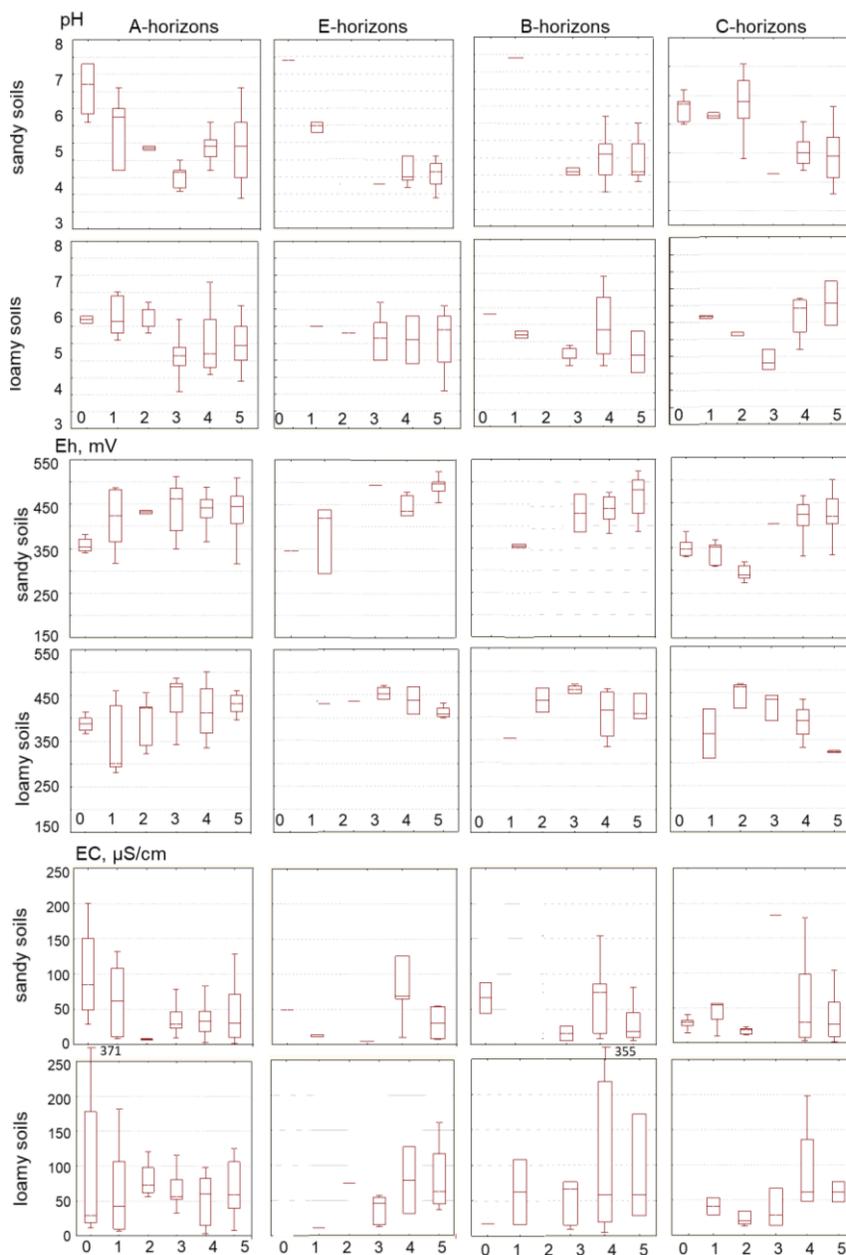
Таблица 3 [Table 3]

**Описательная статистика химических свойств горизонтов луговых и лесных почв**  
**[Descriptive statistics for chemical properties of the soil horizons at meadow and forests]**

Почвы* [Soils]	n	рН			Eh, mV			ЕС, $\mu\text{S/cm}$			
		Медиана [Median]	$C_v, \%$	$p$	Медиана [Median]	$C_v, \%$	$p$	Медиана [Median]	$C_v, \%$	$p$	
Гумусовый горизонт [Ogano-mineral horizons (A-horizons)]											
S	M	14	5,9	18	<b>0,006</b>	376	15	0,42	72	74	0,18
	F	86	4,9	16	–	444	10	–	30	104	–
L	M	14	5,7	8	0,1	377	17	<b>0,02</b>	29	127	0,42
	F	50	5,0	15	–	423	12	–	62	83	–
Элювиальный горизонт [E-horizons]											
S	M	4	5,6	16	0,13	382	18	0,62	13	87	0,62
	F	12	4,1	20	–	479	11	–	53	142	–
L	M	1	5,5	–	–	430	–	–	10	–	–
	F	12	5,3	14	–	439	9	–	52	74	–
B-горизонт [B-horizons]											
S	M	2	7,4	0	0,48	355	2	0,48	66	47	0,48
	F	33	4,2	14	–	456	10	–	30	108	–
L	M	3	5,3	7	0,25	410	13	1	17	112	1
	F	13	4,6	15	–	451	11	–	60	111	–
Почвообразующая порода [C-horizons]											
S	M	14	6,4	6	1	349	7	0,18	32	74	<b>0,01</b>
	F	68	5,1	19	–	416	15	–	21	124	–
L	M	2	5,7	1	0,48	362	21	0,48	41	41	0,48
	F	14	5,2	14	–	404	14	–	48	87	–

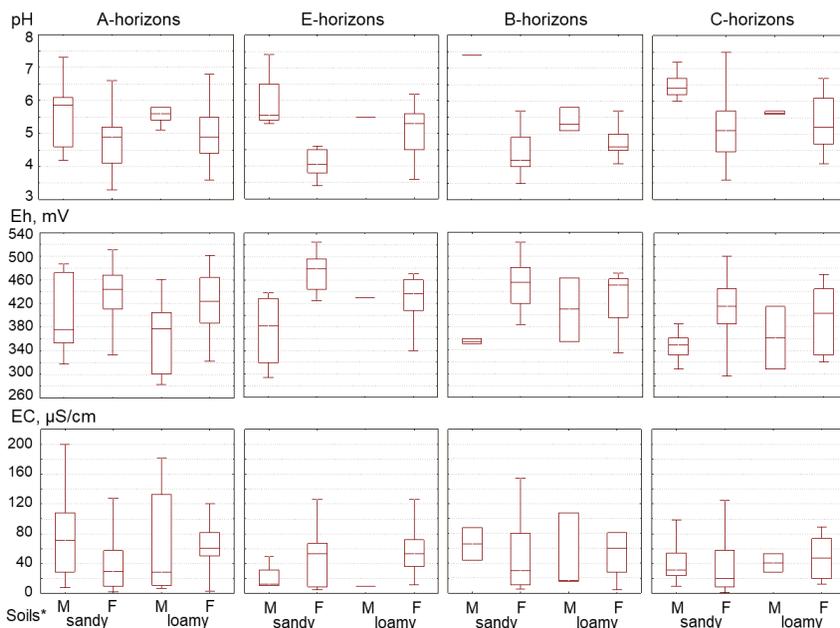
*Примечание.* \*S – песчаные и супесчаные, L – суглинистые, M – под луговой растительностью, F – под лесной растительностью;  $p$  – уровень значимости различий между фоновыми почвами (5-я группа) и другими; **полу жирным** выделены  $p < 0,05$ .

[Note. S – sandy soils, L – loamy soils, M – soils under meadow, F – soils under forest;  $p$  – level of significance of differences between background soils (group 5) and others;  $p < 0.05$  **bold** indicates significant differences with  $p$  value < 0.05].



**Рис. 1.** Дифференциация pH, Eh и EC в горизонтах почв национального парка «Смоленское Поозерье» на разных стадиях восстановления после распашки: 0 – пашня; 1 – луг; 2 – лес < 30 лет; 3 – лес 30–50 лет; 4 – лес 50–65 лет; 5 – фон (лес > 66 лет). Горизонтальная линия – медиана. Границы прямоугольника – первый и третий квартили. Усы – полтора межквартильных интервала

[Fig. 1. Differentiation of pH, Eh, and EC in the soil horizons of the Smolenskoye Poozerye National Park at the different stages of post-agrogenic succession: 0 - arable lands; 1 - meadow; 2 - forest < 30 years; 3 - forest 30-50 years old; 4 - forest 50-65 years old; 5 - background (forest > 66 years old). Horizontal line - median, boundaries of the rectangle - first-third quartiles, whiskers - 1.5 interquartile range]



**Рис. 2.** Дифференциация рН, Eh и ЕС в горизонтах почв национального парка «Смоленское Поозерье» под луговой (М) и лесной (F) растительностью  
**[Fig. 2.** Differentiation of pH, Eh, and EC in soil horizons in the Smolenskoye Poozerie National Park under meadow (M) and forest (F) vegetation]

**Окислительно-восстановительный потенциал.** В органогенных горизонтах почв Смоленского Поозерья, формирующихся под травянистой растительностью, Eh незначительно ниже относительно почв под лесной растительностью (см. табл. 2). Вариабельность этого показателя максимальна в молодом лесу (< 30 лет). Гумусовые горизонты агропочв легкого гранулометрического состава характеризуются пониженным Eh относительно луговых и лесных почв, в которых медианное значение Eh возрастает с увеличением возраста леса. В суглинистых почвах под лесом Eh значительно выше, чем в пахотных ( $p = 0,04$ ). Вариабельность показателя в гумусовом горизонте обследованных групп менее 15%. В элювиальных горизонтах почв на уровне тенденции можно отметить увеличение Eh на поздних стадиях сукцессии и максимальную вариабельность значений показателя в луговых почвах легкого гранулометрического состава (см. табл. 2, рис. 1). В иллювиальном горизонте (су)песчаных и суглинистых почв Eh растет от лугов к лесам. Eh в материнских породах (су)песчаных агропочв ниже, чем в почвах лесов возрастом старше 30 лет ( $p = 0,04$ ). В горизонтах породы суглинистых почв наибольшими медианными значениями Eh характеризуются луговые почвы (463 мВ).

Окислительно-восстановительный потенциал луговых почв во всех горизонтах ниже, чем в лесных (см. табл. 3, рис. 2). Но только в гумусовых горизонтах суглинистых почв наблюдаемые различия значимы ( $p = 0,02$ ).

**Электропроводность.** В органогенных горизонтах медианные значения ЕС повышаются от пахотных почв к луговым и лесным при наибольшей

вариабельности в последних ( $C_v > 100\%$ , см. табл. 2). В гумусовых горизонтах (су)песчаных почв (см. табл. 2, рис. 1) ЕС незначительно снижалась от пахотных и луговых почв к лесным, а в суглинистых почвах повышалась ( $p = 0,03$  и  $0,04$  соответственно) при максимальных  $C_v$  электропроводности в лесных (су)песчаных почвах и пахотных суглинистых (см. табл. 2). Нижележащие минеральные горизонты (су)песчаных и суглинистых почв всех стадий пост-агрогенной сукцессии обладают схожей электропроводностью (см. табл. 2).

Вариабельность ЕС исследуемых почв выше, чем у величины pH и Eh (см. табл. 2). При этом суглинистые почвы обладают большей вариабельностью ЕС, чем (су)песчаные.

В верхней части луговых и лесных почв ЕС значимо не отличается (см. табл. 3, рис. 2). Только в (су)песчаных породах она значимо повышена в лесных почвах относительно луговых ( $p = 0,01$ ).

Анализ корреляционных связей между исследованными свойствами в органоминеральных и минеральных горизонтах почв показал, что водородный показатель песчаных и супесчаных почв (табл. 4) и значения окислительно-восстановительного потенциала обратно пропорциональны. При этом в органоминеральных горизонтах эта связь в наибольшей степени проявляется в луговых почвах ( $r = -0,9$ ), а в минеральных горизонтах – в лесных ( $r = -0,8$ ). В органоминеральных горизонтах суглинистых почв наблюдается схожая тенденция. Однако в минеральных горизонтах зависимость проявляется в меньшей степени.

Таблица 4 [Table 4]

**Корреляции между показателями в горизонтах почв  
[Correlations between properties in horizons of soil groups]**

Показатели [Properties]	(Су)песчаные [Sandy]			(Су)глинистые [Loamy]		
	pH/Eh	pH/EC	Eh/EC	pH/Eh	pH/EC	Eh/EC
Группа почв [Groups of soils]	Все горизонты [All horizons]					
0	-0,71	-0,35	0,25	-0,02	-0,54	-0,08
1	<b>-0,87</b>	0,08	-0,18	<b>-0,76</b>	<b>0,65</b>	-0,49
2	<b>-0,91</b>	0,37	<b>-0,59</b>	<b>-0,87</b>	<b>0,73</b>	<b>-0,63</b>
3	-0,25	0,04	-0,29	-0,28	0,25	-0,09
4	<b>-0,63</b>	0,004	-0,10	<b>-0,69</b>	<b>0,76</b>	<b>-0,52</b>
5	0,01	0,13	-0,14	<b>-0,50</b>	<b>0,49</b>	-0,13
Все [All soils]	<b>-0,23</b>	0,07	-0,06	<b>-0,62</b>	<b>0,49</b>	<b>-0,32</b>
Группа почв [Groups of soils]	Оганоминеральные горизонты (А-горизонты) [Oganomineral horizons (A-horizons)]					
0	-0,94	-0,65	0,44	0,22	-0,50	-0,30
1	<b>-0,95</b>	0,00	-0,13	<b>-0,73</b>	<b>0,81</b>	-0,63
2	-			<b>-0,96</b>	0,30	-0,40
3	-0,16	-0,28	-0,16	-0,17	<b>0,86</b>	-0,34
4	<b>-0,71</b>	-0,35	0,19	<b>-0,68</b>	<b>0,84</b>	<b>-0,57</b>
5	0,13	0,16	0,03	-0,31	<b>0,73</b>	-0,22
Все [All soils]	-0,01	0,11	-0,07	<b>-0,63</b>	<b>0,54</b>	<b>-0,36</b>

Показатели [Properties]	(Су)песчаные [Sandy]			(Су)глинистые [Loamy]		
	pH/Eh	pH/EC	Eh/EC	pH/Eh	pH/EC	Eh/EC
Группа почв [Groups of soils]	Минеральные горизонты (E, B, C-горизонты) [Mineral horizons (E, B, C-horizons)]					
0	-0,64	0,03	0,08	–		
1	-0,56	0,63	-0,52	-0,76	-0,52	0,18
2	-0,83	0,00	-0,32	-0,76	0,85	-0,71
3	-0,93	0,75	-0,54	-0,41	-0,01	0,07
4	-0,64	0,12	-0,15	-0,93	0,64	-0,52
5	-0,52	0,41	-0,31	-0,64	0,32	0,01
Все [All soils]	-0,81	0,03	-0,04	-0,65	0,39	-0,26

Примечание. \* красным отмечены корреляции с  $p < 0,05$ .

[Note. \* red indicates significant correlations with  $p$  value  $< 0.05$ ].

В ораноминеральных горизонтах суглинистых луговых почв и почв под средне- и старовозрастными лесами рН напрямую зависит от ЕС. В минеральных горизонтах, напротив, эта связь в большей степени выражена в почвах под молодым лесом. В почвах легкого гранулометрического состава связь между рН и ЕС не выявлена.

Между электропроводностью и окислительно-восстановительным потенциалом слабая отрицательная зависимость (см. табл. 4). Значимая обратная корреляция в почвах молодого леса (-0,6).

### Обсуждение

На начальных стадиях сукцессии нейтральная реакция органоинеральных горизонтов почв может быть следствием известкования почв при распашке [30–42] и преобладания опада травянистых растений, представленного в большей степени злаками (с доминированием *Festuca rubra*) и видами родов *Artemisia* и *Potentilla* [7], обладающих высокой зольностью [43, 44]. На третьей стадии рН близко к фоновым значениям, что говорит о восстановлении гумусовых горизонтов на этой стадии сукцессии [23, 28, 29]. Отсутствие значимых различий водородного показателя суглинистых почв на разных стадиях восстановления после распашки обусловлено повышенной буферной способностью почв тяжелого гранулометрического состава [45]. Это подтверждают ранее полученные экспериментальные данные, что при внесении одной и той же дозы извести наибольший сдвиг значений рН происходил на супесчаных почвах, наименьший – на тяжелосуглинистых [46]. Однако незначительное подкисление гумусовых горизонтов суглинистых почв на более поздних стадиях сукцессии указывает на медленное восстановление почв тяжелого гранулометрического состава [47]. Увеличение значений рН в песчаных и супесчаных материнских породах под молодыми лесами (< 30 лет), вероятно, является следствием миграции щелочных растворов Са и Mg, возникших при известковании, в нижележащие горизонты.

Низкая вариабельность величины рН в горизонтах исследованных почв согласуется с данными по пахотному горизонту агро-дерново-подзолистых

почв базы «Чашниково» (Московская область), где у величины  $pH_{Cv} = 4-11\%$  на участке  $200 \times 200$  м [48]. Аналогичные результаты представлены и в других работах [49–52]. Снижение варьирования водородного показателя почв на поздних стадиях постагрогенной сукцессии, вероятно, связано с дифференциацией химических свойств и гранулометрического состава пахотной почвы, неоднородности которой сглаживаются при восстановлении зональных почв, что уже отмечалось ранее [23].

В результате сельскохозяйственного использования Eh почв может как повышаться, так и понижаться [19, 53, 54]. Известкование и распашка вызывают значительное увеличение этого показателя в пахотных почвах [55]. Уплотнение, травосеяние и внесение органических удобрений, напротив, снижают окислительно-восстановительный потенциал [56], что наблюдается на первых стадиях сукцессии в гумусовых горизонтах суглинистых почв и в (су)песчаных породах, обследованных нами. В породах под молодыми лесами (< 30 лет) снижение Eh обусловлено более щелочными условиями среды [57].

Пространственная вариабельность Eh почв зависит от изменчивости микробиологической активности, растительной ассоциации и степени антропогенного воздействия [58]. Внутри групп исследованных почв национального парка «Смоленское Поозерье» эти показатели однородны, что может быть причиной низкой вариабельности Eh.

Электропроводность почв легкого гранулометрического состава в природных условиях ниже, чем в почвах тяжелого [59–62]. На электропроводность почв легкого гранулометрического состава большее влияние оказывает химическое воздействие сельского хозяйства. Так, увеличению ЕС в пахотных и луговых песчаных и супесчаных почвах могут способствовать удобрения, содержащие электролиты. На почвах тяжелого гранулометрического состава в меньшей степени отражается влияние сельскохозяйственной деятельности благодаря их высокой буферной способности. В суглинистых почвах исходно выше содержание электролитов, поэтому внесение электролитов с удобрениями менее значимо. Высокая вариабельность ЕС исследованных почв обусловлена влиянием изменчивых внутри почвенных групп природных факторов: увлажненностью почв, гранулометрическим и минералогическим составом, содержанием органического вещества, порозностью и температурой [63, 64], которые во многом зависят не только от характера растительности и степени антропогенной нагрузки, но и от неоднородности почвообразующих пород и положения разреза в рельефе [55].

### **Заключение**

Естественное лесовосстановление бывших сельскохозяйственных угодий и смена растительных сообществ с лугов на хвойные леса в национальном парке «Смоленское Поозерье» сопровождается подкислением почв за счет кислого опада хвойных деревьев, вымывания и разрушения известковых и минеральных удобрений в нижнюю часть профиля. В наибольшей

мере наблюдаемые изменения водородного показателя проявляются в гумусовых горизонтах (су)песчаных почв с меньшей буферной способностью относительно суглинистых. В (су)песчаных почвах антропогенное воздействие достигает материнской породы, и величина рН восстанавливается на более поздних стадиях постагрогенной сукцессии.

Окислительно-восстановительный потенциал органогенных горизонтов суглинистых почв зависит от состава растительности и увеличивается в лесных почвах. В минеральных горизонтах рН среды незначительно влияет на окислительно-восстановительный потенциал (су)песчаных почв.

Изменение электропроводности при сельскохозяйственном воздействии зависит от гранулометрического состава почв: внесение удобрений увеличивает ЕС относительно фоновых значений в гумусовых горизонтах (су)песчаных почв, а механическое перемешивание – снижает в суглинистых.

В однотипных выборках пространственная вариабельность изученных показателей увеличивается от рН и Eh к ЕС. В отношении последнего из-за высокой пространственной вариабельности труднее оценить изменения в почвах разных стадий постагрогенной сукцессии, поэтому для целей исследования временной изменчивости электропроводности рекомендуется большее количество повторностей с комплексным определением физико-химических свойств почв, таких как увлажненность, температура, содержание органического вещества, гранулометрический и минералогический состав.

#### Список источников

1. Ershov D.V., Gavriluyuk E.A., Koroleva N.V., Belova E.I., Tikhonova E.V., Shopina O.V., Titovets A.V. et al. Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands during Post-Soviet Period: A Comparative Landsat Data Analysis of Bordering Regions in Russia and Belarus // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14 (2). Art. 322. doi: 10.3390/rs14020322
2. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М. : Геос, 2010. 416 с.
3. Hooker T.D., Compton J.E. Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment // *Ecological Applications*. 2003. Vol. 13 (2). P. 99–313.
4. Lyuri D.I., Karelin D.V., Kudikov A.V., Goryachkin S.V. Changes in soil respiration in the course of the postagrogenic succession on sandy soils in the southern taiga zone // *Eurasian Soil Science*. 2013. № 46. P. 935–947. doi: 10.1134/S1064229313070041
5. Vladychensky A.S., Telesnina V.M., Ivanko M.V. Changes in the humus state of forest soils of the European territory and Siberia during the withdrawal from agricultural use // *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2006. Vol. 61, № 3. P. 3–10.
6. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мостовая А.С., Овсепян Л.А., Телеснина В.М., Личко В.И., Баева Ю.И. Влияние процессов естественного лесовосстановления на микробиологическую активность постагрогенных почв европейской части России // *Лесоведение*. 2018. № 1. С. 3–23. doi: 10.7868/S0024114818010011
7. Shopina O.V., Geraskina A.P., Kuznetsova A.I., Tikhonova E.V., Titovets A.V., Bavshin I.M., Khokhryakov V.R. et al. Stages of restoration of components of post-agrogenic pine forest ecosystems at the National Park “Smolensk Lakeland” // *Eurasian Soil Science*. 2023. Vol. 56, № 1. P. 16–28. doi: 10.1134/S1064229322601639

8. 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 // *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2006. Vol. 49 (3). P. 515–526. doi: 10.1590/S1516-89132006000400020
9. Rousk J., Brookes P.C., Baath E. Investigating the mechanisms for the opposing pH-relationships of fungal and bacterial growth in soil // *Soil Biology and Biochemistry*. 2010. Vol. 42. P. 926–934.
10. Souza L.F.T., Billings S.A. Temperature and pH mediate stoichiometric constraints of organically derived soil nutrients // *Global Change Biology*. 2022. Vol. 28. P. 1630–1642. doi: 10.1111/gcb.15985
11. Malik A.A., Puissant J., Buckeridge K.M., Goodall T., Jehmlich N., Chowdhury S., Gweon H.S., Peyton J.M., Mason K.E., Agtmaal M., Bland A., Clark I.M., Whitaker J., Pywell R.F., Ostle N., Gleixner G., Griffiths R.I. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. Art. 3591. doi: 10.1038/s41467-018-05980-1
12. Etesami H., Beattie G.A. Mining halophytes for plant growth-promoting halotolerant bacteria to enhance the salinity tolerance of non-halophytic crops // *Frontiers in Microbiology*. 2018. Vol. 9. Art. 148. doi: 10.3389/fmicb.2018.00148
13. Husson O., Audebert A., Benada J., Soglonou B., Tano F., Dieng I., Bousset L. et al. Leaf EH and pH: A novel indicator of plant stress. Spatial, Temporal and Genotypic Variability in Rice (*Oryza sativa L.*) // *Agronomy*. 2018. Vol. 8 (10). Art. 209 doi: 10.3390/agronomy8100209
14. Paillet Y., Cassagne N., Brun J.J. Monitoring forest soil properties with electrical resistivity // *Biology and Fertility of Soils*. 2010. Vol. 46. P. 451–460.
15. Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richard G., Samoué A. Electrical resistivity survey in soil science: A review // *Soil and Tillage Research*. 2005. Vol. 83. P. 173–193.
16. Szafranek-Nakonieczna A., Stępniewska Z. The influence of the aeration status (ODR, Eh) of peat soils on their ability to produce methane // *Wetlands Ecology and Management*. 2015. Vol. 23. P. 665–676. doi: 10.1007/s11273-015-9410-x
17. Snakin V.V., Prisyazhnaya A.A., Kovacs-Lang E. *Soil Liquid Phase Composition*. 1st ed. Amsterdam : Elsevier, 2001.
18. Husson O., Husson B., Brunet A., Babre D., Alary K., Sarthou J.P., Charpentier H., Durand M., Benada J., Henry M. Practical improvements in soil redox potential (Eh) measurement for characterisation of soil properties. Application for comparison of conventional and conservation agriculture cropping systems // *Analytica Chimica Acta*. 2016. Vol. 906. P. 98–109.
19. 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. Vol. 362. P. 389–417. doi: 10.1007/s11104-012-1429-7
20. Kalinina O., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Giani L. Dynamics of carbon pools in post-agrogenic sandy soils of southern taiga of Russia // *Carbon Balance and Management*. 2010. Vol. 5. 1. doi: 10.1186/1750-0680-5-1
21. Kalinina O., Giani L., Goryachkin S.V., Lyuri D.I. Postagrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia // *Catena*. 2015. Vol. 129. P. 18–29. doi: 10.1016/j.catena.2015.02.016
22. Baeva Y.I., Kurganova I.N., Gerenyu V., Ovsepyan L., Telesnina V.M., Tsvetkova Yu.D. Change in aggregate structure of various soil types during the succession of abandoned lands // *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2017. Vol. 88, № 88. P. 47–74. doi: v10.7868/s0032180x17030029
23. Telesnina V.M., Vaganov I.E., Karlsen A.A., Ivanova A.E., Zhukov M.A., Lebedev S.M. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga, Kostroma oblast // *Eurasian Soil Science*. 2016. doi: 10.1134/S1064229316010117
24. Litvinovich A.V. Postagrogenic evolution of well cultivated soddy-podzolic soils in the northwestern of the nonchernozemic zone // *Agrochemistry*. 2009. P. 85–93.

25. Kazakova A.I., Semikolennykh A.A., Gornov A.V., Gornova M.V., Lukina N. V. Influence of Vegetation on the Lability Characteristics of Sandur Areas of the Bryansky Les Nature Reserve // Moscow University Soil Science Bulletin. 2018. doi: 10.3103/s0147687418030055
26. Koptsik G.N., Kupriianova Y.V., Kadulin M.S. Spatial Variability of Carbon Dioxide Emission by Soils in the Main Types of Forest Ecosystems at the Zvenigorod Biological Station of Moscow State University // Moscow University Soil Science Bulletin. 2018. doi: 10.3103/s0147687418020035
27. Dymov A.A. Soil successions in the boreal forests of the Komi Republic. GEOS. Moscow, 2020. 318 p. doi: 10.34756/GEOS.2020.10.37828
28. Ryzhova I.M., Telesnina V.M., Sitnikova A.A. Dynamics of Soil Properties and Carbon Stocks Structure in Postagrogenic Ecosystems of Southern Taiga during Natural Reforestation // Eurasian Soil Science. 2020. doi: 10.1134/S1064229320020106
29. Kurochkin I.N., Chugai N.V. The change dynamics of acidity and humus content in agricultural and former agricultural soils of Vladimir Oblast // International Research Journal. 2020. Vol. 12, № 102. P. 69–72. doi: 10.23670/IRJ.2020.102.12.046
30. Koptsik G.N., Berezina N.A. Vegetation and soils of the Smolenskoye Poozerye National Park. М. : NIA-Prirod, 2009. 316 p.
31. Королева Н.В., Тихонова Е.В., Ершов Д.В., Салтыков А.Н., Гаврилюк Е.А., Пугачевский А.В. Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке «Смоленское Поозерье» за 25 лет по спутниковым данным Landsat // Лесоведение. 2018. № 2. С. 83–96. doi: 10.7868/S0024114818020018
32. Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Shoba S.A. The map of soil-geographic zonation of the Russian Federation 1:8 000 000. 2020.
33. Хохлов С.Ф. Постагрогенные дерново-подзолистые почвы под лесом и лугом в Подмосковье: свойства, эволюция и элементы водного баланса : дис. ... канд. с.-х. наук. М. : Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2015. 158 с.
34. Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Аналитические методы исследования. М. : Географический факультет МГУ, 2009. 148 с.
35. FAO. Standard operating procedure for soil pH determination // Global Soil Partnership, 2021.
36. Wilcox J.C. Determination of electrical conductivity of soil solution // Soil Science. 1947. doi: 10.1097/00010694-194702000-00003
37. 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. doi: 10.1038/s41598-021-90712-7
38. Lehman A., Rourke N.O. JMP for Basic Univariate and Multivariate Statistics A Step-by-Step Guide // Analysis. 2005
39. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods // Biometrics Bulletin. 1945. doi: 10.2307/3001968
40. Moreira A., Fageria N.K. Liming influence on soil chemical properties, nutritional status and yield of alfalfa grown in acid soil // Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2010. doi: 10.1590/s0100-06832010000400022
41. Vigovskis J., Jermuss A., Svarta A., Sarkanbarde D. The changes of soil acidity in long-term fertilizer experiments // Zemdirbyste-Agriculture. 2016. doi: 10.13080/z-a.2016.103.017
42. Junior E.C., Gonçalves Jr A.C., Seidel E.P., Ziemer G.L., Zimmermann J., Oliveira V.H.D. de, Schwantes D. et al. Effects of Liming on Soil Physical Attributes: A Review // The Journal of Agricultural Science. 2020. doi: 10.5539/jas.v12n10p278
43. Perelman A.I., Kasimov N.S. Landscape geochemistry. Astrea-200. М., 1999. 768 p.
44. Bobrovskii M.V. Effect of the Historical Land use on the Structure of Forest Soils in European Russia // Eurasian Soil Science. 2010. doi: 10.1134/S1064229310130053
45. Bakina L.G. The nature of soil acidity of soddy-podzolic soils on different particle size distribution and its change during the liming // Agrochemistry. 2015. Vol. 3. P. 3–13

46. Шильников И.А., Лебедева Л.А. Известкование почв. М. : Агропромиздат, 1987. 169 с.
47. Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес де Г.В.О., Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мирин Д.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагроенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. doi: 10.7868/s0032180x17120115
48. Samsonova V.P., Meshalkina J.L. 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. doi 10.3103/s0147687414030065
49. Fu W., Zhao K., Jiang P., Ye Z., Tunney H., Zhang C. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements // Soil Science. 2013. doi: 10.1071/SR13027
50. Bogunovic I., Mesic M., Zgorelec Z., Jurisic A., Bilandzija D. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil // Soil and Tillage Research. 2014. doi: 10.1016/j.still.2014.07.020
51. 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 // Archives of Agronomy and Soil Science. 2006. Vol. 63, № 11. P. 1489–1498. doi: 10.1080/03650340.2017.1296134
52. Енчилик П.Р., Семенков И.Н. Пространственная изменчивость элементного состава почв в катене Центрально-Лесного заповедника // Лесоведение. 2022. № 4. С. 411–418. doi: 10.31857/S0024114822030068
53. Šimek M., Cooper J.E. The influence of soil pH on denitrification: Progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years // European Journal of Soil Science. 2002. doi: 10.1046/j.1365-2389.2002.00461.x
54. Gavryshko O., Olifir J., Partyka T. Agrogenic changes in the redox potential in the profile of light-grey forest surface gleyed soils of the Western Forest-Steppe // Bulletin of Agricultural Science. 2020. doi: 10.31073/agrovisnyk202002-03
55. Savich V., Lareshin V., Dubinok N., Gabbasova I., Mousa K. Ameliorative and agronomic assessment of the redox state of soils. М. : RUDN Univ., 2006. 484 p.
56. Chesworth W. Redox, soils, and carbon sequestration // Edafologia. 2004
57. 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. Vol. 10, № 11. doi: 10.3390/agronomy10111787
58. Yang J., Hu Y., Bu R. Microscale spatial variability of redox potential in surface soil // Soil Science. 2006. doi: 10.1097/01.ss.0000230127.86394.45
59. Machado P.L.O. de A., Bernardi A.C. de C., Valencia L.I.O., Molin J.P., Gimenez L.M., Silva C.A., Andrade A.G. de et al. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto // Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2006. doi: 10.1590/s0100-204x2006000600019
60. Molin J.P., De Castro C.N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique // Open Access Scientia Agricola. 2008. doi: 10.1590/S0103-90162008000600001
61. Moral F.J., Terrón J.M., Silva J.R.M. da. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques // Soil and Tillage Research. 2010. doi: 10.1016/j.still.2009.12.002
62. Aimrun W., Amin M.S.M., Nouri H. Paddy field zone characterization using apparent electrical conductivity for rice precision farming // International Journal of Agricultural Research. 2011. doi: 10.3923/ijar.2011.10.28
63. 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. doi: 10.1016/S0168-1699(00)00185-X
64. Besson A., Cousin I., Bourennane H., Nicoullaud B., Pasquier C., Richard G., Dorigny A. et al. The spatial and temporal organization of soil water at the field scale as described by

electrical resistivity measurements // European Journal of Soil Science. 2010. doi: 0.1111/j.1365-2389.2009.01211.x

65. IUSS Working Group WRB. 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.

### References

1. Ershov D.V., Gavriluyk E.A., Koroleva N.V., Belova E.I., Tikhonova E.V., Shopina O.V., Titovets A. V., et al. Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands during Post-Soviet Period: A Comparative Landsat Data Analysis of Bordering Regions in Russia and Belarus. *Remote Sensing*. 2022;14(2):322. doi: 10.3390/rs14020322
2. Ljuri D.I., Gorjachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Dinamika selskohozyajstvennyh zemel Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv* [Dynamics of agricultural lands in Russia in the twentieth century and post-agrogenic restoration of vegetation and soils]. Moscow: Geos, 2010. 416 p. In Russian
3. Hooker T.D., Compton J.E. Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation during the first century after agricultural abandonment. *Ecological Applications*. 2003;13(2):99-313.
4. Lyuri D.I., Karelin D. V., Kudikov A. V., Goryachkin S. V. Changes in soil respiration in the course of the postagrogenic succession on sandy soils in the southern taiga zone. *Eurasian Soil Science*. 2013;46:935-947. doi: 10.1134/S1064229313070041
5. Vladychensky A.S., Telesnina V.M., Ivanko M.V. Changes in the humus state of forest soils of the European territory and Siberia during the withdrawal from agricultural use. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2006;61(3):3-10.
6. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Mostovaya A.S., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Lichko V.I., Baeva Y.I. *Vlijanie processov estestvennogo lesovosstanovlenija na mikrobiologicheskuju aktivnost post-agrogenykh pochv evropejskoj chasti rossii* [The effect of reforestation on microbial activity in post-agrogenic soils in European part of Russia]. *Russian Journal of Forest Science*. 2018;1:3-23. In Russian doi: 10.7868/S0024114818010011
7. Shopina O.V., Geraskina A.P., Kuznetsova A.I., Tikhonova E.V., Titovets A.V., Bavshin I.M., Khokhryakov V.R., et al. Stages of restoration of components of post-agrogenic pine forest ecosystems at the National Park "Smolensk Lakeland". *Eurasian Soil Science*. 2023;56(1):16-28. doi: 10.1134/S1064229322601639
8. 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 // *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2006;49(3). doi: 10.1590/S1516-89132006000400020
9. Rousk J., Brookes P.C., Baath E. Investigating the mechanisms for the opposing pH-relationships of fungal and bacterial growth in soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 2010;42:26-934.
10. Souza, L.F.T., Billings, S.A. Temperature and pH mediate stoichiometric constraints of organically derived soil nutrients. *Global Change Biology*. 2022;28:1630-1642. doi: 10.1111/gcb.15985
11. Malik A.A., Puissant J., Buckeridge K.M., Goodall T., Jehmlich N., Chowdhury S., Gweon H.S., Peyton J.M., Mason K.E., Agtmaal M., Blaud A., Clark I.M., Whitaker J., Pywell R.F., Ostle N., Gleixner G., Griffiths R.I. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes. *Nature Communications*. 2018;9:3591. doi: 10.1038/s41467-018-05980-1
12. Etesami H., Beattie G.A. Mining halophytes for plant growth-promoting halotolerant bacteria to enhance the salinity tolerance of non-halophytic crops. *Frontiers in Microbiology*. 2018;9:148. doi: 10.3389/fmicb.2018.00148
13. Husson O., Audebert A., Benada J., Soglonou B., Tano F., Dieng I., Bousset L., et al. Leaf EH and pH: A novel indicator of plant stress. Spatial, Temporal and Genotypic Variability in Rice (*Oryza sativa* L.). *Agronomy*. 2018;8(10):209. doi: 10.3390/agronomy8100209
14. Paillet, Y., Cassagne, N., Brun, J.J. Monitoring forest soil properties with electrical resistivity. *Biology and Fertility of Soils*. 2010;46:451-460.

15. Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richard G., Samouë, A. Electrical resistivity survey in soil science: A review. *Soil and Tillage Research*. 2005;83:173–193.
16. Szafranek-Nakonieczna A., Stępniewska Z. The influence of the aeration status (ODR, Eh) of peat soils on their ability to produce methane. *Wetlands Ecology and Management*. 2015;23:665–676. doi: 10.1007/s11273-015-9410-x
17. Snakin, V.V.; Prisyazhnaya, A.A.; Kovacs-Lang, E. *Soil Liquid Phase Composition*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier 2001. ISBN 0-444-50675-6.
18. Husson O., Husson B., Brunet A., Babre D., Alary K., Sarthou J.P., Charpentier H., Durand M., Benada J., Henry M. Practical improvements in soil redox potential (Eh) measurement for characterisation of soil properties. Application for comparison of conventional and conservation agriculture cropping systems. *Analytica Chimica Acta*. 2016;906:98–109.
19. 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
20. Kalinina O., Goryachkin S. V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Giani L. Dynamics of carbon pools in post-agrogenic sandy soils of southern taiga of Russia. *Carbon Balance and Management*. 2010;5:1. doi: 10.1186/1750-0680-5-1
21. Kalinina O., Giani L., Goryachkin S.V., Lyuri D.I. Postagrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia. *Catena*. 2015;129:18–29. doi: 10.1016/j.catena.2015.02.016
22. Baeva Y.I., Kurganova I.N., Gerenyu V., Ovsepyan L., Telesnina V.M., Tsvetkova Yu.D. Change in aggregate structure of various soil types during the succession of abandoned lands. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2017;88(88):47–74. doi: 10.7868/s0032180x17030029
23. Telesnina V.M., Vaganov I.E., Karlsen A.A., Ivanova A.E., Zhukov M.A., Lebedev S.M. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga, Kostroma oblast. *Eurasian Soil Science*. 2016;49:102–115. doi: 10.1134/S1064229316010117
24. Litvinovich A.V. Postagrogenic evolution of well cultivated soddy-podzolic soils in the northwestern of the nonchernozemic zone. *Agrochemistry*. 2009:85–93.
25. Kazakova A.I., Semikolennykh A.A., Gornov A.V., Gornova M.V., Lukina N.V. Influence of Vegetation on the Lability Characteristics of Sandur Areas of the Bryansky Les Nature Reserve. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2018;73:100–106. doi: 10.3103/s0147687418030055
26. Koptsik G.N., Kupriianova Y.V., Kadulin M.S. Spatial Variability of Carbon Dioxide Emission by Soils in the Main Types of Forest Ecosystems at the Zvenigorod Biological Station of Moscow State University. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2018;73:81–88. doi: 10.3103/s0147687418020035
27. Dymov A.A. *Soil successions in the boreal forests of the Komi Republic*. Moscow: GEOS Publ.; 2020. 318 p.
28. Ryzhova I.M., Telesnina V.M., Sitnikova A.A. Dynamics of Soil Properties and Carbon Stocks Structure in Postagrogenic Ecosystems of Southern Taiga during Natural Reforestation. *Eurasian Soil Science*. 2020;53:240–252. doi: 10.1134/S1064229320020106
29. Kurochkin I.N., Chugai N.V. The change dynamics of acidity and humus content in agricultural and former agricultural soils of Vladimir Oblast. *International Research Journal*. 2020;12(102):69–72. doi: 10.23670/IRJ.2020.102.12.046
30. Koptsik G.N., Berezina N.A. *Vegetation and soils of the Smolenskoye Poozerye National Park*. M.: NIA-Prirod; 2009. 316 p.
31. Koroleva NV, Tikhonova EV, Ershov DV, Saltykov AN, Gavriyluk EA, Pugachevskii AV. *Ocenka masshtabov zarastaniya nelesnyh zemel' v nacional'nom parke "Smolenskoe Poozer'e" za 25 let po sputnikovym dannym Landsat [25 years of reforestation on non-forest lands in smolenskoye poozerye national park assessed from landsat]*. *Russian Journal of Forest Science*. 2018. In Russian doi: 10.7868/S0024114818020018
32. Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Shoba S.A. *The map of soil-geographic zonation of the Russian Federation 1:8 000 000*. 2020

33. Hohlov S.F. *Postagrogennye dervno-podzolistye pochvy pod lesom i lugom v Podmoskov'e: svoystva, jevoljucija i jelementy vodnogo balansa* [Postagrogenic soddy-podzolic soils under forest and meadow in the Moscow region: properties, evolution and elements of water balance. CandSci. Dissertation, Agriculture]. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute; 2015. 158 p. In Russian
34. Krechetov P.P., Dianova T.M. *Khimiya pochv. Analiticheskie metody issledovaniya* [Soil Chemistry. Analytical methods for soil research] Moscow: Faculty of geography. 2009. 148 p. In Russian
35. FAO. Standard operating procedure for soil pH determination. Global Soil Partnership, Rome; 2021.
36. Wilcox JC. Determination of electrical conductivity of soil solution. *Soil Science*. 1947;63:107-117.
37. Semenov IN, Klink GV, Lebedeva MP, Krupskaya VV, Chernov MS, Dorzhieva OV, Kazinskiy MT, et al. The variability of soils and vegetation of hydrothermal fields in the Valley of Geysers at Kamchatka Peninsula. *Scientific Reports*. 2021;11:11077. doi: 10.1038/s41598-021-90712-7
38. Lehman A., Rourke N.O. JMP for Basic Univariate and Multivariate Statistics A Step-by-Step Guide. Analysis. 2005
39. Wilcoxon F. Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*. 1945;1(6):80-83. doi: 10.2307/3001968
40. Moreira A, Fageria NK. Liming influence on soil chemical properties, nutritional status and yield of alfalfa grown in acid soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2010;34(4):1231-1239. doi: 10.1590/s0100-06832010000400022
41. Vigovskis J, Jermuss A, Svarta A, Sarkanbarde D. The changes of soil acidity in long-term fertilizer experiments. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2016;103(2):129-134. doi: 10.13080/z-a.2016.103.017
42. Junior E.C., Gonçalves Jr A.C., Seidel E.P., Ziemer G.L., Zimmermann J., Oliveira V.H.D. de, Schwantes D., et al. Effects of Liming on Soil Physical Attributes: A Review. *The Journal of Agricultural Science*. 2020;12(10):278-286. doi: 10.5539/jas.v12n10p278
43. Perelman A.I., Kasimov N.S. Landscape geochemistry. Moscow: Astrea-200; 1999. 768 p.
44. Bobrovskii M. V. Effect of the Historical Land use on the Structure of Forest Soils in European Russia. *Eurasian Soil Science*. 2010;43:1458-1466. doi: 10.1134/S1064229310130053
45. Bakina L.G. The nature of soil acidity of soddy-podzolic soils on different particle size distribution and its change during the liming. *Agrochemistry*. 2015;3:3-13.
46. Shilnikov I.A., Lebedeva L.A. Soil liming. Moscow: Agropromiz; 1987. 171 p.
47. Telesnina V.M., Kurganova I.N., Lopes de G.V.O., Ovsepyan L.A., Lichko V.I., Ermolaev A.M., Mirin D.M. Dinamika svoystv pochv i sostava rastitel'nosti v hode postagrogenogo razvitiya v raznyh bioklimaticheskikh zonah [Dynamics of soil properties and vegetation composition during post-agrogenic development in different bioclimatic zones]. *Pochvovedenie*. 2017;12: 1514-1534. In Russian doi: 10.7868/s0032180x17120115
48. Samsonova V.P., Meshalkina J.L. 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;69:124-132 doi: 10.3103/s0147687414030065
49. Fu W., Zhao K., Jiang P., Ye Z., Tunney H., Zhang C. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements. *Soil Science*. 2013;51(6):503-512. doi: 10.1071/SR13027
50. Bogunovic I., Mesic M., Zgorelec Z., Jurisic A., Bilandzija D. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. *Soil and Tillage Research*. 2014;144:174-183. doi: 10.1016/j.still.2014.07.020
51. 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. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2006;63(11):1489-1498. doi: 10.1080/03650340.2017.1296134

52. Enchilik P.R., Semenov I.N. *Prostranstvennaja izmenchivost jelementnogo sostava pochv v katene Centralno-lesnogo zapovednika* [Spatial Variability of the Soils' Elemental Composition in the Central Forest Natural Reserve Catena]. *Russian Journal of Forest Science*. 2022;4:411-418. In Russian doi: 10.31857/S0024114822030068
53. Šimek M., Cooper J.E. The influence of soil pH on denitrification: Progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years. *European Journal of Soil Science*. 2002;53(3):345-354. doi: 10.1046/j.1365-2389.2002.00461.x
54. Gavryshko O., Olifir J., Partyka T. Agrogenic changes in the redox potential in the profile of light-grey forest surface gleyed soils of the Western Forest-Steppe. *Bulletin of Agricultural Science*. 2020;98(2). doi: 10.31073/agrovisnyk202002-03
55. Savich V., Lareshin V., Dubinok N., Gabbasova I., Mousa K. Ameliorative and agronomic assessment of the redox state of soils. Moscow: RUDN University. 2006. 484 p.
56. Chesworth W. Redox, soils, and carbon sequestration. *Edafologia*. 2004;11(1):37-43.
57. 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):1787. doi: 10.3390/agronomy10111787
58. 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
59. Machado P.L.O. de A., Bernardi A.C. de C., Valencia L.I.O., Molin J.P., Gimenez L.M., Silva C.A., Andrade A.G. de, et al. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2006;41(6). doi: 10.1590/s0100-204x2006000600019
60. Molin J.P., De Castro C.N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. *Open Access Scientia Agricola*. 2008;6:567-573. doi: 10.1590/S0103-90162008000600001
61. Moral F.J., Terrón J.M., Silva J.R.M. da. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*. 2010;106(2):335-343. doi: 10.1016/j.still.2009.12.002
62. Aimrun W., Amin M.S.M., Nouri H. Paddy field zone characterization using apparent electrical conductivity for rice precision farming. *International Journal of Agricultural Research*. 2011;6(1):10-28. doi: 10.3923/ijar.2011.10.28
63. 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(3):239-264. doi: 10.1016/S0168-1699(00)00185-X
64. Besson A., Cousin I., Bourennane H., Nicoullaud B., Pasquier C., Richard G., Dorigny A., et al. 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(1):120-132 doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01211.x
65. IUSS Working Group WRB. 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.

**Информация об авторах:**

**Енчилик Полина Романовна** – канд. геогр. наук, м.н.с. кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия); н.с. Центра проблем 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** – студент кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

E-mail: peunovaalisa@yandex.ru

**Прилипова Елена Сергеевна** – магистрант кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета 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 Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

E-mail: lisa.sergeeva2204@mail.ru

**Соболев Николай Сергеевич** – студент кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета 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 Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия); с.н.с. Центра проблем 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 20.09.2022;  
одобрена после рецензирования 01.04.2023; принята к публикации 22.12.2023.*

*The article was submitted 20.09.2022;  
approved after reviewing 01.04.2023; accepted for publication 22.12.2023.*