

УДК 574.4:631.4

ХИМИЧЕСКИЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ В ЛЕСАХ ВОЛОГОДСКОЙ И КОСТРОМСКОЙ ОБЛАСТЕЙ

© 2021 г. И. Ю. Кудреватых^а, *, Н. Д. Ананьева^а, С. В. Сушко^а, Е. А. Иванищева^б

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук, ул. Институтская, 2, Пущино, Московская обл., 142290 Россия

^бФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», ул. С. Орлова, 6, Вологда, 160035 Россия

*E-mail: averkieva.irina@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.03.2019 г.

После доработки 18.12.2019 г.

Принята к публикации 07.10.2020 г.

Исследование направлено на пространственную оценку химических и микробиологических свойств дерново-подзолистой почвы (Albic Retisols) хвойных и смешанных вторичных лесов (50–80 лет) Вологодской и Костромской областей. Образцы почвы (0–20 см) отбирали в августе 2015 г. в пространственно-удаленных точках (всего 38) двух ареалов, расположенных вблизи (0.8–29 км) и вдали (300–330 км) от соответствующего областного центра. В образцах определяли значение pH, содержание физической глины (ФГ), общего углерода (С), общего азота (N), макроэлементов (Al, P, K, Ca, Na, Mg, S), микроэлементов (Fe, Mn, Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cs, V, Co, As, Sr, Se), углерода микробной биомассы (С_{мик}) и скорость базального дыхания. Коэффициент пространственной вариации для ФГ, химических и микробиологических показателей почвы обеих областей составил 29, 8–91 и 36–51% соответственно. Для ареалов разной удаленности Вологодской области показаны значимые различия содержания в почве Cr, Sr, Se, Mn, Na, S, Костромской – ФГ, P, K, S, однако их микробиологические показатели не различались. Выявлена дифференциация лесных почв двух изученных областей, обусловленная в основном содержанием Cd, V, Fe, Zn, Cu, Ca и С_{мик}.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, леса, макро- и микроэлементы, углерод микробной биомассы, базальное дыхание.

DOI: 10.31857/S002411482101006X

Дерново-подзолистые почвы занимают почти 30% территории европейской части нашей страны (Единый ..., 2014), которые преимущественно (65%) заняты лесами (Писаренко, 2004). Изучение дерново-подзолистых почв разных лесов связано в основном с оценкой содержания в них питательных элементов (Федорец, Бахмет, 2003; Аверкиева, Припутина, 2011; Ларионова и др., 2017) и тяжелых металлов (Богатырев и др., 2003; Сморгалов, Воробейчик, 2011). Свойства дерново-подзолистых почв разных лесов изучены и в связи с антропогенным загрязнением от различных предприятий, автотранспорта и других его источников (Карпачевский, 1997; Вершинин и др., 2014). В результате таких воздействий в дерново-подзолистых почвах происходит изменение фракционного состава соединений тяжелых металлов (Ладонин, Пляскина, 2003; Самонова и др., 2016), окислительно-восстановительных условий (Кауричев, Орлов, 1982; Вершинин и др., 2014), содержания С, N, K, P (Федорец, Бахмет, 2003; Авер-

киева, Припутина, 2011; Ларионова и др., 2017) и Pb, Cu, Zn, Cd (Золотарева, 2003; Ладонин, Пляскина, 2003; Водяницкий и др., 2006; Лебедева, Фруммин, 2011; Воробейчик, Кайгородова, 2017). В дерново-подзолистых почвах, в том числе и по их профилю, изучали широкий набор макро- и микроэлементов, что было направлено, прежде всего, на выявление их аккумуляции или рассеивания относительно подстилающей породы (Дубиковский, 1965; Богатырев и др., 2003; Позняк, 2011, Самонова и др., 2015). Оценку содержания химических элементов в почве рассматривают, чаще всего, по катене (Протасова, Беляев, 2000; Самонова и др., 2016) или трансекте – от импактной зоны к фоновому ареалу (Золотарева, 2003; Пляскина, Ладонин, 2005; Жукова, Хомяков, 2015). Однако исследований, связанных с распределением разных элементов в пространственно удаленных точках дерново-подзолистой почвы, локализованных в одном элементе ландшафта (автономный), типе землепользования (лес) и климата

почти не проводилось. Особенности пространственного распределения содержания химических элементов дерново-подзолистой почвы для ареалов разной удаленности от комплексного источника загрязнения (областной центр) изучены также не в полной мере.

Интерес исследователей к оценке микробиологических свойств дерново-подзолистой почвы связан, прежде всего, с влиянием разных загрязнителей: нефти (Вершинин и др., 2014), свинца (Гей и др., 2000), минеральных удобрений (Pečulytė et al., 2009; Жукова, Хомяков, 2015) и техногенных выбросов (Каменщикова, 2011; Сорокин, Афанасова, 2012; Лапа, Михайловская, 2015; Кудреватых и др., 2018; Shi et al., 2018; Oulehle et al., 2018). Выявлено негативное влияние пожаров и рубок разной интенсивности на микробиологические свойства дерново-подзолистых почв разных лесов Сибири (Сорокин, Афанасова, 2012; Богородская, Кукавская, 2016). Доказано, что после таких воздействий “восстановление” функционирования дерново-подзолистой почвы лесов происходит только спустя многие годы. Кроме того, в лесных почвах отмечают высокую пространственную вариабельность микробиологических показателей (Morris, Voerner, 1999; Saetre, 1999). Так, показано, что в почвах Московской области (282 точки исследования) она была наиболее высока в лесах по сравнению с таковой пашен и залежей (Гавриленко и др., 2011). Поэтому информация о пространственной изменчивости основных микробиологических показателей (биомасса, дыхание) дерново-подзолистой почвы лесов будет весьма полезной.

В Вологодской и Костромской областях доминирующим типом почвы является дерново-подзолистая (Albic Retisols), минорные (интразональные) почвы – аллювиальная (Fluvisols) и торфяно-болотная (Fibric Histosols) (Плавинский, 2007; Единый ..., 2014). Большая часть территории рассмотренных регионов занята вторичными хвойными и лиственными лесами (возраст 80–130 лет). Земли лесного фонда в Вологодской области составляют 11.7 млн га, Костромской – 4.39 млн га (81 и 74% территории соответственно) (Доклад об экологической ..., 2016; Доклад о состоянии ..., 2017). Антропогенная деятельность в этих областях характеризуется высоким темпом урбанизации, строительством промышленных объектов и автодорог, что приводит к омоложению древесного яруса лесов, возраст которых вблизи крупных городов в настоящее время, как правило, не превышает 60 лет. Специализация промышленности и уровень урбанизации этих областей различаются. В Вологодской области сосредоточено производство черной металлургии, машиностроения, металлообработки, деревообработки, химических и пищевых продуктов, в Костромской – льняного и ювелирного, машиностроения и дере-

вообработки. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух Вологодской области достигают 429 тыс. т (2017 г.), они содержат преимущественно оксид углерода (59%), диоксид серы (12%), оксиды азота (7.2%), Костромской – 109 тыс. т (2016 г.) – преимущественно оксид углерода, диоксид азота и аммиак, диоксид серы, твердые вещества и углеводороды (Доклад ... Костромской ..., 2016; Доклад ... Вологодской ..., 2017).

Наши исследования были нацелены на оценку пространственного распределения химических и микробиологических свойств дерново-подзолистой почвы хвойных и смешанных лесов Вологодской и Костромской областей. Задачи исследования сфокусированы на: 1) изучении пространственной вариабельности химических и микробиологических показателей дерново-подзолистой почвы хвойных и смешанных лесов в пределах каждой области и ареалов разной удаленности от ее центра; 2) поиске взаимосвязи химических и микробиологических свойств; 3) оценке влияния источника загрязнения (областной центр) на изучаемые свойства почвы; 4) сравнении химических и микробиологических свойств дерново-подзолистой лесной почвы двух административных субъектов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изучали дерново-подзолистую почву хвойных и смешанных вторичных лесов (возраст 50–80 лет) Вологодской (Вытегорский и Вологодский районы: 59°07′–61°02′ с. ш., 36°18′–39°57′ в. д.) и Костромской (Межевской и Костромской районы: 57°21′–59°36′ с. ш., 40°31′–47°05′ в. д.) областей (табл. 1). Ареалы исследования (административные районы) были выбраны вблизи (0.8–29 км) и вдаль (300–330 км) от соответствующего областного центра, который, в свою очередь, рассматривался как основной источник промышленного загрязнения почв. Леса представлены в основном сосняками (чистые, сложные) и ельниками (чистые, сложные), а в Костромской области – еще и березняками. Среднегодовая температура воздуха в Вологодской и Костромской областях составляет 3.0 и 3.2°C, количество осадков – 570 и 600 мм соответственно.

В каждой области случайным образом были выбраны пространственно удаленные точки исследования (Вологодская – 20, Костромская – 18) (табл. 1). Они были представлены только дерново-подзолистой почвой автономного ландшафта, занимающего преимущественно водораздельные территории. В каждой точке исследования на ровной площадке (10 м², меж- и под кронами деревьев) в августе 2015 г. отбирали образцы почвы (всего 5, метод конверта) из верхнего 20-ти сантиметровой толщи (наибольшая плотность корней), которая могла включать не только гумусо-

Таблица 1. Точки исследования, тип леса и содержание физической глины дерново-подзолистой почвы (0–20 см) разных лесов

Номер точек исследования	Ближайшее поселение	Координаты (с.ш., в.д.)	Расстояние до областного центра, км	Тип леса	Напочвенный покров	ФГ, %
Вологодская область						
1	Семенково	59°09'56", 39°25'57"	6.0	Ельник	Кисличный	23.7
2	Кувшиново	59°09'35", 39°29'13"	0.8	Сосняк	Черничный	23.6
3	Марково	59°08'19", 39°22'13"	6.5	Елово-мелколиственный	Кисличный	27.7
4	Сосновка	59°07'14", 39°20'60"	9.0	Сосняк	Бореально-мелкотравный	28.3
5	Щекино	59°04'22", 39°34'44"	6.6	Ельник	Разнотравный	15.3
6	Коровайцево	59°05'02", 39°26'29"	4.6	Ельник	Кисличный	54.8
7	Борилово	59°10'58", 39°30'58"	3.4	Елово-мелколиственный	Кисличный	28.4
8	Дорожный	59°10'49", 39°33'54"	3.6	Елово-мелколиственный	Кисличный	26.2
9	Владычнево	59°04'57", 39°30'58"	4.7	Елово-мелколиственный	Сныгтьевый	33.3
10	Голубково	59°05'03", 39°31'34"	4.0	Ельник	Разнотравный	28.9
11	Палозеро	61°00'07", 36°11'12"	304.7	Елово-мелколиственный	Кисличный	25.6
12		60°35'43", 36°13'19"	302.0	Сосново-мелколиственный	Разнотравный	26.8
13	Тудозерский Погост	60°54'41", 36°14'38"	300.1	Елово-мелколиственный	Кисличный	26.3
14		61°01'47", 36°17'57"	304.0	Елово-мелколиственный	Чернично-сфагновый	16.6
15	Вытегра	61°00'35", 36°17'35"	300.0	Сосняк	Чернично-сфагновый	18.8
16		61°00'33", 36°18'27"	302.6	Сосново-мелколиственный	Бореально-мелкотравный	28.6
17	Кирпичный Лесное	61°01'16", 36°14'31"	302.0	Ельник	Кислично-сфагновый	27.3
18		60°34'50", 36°14'31"	304.0	Елово-мелколиственный	Чернично-сфагновый	32.5
19	Анхимово	60°34'22", 36°18'52"	305.7	Сосняк	Разнотравный	26.8
20	Захарьино	60°33'46", 36°19'57"	308.0	Сосняк	Брусничный	32.2
Костромская область						
21	Песочная	57°42'08", 40°40'32"	26.5	Ельник	Кисличник	26.8
22		57°41'56", 40°41'18"	24.1	Березняк	Разнотравный	23.6
23	Никольское	57°46'59", 41°07'21"	10.0	Елово-мелколиственный	Бореально-крупнотравный	30.2
24	Калинки	57°47'35", 41°11'18"	21.0	Березняк	Кисличный	16.1
25		57°47'25", 41°10'26"	15.5	Сосняк	Чернично-сфагновый	17.8
26	Руболдино	57°41'56", 41°05'07"	13.6	Елово-мелколиственный	Кисличный	16.0
27	Минское	57°41'39", 41°01'40"	13.0	Сосняк	Разнотравный	16.9
28	Зубино	57°42'56", 41°01'43"	10.0	Березняк	Неморальноотравный	25.6
29	Клобушниково	57°37'27", 40°46'55"	25.0	Елово-мелколиственный	Недотроговый	24.4
30	Иванниково	57°42'26", 40°48'45"	16.7	Елово-мелколиственный	Неморальноотравный	14.6
31		57°42'25", 40°49'07"	16.0	Березняк	Чернично-разнотравный	16.0
32	Демидково	57°33'27", 41°12'27"	29.1	Сосняк	Разнотравный	23.5
33	Ильинское	57°38'57", 40°55'34"	19.2	Ельник	Крапивно-малиновый	28.6
34	Авдотьино	57°36'15", 40°57'47"	24.6	Березняк	Недотроговый	15.8
35	Абросимово	58°54'1", 44°32'24"	300.0	Елово-мелколиственный	Черничный	15.6
36	Никола	58°52'11", 44°54'59"	330.0	Березняк	Разнотравный	13.0
37		58°52'4", 44°58'02"	330.0	Сосново-мелколиственный	Брусничный	17.9
38		58°52'11", 44°58'03"	330.5	Ельник	Чернично-зеленомошный	12.0

Примечание. ФГ – физическая глина, размер частиц <0.01.

во-аккумулятивный горизонт. Полученные образцы этого слоя для каждой площадки объединяли (смешанный образец). Лесную подстилку не отбирали (ее мощность составляла в среднем 1.4 см), и в 70% изученных точек она практически отсутствовала. Полученные таким образом смешанные образцы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния, доставляли в лабораторию, просеивали (ячейки 1 мм) и использовали для химических и микробиологических анализов.

Физический и химический анализ почвы включал измерение содержания физической глины (ФГ, пирофосфатный метод), общего углерода (С) и азота (N) (анализатор Elementar Vario EL III); аммонийного ($N-NH_4^+$) и нитратного ($N-NO_3^-$) азота (фотоколориметрия) и значения рН (почва : вода = 1 : 2.5). Содержание макро- (Al, P, K, Ca, Na, Mg, S) и микроэлементов (Fe, Mn, Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cs, V, Co, As, Sr, Se) в почве определяли методом рентген-флуоресцентного анализа (методика № 309/242–(01.00250-2008)-2012) с помощью рентгеновского аппарата “СПЕКТРОСКАН МАКС–GV”. Для этого образцы почвы дополнительно измельчали до состояния порошка и просеивали через мелкое сито с ячейками 71 мкм. Масса навески составляла 1.5–2.5 г (зависит от плотности почвы). Содержание макроэлементов определяли в форме оксидов с последующим расчетом их доли в почве (%). Рассчитывали отношение С : N почвы.

Содержание углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) почвы измеряли методом субстрат-индуцированного дыхания (СИД), основанного на регистрации начальной максимальной скорости образования CO_2 микроорганизмами при ее обогащении глюкозой (Anderson, Domsch, 1978; Ananyeva et al., 2008). Навеску почвы (1 г) помещали во флакон объемом 15 мл, добавляли по каплям раствор глюкозы (0.1 мл г^{-1} , $10 \text{ мг глюкозы г}^{-1}$), герметично закрывали и инкубировали (22°C) не более 5 ч. За этот период происходит окисление и со-окисление глюкозы микроорганизмами, исключая ее потребления для роста. Время инкубации образца строго фиксировали. По окончании инкубации из газовой фазы флакона отбирали шприцем пробу и вводили в газовый хроматограф (Кристаллюкс-4000М, детектор теплопроводности, Россия) для определения концентрации CO_2 . Скорость СИД почвы ($\text{мкл } CO_2 \text{ г}^{-1} \text{ ч}^{-1}$) рассчитывали с учетом концентрации CO_2 в газовой фазе флакона, ее объема, навески образца и времени инкубации. Величину $C_{\text{мик}}$ (мкг С г^{-1}) рассчитывали по формуле: СИД $\times 40.04 + 0.37$ (Anderson, Domsch, 1978).

Скорость базального (микробного) дыхания (БД, выделение CO_2 почвой) измеряли в почве (навеска 1 г, без внесения глюкозы), инкубиро-

ванной 24 ч при 22°C (Ananyeva et al., 2008). Измерение БД выполнено как описано для СИД, только вместо раствора глюкозы в почву добавляли воду (0.1 мл г^{-1} почвы). Величину БД выражали в $\text{мкг } CO_2\text{-С г}^{-1} \text{ почвы ч}^{-1}$.

Навески для определения $C_{\text{мик}}$ и БД отбирали одновременно из предварительно инкубированного образца почвы (масса 100–300 г, 50–60% полной влагоемкости, 22°C , 7 сут), чтобы исключить избыточное образование CO_2 в результате ее просеивания и реувлажнения (Ananyeva et al., 2008, Creamer et al., 2014). Рассчитывали отношения БД : $C_{\text{мик}} = qCO_2$ и $C_{\text{мик}} : C$, характеризующие удельное дыхание микробной биомассы и долю углерода микробной биомассы в общем углероде почвы соответственно.

Лесные ареалы каждой области дифференцировали по их удаленности от областного (промышленного) центра и принадлежности к разным типам леса (ельник чистый + ельник смешанный, сосняк чистый + сосняк смешанный, березняк).

Статистический анализ данных. Определение микробиологических показателей почвы проводили в трех повторностях, химических — в двух, расчет их величин выполнен на вес сухой почвы (105°C , 8 ч). Результаты выражали как среднее \pm стандартное отклонение ($\text{mean} \pm \text{sd}$). Коэффициент пространственной вариации (coefficient of variance, C.V.) данных рассчитывали как отношение ($\text{sd} : \text{mean}$) $\times 100\%$. Соответствие экспериментальных данных нормальному распределению проверяли графически (гистограмма) и критерием Шапиро–Уилка. Различие средних величин оценивали тестом Стьюдента (Т-тест) для группировок: 1) “ближний” и “дальний” ареалы; 2) Вологодская и Костромская области; 3) сосняки и ельники Вологодской области (две независимые группы). Различие экспериментальных величин для ельника, сосняка и березняка Костромской области (три независимые группы) оценивали однофакторным дисперсионным (ANOVA) и апостериорным (критерий Тьюки) анализами. Взаимосвязь между микробиологическими и химическими свойствами почвы лесов изученных областей оценивали корреляционным анализом (Пирсон). Уровень значимости (α) для Т-теста, дисперсионного, апостериорного и корреляционного анализов составил ≤ 0.05 . Визуализация данных (box-plot, сог-plot) выполнена в среде программирования “R” (версия 3.6.1). Анализ главных компонент (ГК) и визуализация его результатов (диаграммы свойств и точек исследования) были также выполнены в программной среде “R” с использованием функций из пакетов “FactoMineR” и “factoextra” (Le et al., 2008; Kassambara, 2017). Предварительная подготовка экспериментальных данных для анализа ГК включала: 1) их центрирование и нормирование

Таблица 2. Значение pH, содержание общего углерода (С), общего (N), аммонийного (N-NH₄⁺) и нитратного (N-NO₃⁻) азота, физической глины дерново-подзолистой почвы (0–20 см) лесов двух областей

Область	Число проб	pH _{вод}	С	N	С : N	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Физическая глина, %
			%			мг/кг		
Вологодская	20	5.2 <i>a</i>	3.7 <i>a</i>	0.2 <i>a</i>	16.0 <i>a</i>	6.7 <i>a</i>	10.1 <i>a</i>	27.6 <i>a</i>
Костромская	18	5.1 <i>a</i>	3.0 <i>a</i>	0.2 <i>a</i>	15.0 <i>a</i>	6.2 <i>a</i>	7.7 <i>a</i>	19.7 <i>b</i>

Примечание. Величины с одинаковыми буквами не различаются значимо для каждого показателя отдельно.

согласно формуле $(x_i - \text{mean})^{-1} * \text{sd}$; 2) проверку на отсутствие нулевых или пропущенных значений; 3) сокращение числа сильно коррелирующих между собой свойств ($R \geq 0.9$) до одного: оставлено Fe (исключены Cs, Mg, Al, Ni), N и C_{мик} (исключены С и БД соответственно).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химические, физические и микробиологические свойства почвы Вологодской и Костромской области. Значение pH дерново-подзолистой почвы лесов Вологодской области варьировало от 3.5 до 5.6 (С.V. = 11%), содержание С и N – от 0.9 до 5.3% (10.4%, точка № 17, ельник кислично-сфагновый) и от 0.05 до 0.56% (С.V. = 48 и 56% соответственно), отношение С : N – от 12 до 26 (С.V. = 23%). Однако содержание аммонийного и нитратного азота в почве этой области варьировало сильнее (С.V. = 82–106%). Значение ФГ почвы составило от 15 до 55% (С.V. = 29%), что соответствует супесчаному – легко глинистому гранулометрическому составу. В почве изученных лесов Костромской области значения pH и С варьировали в интервале 3.3–6.5 и 0.6–6.3%, N и С : N – 0.04–0.43% и 13–19, причем С.V. для этих показателей составило 16, 53, 53 и 11% соответственно. Варьирование аммонийного и нитратного азота в почве оказалось также сильнее (С.V. = 75–94%). Содержание ФГ почвы составило от 12 до 30% (С.V. = 29%) – от супеси до легкого суглинка. С.V. для содержания макро- (Al, P, K, Ca, Na, Mg, S) и микроэлементов (Fe, Mn, Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cs, V, Cr, Co, As, Sr, Se) в почве Вологодской области составил 25–60 и 20–52% соответственно, Костромской – 12–47 и 8–91%.

Далее мы сравнили химические и физические показатели дерново-подзолистых почв двух областей. Оказалось, что содержание С, N и значение pH почв Вологодской и Костромской областей в среднем не различалось значимо, однако для ФГ различие составило в среднем почти 1.5 раза (табл. 2). Большая часть определяемых макро- и микроэлементов (67%) почвы различалась между областями, и только 33% из них (P, K, Mg, Zn, Cs, As и Sr) были почти одинаковыми (табл. 3). Содержание Al, Ca, Na и Fe в почве Вологодской об-

ласти оказалось в среднем на 23–50% больше, чем Костромской, а Mn и S – напротив, на 33–40% меньше. К тому же в почве Вологодской области содержание Cu, Ni, V, Co было в среднем в 1.9–2.5 раза больше, чем в Костромской, а Pb, Cd, Cr и Se – в 1.4–2.8 раза меньше.

Затем было оценено пространственное варьирование микробиологических показателей дерново-

Таблица 3. Содержание разных элементов в дерново-подзолистой почве (0–20 см) лесов Вологодской и Костромской областей (величины с одинаковыми буквами не различаются значимо для каждого показателя отдельно)

Элементы	Вологодская область (N = 20)	Костромская область (N = 18)
Содержание, %		
Al	8.7 <i>a</i>	7.1 <i>b</i>
P	0.16 <i>a</i>	0.14 <i>a</i>
K	1.8 <i>a</i>	1.7 <i>a</i>
Ca	0.9 <i>a</i>	0.6 <i>b</i>
Mn	0.05 <i>b</i>	0.07 <i>a</i>
Na	0.7 <i>a</i>	0.5 <i>b</i>
Mg	0.6 <i>a</i>	0.5 <i>a</i>
S	0.03 <i>b</i>	0.04 <i>a</i>
Fe	2.6 <i>a</i>	1.8 <i>b</i>
Содержание, мг/кг		
Pb	12.2 <i>b</i>	33.6 <i>a</i>
Cd	0.9 <i>b</i>	1.4 <i>a</i>
Zn	50.5 <i>a</i>	41.9 <i>a</i>
Cu	22.2 <i>a</i>	9.8 <i>b</i>
Ni	25.8 <i>a</i>	13.9 <i>b</i>
Cs	3.0 <i>a</i>	2.6 <i>a</i>
V	67.6 <i>a</i>	26.7 <i>b</i>
Cr	76.5 <i>b</i>	118.5 <i>a</i>
Co	9.9 <i>a</i>	5.3 <i>b</i>
As	10.6 <i>a</i>	11.2 <i>a</i>
Sr	155.7 <i>a</i>	161.9 <i>a</i>
Ce	41.2 <i>b</i>	56.9 <i>a</i>

Примечание. См. табл. 2.

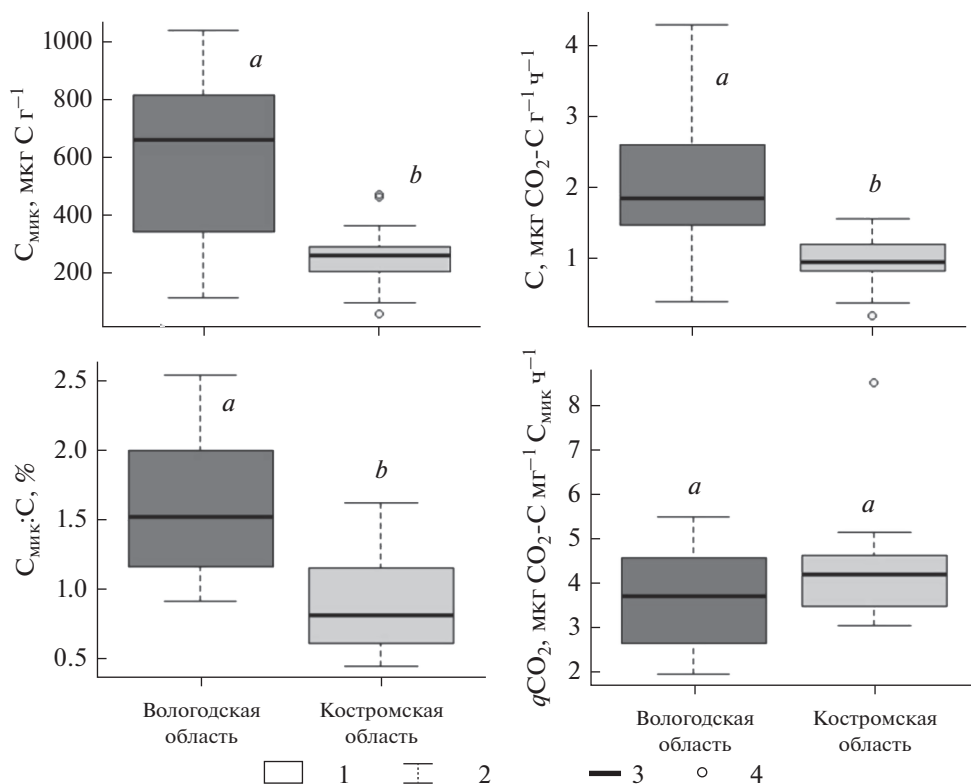


Рис. 1. Углерод микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$), скорость базального дыхания (БД), доля углерода микробной биомассы в общем углероде ($C_{\text{мик}} : C$), удельное дыхание микробной биомассы ($q\text{CO}_2$) дерново-подзолистой почвы (0–20 см) лесов Вологодской и Костромской областей ($n = 20$ и 18 соответственно). Величины с разными буквами различаются значимо ($p \leq 0.05$) для каждого показателя отдельно. 1 – 25–75% встречаемых значений, 2 – разброс “минимум-максимум”, 3 – медиана, 4 – выбросы.

подзолистой почвы изученных областей. Величины $C_{\text{мик}}$ и БД почвы лесов Вологодской области составили 111–1032 мкг С г⁻¹ и 0.4–4.3 мкг СО₂-С г⁻¹ ч⁻¹ (С.V. = 51 и 44% соответственно). Однако значения $q\text{CO}_2$ и $C_{\text{мик}} : C$ варьировали меньше – 2.0–5.5 мкг СО₂-С мг⁻¹ С_{мик} ч⁻¹ и 0.9–2.5% (С.V. = 31 и 29%). В лесах Костромской области величины $C_{\text{мик}}$, БД и $C_{\text{мик}} : C$ почвы изменялись в меньшем интервале – 51–466 мкг С г⁻¹, 0.2–1.6 мкг СО₂-С г⁻¹ ч⁻¹ и 0.5–1.6% (С.V. = 44, 36 и 38%), а $q\text{CO}_2$, напротив, в большем – 3.1–8.5 мкг СО₂-С мг⁻¹ С_{мик} ч⁻¹ (С.V. = 28%). Сравнительный анализ микробиологических свойств показал, что величины $C_{\text{мик}}$, БД и $C_{\text{мик}} : C$ дерново-подзолистой почвы Вологодской области были в среднем в 1.8–2.3 раза больше таковых Костромской, однако $q\text{CO}_2$ не различалось значимо (рис. 1).

Тип леса. Выявлено, что изученные физико-химические показатели почвы ельников и сосняков Вологодской области не различались значимо (данные не показаны). Однако в Костромской области почва сосняков, ельников и березняков различалась по содержанию общего N (0.11, 0.22 и

0.26% соответственно), в то время как другие показатели были почти одинаковыми. В ельниках и сосняках Вологодской области величины $C_{\text{мик}}$, БД и $C_{\text{мик}} : C$ не различались, а $q\text{CO}_2$ ельников оказалось на 32% больше (табл. 4). Выявлено также, что в ельниках и березняках Костромской области значения $C_{\text{мик}}$ и БД превышали таковые сосняков, а их относительные показатели ($q\text{CO}_2$, $C_{\text{мик}} : C$) не различались.

Таким образом, дерново-подзолистая почва лесов разных точек исследования Вологодской и Костромской областей характеризовалась близкими значениями С, N и рН, однако по содержанию ФГ, макро- и микроэлементов различалась, причем в большей степени (1.9–2.8 раза) – для Рb, Cu, Ni, V и Co. Различие химических свойств почвы ельников и сосняков в Вологодской области не выявлено, а в Костромской выявлено (сосняки обеднены азотом). Микробная биомасса и дыхательная активность дерново-подзолистой почвы лесов Вологодской области были почти в 2 раза больше таковых Костромской. Ельники и сосняки Вологодской области характеризовались также одинаковыми микробиологическими по-

Таблица 4. Микробиологические показатели почв разных лесных формаций Вологодской и Костромской областей

Показатель	Вологодская		Костромская		
	Е (n = 13)	С (n = 7)	Е (n = 8)	С (n = 4)	Б (n = 6)
$C_{\text{мик}}$, мкг С г ⁻¹	563 a	607 a	233 ab	142 b	340 a
БД, мкг СО ₂ -С г ⁻¹ ч ⁻¹	2.1 a	1.8 a	1.0 a	0.6 b	1.3 a
$q\text{CO}_2$, мкг СО ₂ -С мг ⁻¹ С _{мик} ч ⁻¹	4.1 a	3.1 b	4.8 a	4.1 a	3.8 a
$C_{\text{мик}} : C$, %	1.5 a	1.8 a	0.8 a	0.9 a	1.0 a

Примечание. См. табл. 2. Е – ельники, С – сосняки, Б – березняки, $C_{\text{мик}}$ – углерод микробной биомассы, БД – базальное дыхание, $q\text{CO}_2$ – микробный метаболический коэффициент, $C_{\text{мик}} : C$ – доля $C_{\text{мик}}$ в общем углероде.

казателями, однако в сосняках Костромской области $C_{\text{мик}}$ и БД были ниже таковых соответствующих ельников и березняков.

“Ближний” и “дальний” ареалы исследования. Проведено сравнение свойств почвы “ближнего” и “дальнего” ареалов исследования в каждой из изученных областей. В Вологодской области почва этих ареалов различалась по восьми показателям (всего их 32), в Костромской – только по четырем (табл. 5). Так отношение С : N, содержание N-NO₃⁻ и Na в почве “ближнего” ареала Вологодской области были в среднем на 38%, в 1.8 и 2.4 раза соответственно меньше таковых дальнего, однако содержание Cr, Sr, Se, Mn и S, напротив, было на 25–75% больше. В Костромской области почва “ближнего” ареала характеризовалась большим содержанием ФГ, P, K и S (различие 1.4–2.5 раза) по сравнению с “дальним”. Микробиологические свойства почвы изученных ареалов в каждой области не различались значимо (данные не показаны), указывая тем самым на отсутствие их дифференциации.

Взаимосвязь физико-химических и микробиологических свойств дерново-подзолистой почвы лесов. Между микробиологическими показателями и содержанием С и N в почве в каждой области выявлена корреляционная связь: $C_{\text{мик}}$ и С (N), $R = 0.76–0.78$, БД и С (N), $R = 0.70–0.88$. Корреляция между микробиологическими показателями почвы и ее рН, ФГ, макро-, микроэлементами не обнаружена. Принимая во внимание, что почва разных точек исследования в двух областях существенно различалась по содержанию макро- и микроэлементов, мы оценили их корреляционную связь. Оказалось, что содержание Na, K, S и Mn в почвах Вологодской области и Co, Cd, Pb, Cu, Cr, Ni, As, Mn, V, S и Sr – Костромской не коррелировали значимо ($P > 0.05$) ни с одним из изученных элементов, поэтому их не включали в финальный вариант корреляционной матрицы (рис. 2). Затем для каждой области выделили группы взаимосвязанных элементов, коэффициент корреляции которых составил ≥ 0.70 . В Воло-

годской области можно выделить многочисленную группу элементов (V, Mg, Al, Cr, Se, Ni, Fe, Cs, Cu, Zn), тесно и положительно коррелирующих между собой, и отрицательно – с Cd. В этой области, кроме того, отмечена положительная корреляция между Ca и Sr ($R = 0.84$). В Костромской области количество элементов (Al, Fe, Cs, Se, K, Ca), тесно коррелирующих между собой, оказалось значительно меньше чем в Вологодской.

Экспериментальные данные почв обоих регионов (38 точек, 26 показателей) были проанализированы методом ГК. На основе предварительного анализа мы выявили показатели, которые

Таблица 5. Показатели дерново-подзолистой почвы (0–20 см) в “ближнем” и “дальнем” ареалах области, различающиеся значимо

Показатель	ЕИ	Ближний ареал	Дальний ареал
Вологодская область (N = 20)			
C : N		13	18
N-NO ₃ ⁻	мг/кг	5.9	14.3
Cr		85	68
Sr		177	134
Se		48	34
Mn	%	0.07	0.04
Na		0.5	0.9
S		0.03	0.02
Костромская область (N = 18)			
ФГ	%	21.2	14.7
P		0.2	0.1
K		1.9	1.4
S		0.05	0.02

Примечание. ЕИ – единица измерения, ФГ – физическая глина.

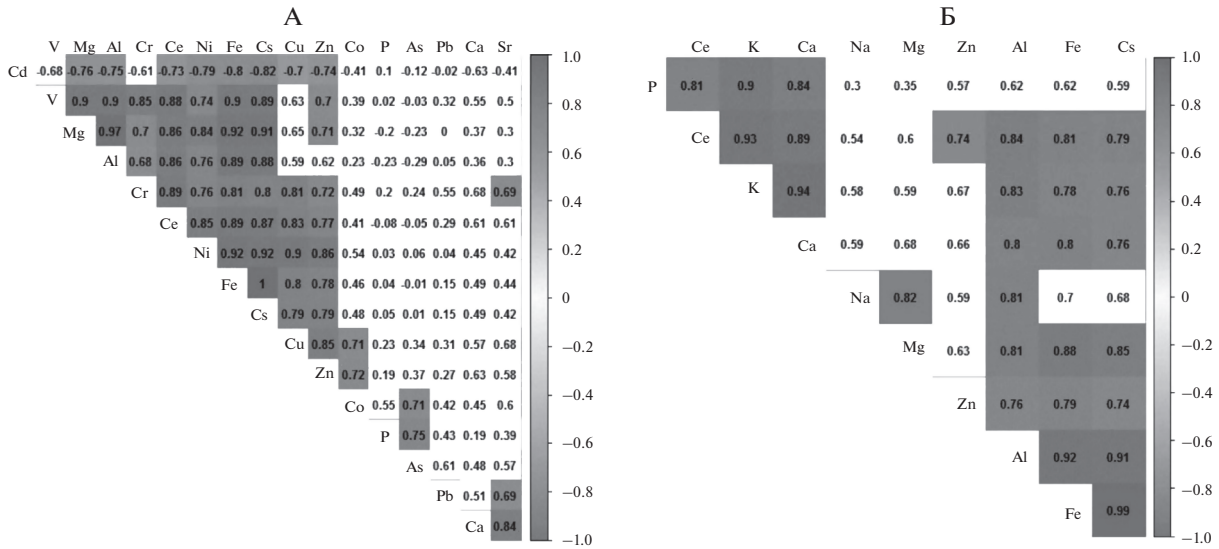


Рис. 2. Коэффициент корреляции Пирсона между содержанием химических элементов в дерново-подзолистой почве (0–20 см) лесов Вологодской (А, $N = 20$) и Костромской (Б, $N = 18$) областей. Значимые ($P < 0.001$) коэффициенты выделены цветом.

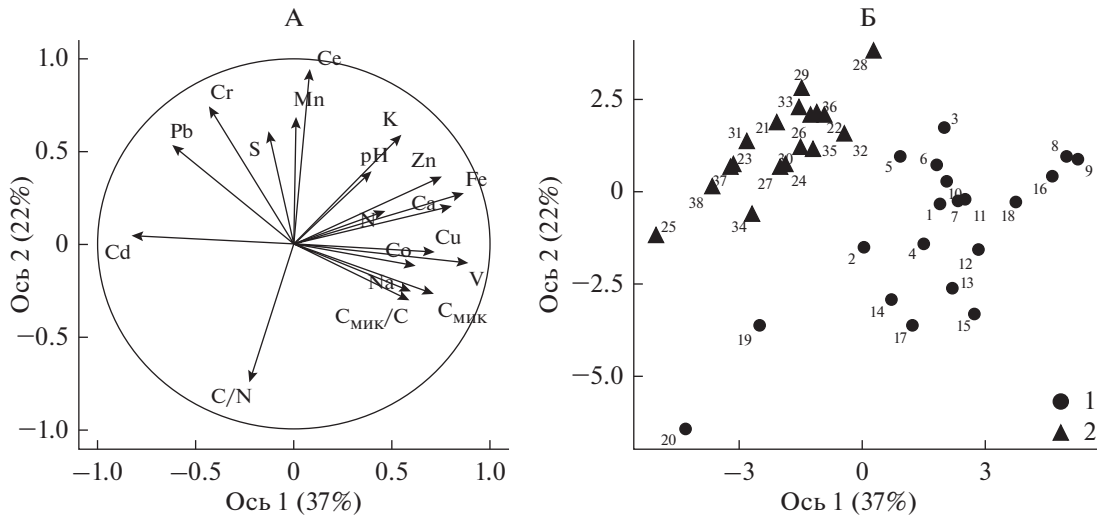


Рис. 3. Результат анализа главных компонент: А – корреляционная диаграмма почвенных свойств с двумя первыми компонентами (осями); Б – ординация изученных точек (нумерация соответствует табл. 1). Регионы исследования: 1 – Вологодская область, 2 – Костромская область.

слабо варьировали и коррелировали с двумя первыми компонентами ($R^2 < 0.25$, ФГ, $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$, Sr, As, qCO_2). Эти показатели мы исключили из последующего анализа, что увеличило суммарную долю объясненной дисперсии данных двумя первыми компонентами (осями) с 44 до 59%. Финальный результат анализа ГК представлен на рис. 3. Оказалось, что содержание микро- (Ce, Fe, V, Cr, Zn, Cd, Pb), макроэлементов (Ca, K) и качество органического вещества (C : N) дерново-

подзолистой почвы вносили наибольший вклад в первые две оси ($R^2 = 0.60-0.80$). Ординация изученных точек исследования в пространстве двух первых осей выявила весьма четкую их дифференциацию по областям преимущественно в градиенте содержания Cd, V, Fe, Zn, Cu, Ca и $C_{мик}$. Следует отметить, что дерново-подзолистая почва лесов Вологодской области в градиенте изученных свойств оказалась более неоднородной (точки сильно разнесены вдоль первой и второй осей) по сравнению с Костромской.

Итак, оценена пространственная вариабельность химических (С, N, рН: С.V. = 11–56%; N-NH₄⁺, N-NO₃⁻: С.V. = 75–106%) и микробиологических (С_{мик}, БД: С.V. = 36–51%) показателей дерново-подзолистой почвы разных лесов Вологодской и Костромской областей. Для ареалов разной удаленности от областного центра показано значимое различие некоторых физико-химических свойств (С : N, N-NO₃⁻, Cr, Sr, Се, Mn, Na, S – Вологодская область; ФГ, Р, К, S – Костромская), однако для микробиологических показателей оно не выявлено. Величины С_{мик} и БД почвы обоих регионов тесно коррелировали только с содержанием в ней С и N. Почва разных точек исследования Вологодской области содержала больше ФГ, макроэлементов (Al, Ca, Na), микроэлементов (Fe, Cu, Ni, V и Co), С_{мик} и БД, чем таковая Костромской. Выявлена существенная дифференциация изученных свойств дерново-подзолистой почвы лесов между областями, которая во многом обусловлена величинами Cd, V, Fe, Zn, Cu, Ca и С_{мик}.

Элементный состав почвы Вологодской и Костромской областей. Химические свойства почвы лесов существенно варьируют в зависимости от рельефа, типа растительности, климата и подстилающей породы (Карпачевский, 1997; Рассеянные ..., 2004). Поэтому исследователи отмечают тесную связь элементного состава верхних горизонтов почвы с таковыми подстилающих пород (Дубиковский, 1965; Богатырев и др., 2003; Сомнова и др., 2015, 2016; Жарикова, 2017). Нами показано, что элементный состав почвы исследованных точек Вологодской области обогащен Al, Ca, Na (макроэлементы) и Fe, Cu, Ni, V, Co (микроэлементы) по сравнению с таковыми Костромской области (табл. 3). Рассмотрим основные аспекты, позволяющие объяснить полученные экспериментальные результаты. Ранее было показано, что коренные породы Вологодской области (Вытегорский район) обогащены Al, Fe и Ca (Дворникова, 1961; Комиссаров, 1972; Копничева, 2000). Повышенное содержание Na в почве разных точек исследования этой области связано с месторождением натриевых солей – галитов (Гей и др., 2000), а микроэлементов (Cu, Ni, V, Co) – с высоким содержанием ФГ (Ильин, 1988; Позняк, 2011).

Вместе с тем следует отметить, что в почве Костромской области обнаружено повышенное содержание ряда металлов (Pb, Cd, Cr и Се) (табл. 3). Характерно, что в этой области преобладают кислые магматические породы и глинистые осадки (Болысов, Фуззина, 2001), на которых сформированы почвы с повышенным содержанием Cd и Се (Ильин, 1988), а также Pb (Холодов, 2006). Отмечают также, что в этих породах содержание хрома почти в 2 раза больше такового по сравнению с

лёссовидными карбонатными и покровными суглинками (Краснокутская и др., 1990). Нашими исследованиями показано, что свойства лесных дерново-подзолистых почв двух административных субъектов четко дифференцированы по содержанию, прежде всего, металлов (Cd, V, Fe, Zn, Cu). Поэтому для установления ориентировочно допустимых концентраций разных элементов в почве крупных территориальных образований следует принимать во внимание их фоновое содержание (Чернова, Бекецкая, 2011; Лебедева, Фрумин, 2011).

“Ближний” и “дальний” ареалы исследования. В почве “ближних” ареалов обоих регионов обнаружено повышенное содержание серы, которое мы можем объяснить ее аэротехногенным поступлением (транспорт, тепло-энергетический комплекс, текстильная промышленность) (Свиствова и др., 2010). Почва “ближнего” ареала Вологодской области обогащена Cr, Sr, Се и Mn по сравнению с “дальним”, а Костромской – Р и К (табл. 5), что может быть связано с различием их гранулометрического состава и почвообразующих пород.

Микробная биомасса и микробное дыхание почв. Содержание микробной биомассы, ее дыхательная активность и доля в углероде дерново-подзолистой почвы разных исследуемых точек Вологодской области в среднем оказались почти в 2 раза больше таковых Костромской (рис. 1). Отмечают, что такие микробиологические показатели в суглинистой почве выше, чем в соответствующей песчаной и супесчаной (Kaiser et al., 1992; Вершинин и др., 2014). Нами показано, что почва разных точек исследования Вологодской области характеризовалась более высоким содержанием ФГ (в среднем в 1.5 раза) по сравнению с Костромской (табл. 2), что и обусловило различие их микробных свойств. К тому же показано, что почвенная микробная биомасса и ее активность существенно зависят и от содержания в почве органического углерода и общего азота (Kaiser et al., 1992). Выявленная нами тесная корреляционная связь между микробными свойствами и С (N) в изученных почвах согласуется с этой закономерностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлена пространственная вариабельность химических и микробиологических свойств дерново-подзолистой почвы хвойных, смешанных и мелколиственных лесов Вологодской и Костромской областей. Показана четкая дифференциация изученных свойств дерново-подзолистой почвы, обусловленная в основном содержанием ряда элементов и микробной биомассы. Почва Вологодской области оказалась обогащена элементами Al, Ca, Na, Fe, Cu, Ni, V, Co по сравне-

нию с Костромской, но обеднена Mn, S, Pb, Cd, Cr и Se. Оценены различия элементного состава почвы “ближнего” и “дальнего” ареалов области, что может указывать в определенной степени на промышленное загрязнение серой ближних к областному центру лесных территорий. Химические и микробиологические свойства одного типа почвы (дерново-подзолистая), растительности (лес) и сходных климатических условий существенно различаются, что обусловлено, по видимому, почвообразующими породами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверкиева И.Ю., Припутина И.В.* Оценка влияния техногенной эмиссии NO_x на питательный режим лесных биогеоценозов Подмосковья // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2011. Т. 17. № 3. С. 51–57.
- Богатырев Л.Г., Ладонин Д.В., Семенюк О.В.* Микроэлементный состав некоторых почв и почвообразующих пород южной тайги Русской равнины // Почвоведение. 2003. № 5. С. 568–576.
- Богородская А.В., Кукавская Е.А.* Состояние микробных сообществ в почвах лиственных и светлохвойных лесов Средней Сибири после рубок и пожаров // Лесоведение. 2016. № 5. С. 383–396.
- Большов С.И., Фуззина Ю.Н.* Физико-географические условия Костромского Заволжья: Геолого-геоморфологическое устройство // Костромское Заволжье. Природа и человек. Эколого-социальный очерк, М.: Из-во “ИПЭЭ РАН”, 2001. С. 36–60.
- Вершинин А.А., Петров А.М., Акайкин Д.В., Игнатьев Ю.А.* Оценка биологической активности дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава в условиях нефтяного загрязнения // Почвоведение. 2014. № 2. С. 250–256.
- Водяницкий Ю.Н., Васильев А.А., Кожева А.В., Сатаев Э.Ф.* Особенности поведения железа в дерново-подзолистых и аллювиальных оглеенных почвах Среднего Предуралья // Там же. 2006. № 4. С. 396–409.
- Воробейчик Е.Л., Кайгородова С.Ю.* Многолетняя динамика содержания тяжёлых металлов в верхних горизонтах почв в районе воздействия медеплавильного завода в период сокращения объемов его выбросов // Там же. 2017. № 8. С. 1009–1024.
- Гавриленко Е.Г., Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Макаров О.А.* Пространственное варьирование содержания углерода микробной биомассы и микробного дыхания почв южного Подмосковья // Там же. 2011. № 10. С. 1231–1245.
- Гей В.П., Плевшивецова Э.С., Ауслендер В.Г.* Новые данные о ранневалдайских отложениях бассейна рек Шексны и Вологды, их стратиграфическое и палеогеографическое значение / Геология и минеральные ресурсы Вологодской области. Вологда: Русь, 2000. С. 42–47.
- Дворникова Л.Л.* Почвенный покров западной части Вологодской области: Автореф. дис. ... канд. географ. наук. 25.00.09. Ленинград, 1961. 18 с.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды Вологодской области в 2017 г. Вологда // Сайт Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области. http://dpr.gov35.ru/dokumenty/detail.php?ELEMENT_ID=116692. Дата обращения: 12.07.2018.
- Доклад об экологической ситуации в Костромской области в 2016 г. Кострома // Сайт Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Костромской области. (<http://docplayer.ru/69421557-Ob-ekologicheskoy-situacii-v-kostromskoy-oblasti-v-2016-godu-vvedenie.html>). Дата обращения: 12.07.2018.
- Дубиковский Г.П.* Содержание и распределение микроэлементов в дерново-подзолистых почвах. Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. 03.02.13. Минск, 1965. 17 с.
- Единый государственный реестр почвенных ресурсов России / Отв. ред. Иванов А.Л., Шоба А.С., Столбовой В.С. и др. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2014. 768 с.
- Жарикова Е.А.* Геохимическая характеристика почв восточного побережья Северо-Сахалинской низменности // Почвоведение. 2017. № 1. С. 40–47.
- Жукова А.Д., Хомяков Д.М.* Показатели микробного дыхания в почвенном покрове импактной зоны предприятий по производству минеральных удобрений // Там же. 2015. № 8. С. 984–992.
- Золотарева Б.И.* Тяжелые металлы в почвах Верхнеокского бассейна // Там же. 2003. № 2. С. 173–182.
- Ильин В.Б.* Биогенная и техногенная аккумуляция химических элементов в почве // Там же. 1988. № 7. С. 124–132.
- Каменщикова В.И.* Экологическое состояние и устойчивость почв таежно-лесной зоны к антропогенным воздействиям // Вестник Пермского университета. 2011. № 1. С. 64–67.
- Карпачевский Л.О.* Динамика свойств почвы. М.: ГЕОС, 1997. 170 с.
- Кауричев И.С., Орлов Д.С.* Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв. М.: Колос, 1982. 248 с.
- Комиссаров В.В.* Агрохимические особенности пахотных почв центральной части Вологодской области (в связи со свойствами материнских пород, рельефом, почвенно-грунтовыми водами и окультуренностью). Автореф. дис. кан. с.-х. наук. 03.02.13. М., 1972. 27 с.
- Копничева Г.М., Чернышов В.И., Артякова В.П.* Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы Вологодской области // Геология и минеральные ресурсы Вологодской области: Сб. научных трудов. Вологда: Русь, 2000. С. 4–15.
- Краснокутская О.Н., Кузьмич М.А., Выродова Л.П.* Хром в объектах окружающей среды // Агрохимия. 1990. № 2. С. 128–140.
- Кудреватых И.Ю., Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., Иванничева Е.А.* Атмосферные выпадения соединений азота и свойства лесных почв Вологодской области // Почвоведение. 2018. № 2. С. 155–164.

- Ладонин Д.В., Пляскина О.В. Фракционный состав соединений меди, цинка, кадмия и свинца в некоторых типах почв при полиэлементном загрязнении // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2003. № 1. С. 8–16.
- Лапа В.В., Михайловская Н.А. Ферментативная активность дерново-подзолистых почв при разных уровнях применения удобрений // Доклады Национальной академии наук Белоруссии. 2015. Т. 59. № 5. С. 122–128.
- Ларионова А.А., Квиткина А.К., Быховец С.С., Лопес-де-Гереню В.О., Колягин Ю.Г., Казанов В.В. Влияние азота на минерализацию и гумификацию лесных опавов в модельном эксперименте // Лесоведение. 2017. № 2. С. 128–139.
- Лебедева О.Ю., Фруммин Г.Т. Содержание валовых форм тяжелых металлов в почвах Костромской области // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2011. № 1. С. 239–242.
- Писаренко А.И. Лесное хозяйство России. М.: Юриспруденция, 2004. 546 с.
- Плавинский В.А. Почвы Вологодской области, их классификация и свойства. Вологда: ВоГТУ, 2007. 92 с.
- Пляскина О.В., Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в гранулометрических фракциях некоторых типов почв // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2005. № 4. С. 36–43.
- Позняк С.С. Содержание тяжелых металлов Pb, Ni, Zn, Cu, Mn, Zr, Cr, Co и Sn в почвах Центральной зоны Республики Беларусь // Научный журн. НИУ ИТМО. Серия “Экономика и экологический менеджмент”. 2011. № 1. С. 250–261
- Протасова Н.А., Беляев А.Б. Макро- и микроэлементы в почвах Центрально-черноземной зоны и почвенно-геохимическое районирование ее территории // Почвоведение. 2000. № 2. С. 201–211.
- Рассеянные элементы в бореальных лесах / Отв. ред. Исаев А.С. М.: Наука, 2004. 616 с.
- Самонова О.А., Касимов Н.С., Асеева Е.Н. Металлы в гранулометрических фракциях почв овражной системы (юго-восточная часть Смоленско-Московской возвышенности) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2016. № 3. С. 18–28.
- Самонова О.А., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Жидкин А.П. Металлы в почвах малого водосбора лесостепной зоны (Среднерусская возвышенность) // Почвоведение. 2015. № 6. С. 584–592.
- Свистов П.Ф., Полищук А.И., Першина Н.А. Качественная оценка загрязнения окружающей среды (по данным о химическом составе атмосферных осадков). СПб.: Из-во ГГО им А.И. Воейкова, 2010. С. 4–17.
- Сморкалов И.А., Воробейчик Е.Л. Почвенное дыхание лесных экосистем в градиентах загрязнения среды выбросами медеплавильных заводов // Экология. 2011. № 6. С. 425–435.
- Сорокин Н.Д., Афанасова Е.Н. Микробиологическая диагностика состояния почв и филлосферы лесных экосистем Сибири // Известия РАН. Сер. Биол. 2012. № 1. С. 100–108.
- Федорец Н.Г., Бахмет О.Н. Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: Из-во Карельского НЦ РАН, 2003. 240 с.
- Холодов В.Н. Геохимия осадочного процесса // Труды геологического института РАН. М.: ГЕОС, 2006. 608 с.
- Чернова О.В., Бекецкая О.В. Допустимые и фоновые концентрации загрязняющих веществ в экологическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1102–1113.
- Ananyeva N.D., Susyan E.A., Chernova O.V., Wirth S. Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of European Russia // European J. Soil Biology. 2008. V. 44. № 2. P. 147–157.
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biology Biochemistry. 1978. V. 10. № 3. P. 215–221.
- Creamer R.E., Schulte R.P.O., Stone D., Gal A., Krogh P.H., Papa G.L., Marray P.J., Pepe G., Foerster D., Rutgers M., Sousa J.P., Winding A. Measuring basal soil respiration across Europe: Do incubation temperature and incubation period matter? // Ecological Indicators. 2014. V. 36. P. 409–418.
- Kaiser E.A., Mueller T., Joergensen R.G., Insam H., Heinemeyer O. Evaluation of methods to estimate the soil microbial biomass and the relationship with soil texture and organic matter // Soil Biology Biochemistry. 1992. V. 24. Is. 7. P. 675–683.
- Kassambara A. Practical guide to Principal Component Methods in R. (Multivariate Analysis). CreateSpace Independent Publishing Platform. 2017. 170 p.
- Le S., Josse J., Husson F. FactoMineR: An R package for Multivariate Analysis // J. Statistical Software. 2008. V. 25. Is. 1. P. 1–18.
- Morris S.J., Boerner R.E.J. Spatial distribution of fungal and bacterial biomass in southern Ohio hardwood forest soils: scale dependency and landscape patterns // Soil Biology Biochemistry. 1999. V. 31. № 6. P. 887–902.
- Oulehle F., Tahovská K., Chuman T., Evans C.D., Hruska J., Ruzek M., Barta J. Comparison of the impacts of acid and nitrogen additions on carbon fluxes in European conifer and broadleaf forests // Environmental Pollution. 2018. V. 238. P. 884–893.
- Pečulytė D., Dirginčiūtė-Volodkienė V. Effect of long-term industrial pollution on microorganisms in soil of deciduous forests situated along a pollution gradient next to a fertilizer factory // Ekologija. 2009. V. 55. № 2. P. 133–141.
- Saetre P. Spatial patterns of ground vegetation, soil microbial biomass and activity in a mixed sprucebirch stand // Ecography. 1999. V. 22. P. 183–192.
- Shi L., Zhang H., Liu T., Mao P., Zhang W., Shao Y., Fu S. An increase in precipitation exacerbates negative effects of nitrogen deposition on soil cations and soil microbial communities in a temperate forest // Environmental Pollution. 2018. V. 235. P. 293–301.

Chemical and Microbiological Properties of Forest Albic Retisols in Vologda and Kostroma Regions

I. Yu. Kudrevatykh^{1,*}, N. D. Ananyeva¹, S. V. Sushko¹, and E. A. Ivanishcheva²

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Sciences, Russian Academy of Sciences (IPC BPSS), Institutskaya st. 2, Pushchino, Moscow Oblast, 142290 Russia*

²*Vologda State University, S. Orlova st. 6, Vologda, 160035 Russia*

*E-mail: averkieva.irina@yandex.ru

The study is aimed at spatial assessment of the chemical and microbiological properties of Albic Retisols in coniferous and mixed secondary forests (50–80 years old) in the Vologda and Kostroma regions. Soil samples (0–20 cm) were taken in August 2015 at 38 spatially distant points of two areas located near (0.8–29 km) and far (300–330 km) from the corresponding regional center. In the samples, the pH value, the content of physical clay (PC), total carbon (C), total nitrogen (N), macroelements (Al, P, K, Ca, Na, Mg, S), microelements (Fe, Mn, Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Cs, V, Co, As, Sr, Ce), microbial biomass carbon (C_{mic}) and basal respiration rate were measured. The coefficient of spatial variation for PC, chemical and microbiological parameters of the soil in both regions was 29, 8–91, and 36–51%, respectively. Significant differences in the content of Cr, Sr, Ce, Mn, Na, S, were found in the areas of different distance from the regional center in the Vologda region, in Kostroma region – differences were found to exist for PC, P, K, S contents; however, the microbiological parameters haven't been found to be different excluded. The differentiation of forest soils of the two studied regions was revealed, mainly due to the content of Cd, V, Fe, Zn, Cu, Ca и C_{mic}.

Keywords: albic retisols, forests, macro- and microelements, microbial biomass carbon, basal breathing.

REFERENCES

- Ananyeva N.D., Susyan E.A., Chernova O.V., Wirth S., Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of European Russia, *European J. Soil Biology*, 2008, Vol. 44, No. 2, pp. 147–157.
- Anderson J.P.E., Domsch K.H., A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 1978, Vol. 10, No. 3, pp. 215–221.
- Averkieva I.Y., Pripulina I.V., Otsenka vliyaniya tekhnogennoi emissii NOx na pitatel'nyi rezhim lesnykh biogeotsenozov Podmoskov'ya (Nitrogen oxides (NOx) technogenic emission influence on Moscow Region forest biogeocoenoses trophic regime assessment), *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.A. Nekrasova*, 2011, Vol. 17, No. 3, pp. 51–57.
- Bogatyrev L.G., Ladonin D.V., Semenyuk O.V., Microelemental composition of some soils and parent materials in the southern taiga of the Russian plain, *Eurasian Soil Science*, 2003, Vol. 36, No. 5, pp. 511–518.
- Bogorodskaya A.V., Kukavskaya E.A., Sostoyanie mikrobnnykh soobshchestv v pochvakh listvennykh i svetlokhvoynnykh lesov Srednei Sibiri posle rubok i pozharov (Activity of soil microbial communities in deciduous and light coniferous forests in Central Siberia after cuts and fires), *Lesovedenie*, 2016, No. 5, pp. 383–396.
- Bolysov S.I., Fuzeina Y.N., Fiziko-geograficheskie usloviya Kostromskogo Zavolzh'ya: Geologo-geomorfologicheskoe ustroystvo (Physical and geographical conditions of the Kostroma Trans-Volga region: Geological and geomorphological structure), In: *Kostromskoe Zavolzh'e. Priroda i chelovek. Ekologo-sotsial'nyi ocherk* (Kostroma Transvolga region: human and environment. Socioecological notes), M.: Izd-vo "IPEE RAN", 2001, pp. 36–60.
- Chernova O.V., Beketskaya O.V., Permissible and background concentrations of pollutants in environmental regulation (heavy metals and other chemical elements), *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44, No. 9, pp. 1008–1017.
- Creamer R.E., Schulte R.P.O., Stone D., Gal A., Krogh P.H., Papa G.L., Marray P.J., Pepe G., Foerster D., Rutgers M., Sousa J.P., Winding A., Measuring basal soil respiration across Europe: Do incubation temperature and incubation period matter?, *Ecological Indicators*, 2014, Vol. 36, pp. 409–418.
- Dubikovskii G.P., *Soderzhanie i raspredelenie mikroelementov v dernovo-podzolistykh pochvakh. Avtoref. dis. d-ra s.-kh. nauk* (Content and distribution of trace elements in soddy-podzolic soils. Extended abstract of Doctor's agricul. sci. thesis), Minsk, 1965, 17 p.
- Dvornikova L.L., *Pochvennyi pokrov zapadnoi chasti Vologodskoi oblasti. Avtoref. diss. kand. geograf. nauk.* (Soil cover in the western part of the Vologda region. Extended abstract of Candidate's geographical sci. thesis), Leningrad, 1961, 18 p.
- Edinyi gosudarstvennyi reestr pochvennykh resursov Rossii*, (Unified State register of soil resources of Russia), Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2014, 768 p.
- Fedorets N.G., Bakhmet O.N., *Ekologicheskie osobennosti transformatsii soedinenii ugleroda i azota v lesnykh pochvakh* (Ecological specifics of carbon and nitrogen compounds conservation), Petrozavodsk: Izd-vo KarNTs RAN, 2003, 240 p.
- Gavrilenko E.G., Sus'yan E.A., Anan'eva N.D., Makarov O.A., Spatial variability in the carbon of microbial biomass and microbial respiration in soils of the south of Moscow oblast, *Eurasian Soil Science*, 2011, Vol. 44, No. 10, pp. 1125–1138.
- Gei V.P., Pleshivtseva E.S., Auslender V.G., Novye dannye o rannevaldaiskikh otlozheniyakh basseina rek Sheksny i Volody, ikh stratigraficheskoe i paleogeograficheskoe znachenie (New data on the early Valdai deposits of the Sheksna and Vologda river basins, their stratigraphic and paleogeographic significance), In: *Geologiya i mineral'nye*

- resursy Vologodskoi oblasti* (Geology and mineral resources of the Vologda region), Vologda: Rus', 2000, pp. 42–47.
<http://docplayer.ru/69421557-Ob-ekologicheskoy-situacii-v-kostromskoy-oblasti-v-2016-godu-vvedenie.html> (July 12, 2018)
http://dpr.gov35.ru/dokumenty/detail.php?ELEMENT_ID=116692 (July 12, 2018)
- Il'in V.B., Biogennaya i tekhnogennaya akkumulyatsiya khimicheskikh elementov v pochve (Biogenic and technogenic accumulation of chemical elements in soils), *Pochvovedenie*, 1988, No. 7, pp. 124–132.
- Kaiser E.A., Mueller T., Joergensen R.G., Insam H., Heinemeyer O., Evaluation of methods to estimate the soil microbial biomass and the relationship with soil texture and organic matter *Soil Biology Biochemistry*, 1992, Vol. 24, No. 7, pp. 675–683.
- Kamenshchikova V.I., Ekologicheskoe sostoyanie i ustoychivost' pochv taezhno-lesnoi zony k antropogennym vozdeistviyam (Ecological state and resistance of soils of the taiga-forest zone to anthropogenic impact), *Vestnik Permskogo universiteta*, 2011, No. 1, pp. 64–67.
- Karpachevskii L.O., *Dinamika svoistv pochvy* (Dynamics of soil properties), M.: GEOS, 1997, 170 p.
- Kassambara A., *Practical guide to Principal Component Methods in R. (Multivariate Analysis)*, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017, 170 p.
- Kaurichev I.S., Orlov D.S., *Okislitel'no-vosstanovitel'nye protsessy i ikh rol' v genezise i plodorodii pochv* (Redox processes and their role in the genesis and fertility of soils), M.: Kolos, 1982, 248 p.
- Kholodov V.N., *Geokhimiya osadochnogo protsessa* (Geochemistry of sedimentary process), M.: GEOS, 2006, Vol. 574, 608 p.
- Komissarov V.V., *Agrokhimicheskie osobennosti pakhotnykh pochv tsentral'noi chasti Vologodskoi oblasti (v svyazi so svoistvami materinskikh porod, rel'efom, pochvenno-gruntovymi vodami i okul'turennost'yu)*. Avtoref. dis. kan. s-kh. nauk. (Agrochemical characteristics of arable soils in the central part of the Vologda Oblast (in connection with the properties of parent rocks, relief, soil and groundwater and cultivation). Extended abstract of Candidate's agric. sci. thesis), M., 1972, 27 p.
- Kopnicheva G.M., Chernyshov V.I., Artyakova V.P., Sostoyanie i perspektivy razvitiya mineral'no-syr'evoi bazy Vologodskoi oblasti (State and prospects for the development of the mineral resource base of the Vologda region), *Geologiya i mineral'nye resursy Vologodskoi oblasti* (Geology and mineral resources of the Vologda region), Book of scientific papers, Vologda: Rus', pp. 4–15.
- Krasnokutskaya O.N., Kuz'mich M.A., Vyrodova L.P., Khrom v ob'ektakh okruzhayushchei sredy (Chromium in environmental objects), *Agrokhimiya*, 1990, No. 2, pp. 128–140.
- Kudrevatykh I.Y., Ivashchenko K.V., Anan'eva N.D., Ivanishcheva E.A., Atmospheric nitrogen deposition and the properties of soils in forests of Vologda region, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 2, pp. 153–162.
- Ladonin D.V., Plyaskina O.V., Fraktsionnyi sostav soedinenii medi, tsinka, kadmiya i svintsya v nekotorykh tipakh pochv pri polielementnom zagryaznenii (Fractional composition of copper, zinc, cadmium and lead compounds in some types of soils with polyelemental pollution), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*, 2003, No. 1, pp. 8–16.
- Lapa V.V., Mikhailovskaya N.A., Fermentativnaya aktivnost' derno-podzolistykh pochv pri raznykh urovnyakh primeneniya udobrenii (Enzyme activities of luvisol soils under different levels of fertilization), *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belorussii*, 2015, Vol. 59, No. 5, pp. 122–128.
- Larionova A.A., Kvitkina A.K., Bykhovets S.S., Lopes De Gerenyu V.O., Kolyagin Y.G., Kolganov V.V., Vliyanie azota na mineralizatsiyu i gumifikatsiyu lesnykh opadov v model'nom eksperimente (The contribution of nitrogen to mineralization and humification of forest litter in simulation study), *Lesovedenie*, 2017, No. 2, pp. 128–139.
- Le S., Josse J., Husson F., FactoMineR: An R package for Multivariate Analysis, *J. Statistical Software*, 2008, Vol. 25, No. 1, pp. 1–18.
- Lebedeva O.Y., Frumin G.T., Soderzhanie valovykh form tyazhelykh metallov v pochvakh Kostromskoi oblasti (The contents of heavy metals in soils of Kostromskaya oblast), *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle*, 2011, No. 1, pp. 239–242.
- Morris S.J., Spatial distribution of fungal and bacterial biomass in southern Ohio hardwood forest soils: fine scale variability and microscale patterns, *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, Vol. 31, No. 10, pp. 1375–1386.
- Oulehle F., Tahovská K., Chuman T., Evans C.D., Hruska J., Ruzek M., Barta J., Comparison of the impacts of acid and nitrogen additions on carbon fluxes in European conifer and broadleaf forests, *Environmental Pollution*, 2018, Vol. 238, pp. 884–893.
- Pečiulytė D., Dirginčiūtė-Volodkienė V., Effect of long-term industrial pollution on microorganisms in soil of deciduous forests situated along a pollution gradient next to a fertilizer factory, *Ekologiya*, 2009, Vol. 55, No. 2, pp. 133–141.
- Pisarenko A.I., *Lesnoe khozyaistvo Rossii* (Forestry of Russia), M.: Yurisprudentsiya, 2004, 546 p.
- Plavinskii V.A., *Pochvy Vologodskoi oblasti, ikh klassifikatsiya i svoistva* (Soils of the Vologda region, their classification and properties), Vologda: VoGTU, 2007, 92 p.
- Plyaskina O.V., Ladonin D.V., Soedineniya tyazhelykh metallov v granulometricheskikh fraktsiyakh nekotorykh tipov pochv (Heavy metals compounds in granulometric fractions of some soil types), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*, 2005, No. 4, pp. 36–43.
- Poznyak S.S., Soderzhanie tyazhelykh metallov Pb, Ni, Zn, Cu, Mn, Zr, Cr, Co i Sn v pochvakh Tsentral'noi zony Respubliki Belarus' (Concentration of heavy metals (Pb, Ni, Zn, Cu, Mn, Zr, Cr, Co and Sn) in soils of the Central area of Belarus), *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya "Ekonomika i ekologicheskii menedzhment"*, 2011, No. 1, pp. 250–261.
- Protasova N.A., Belyaev A.B., Macro- and microelements in soils of the Central Chernozemic area and its soil-geochemical zoning, *Eurasian Soil Science*, 2000, Vol. 33, No. 2, pp. 177–183.
- Rasseyannye elementy v boreal'nykh lesakh*, M.: Nauka, 2004, 410 p.
- Saetre P., Spatial patterns of ground vegetation, soil microbial biomass and activity in a mixed sprucebirch stand, *Ecography*, 1999, Vol. 22, pp. 183–192.
- Samonova O.A., Gennadiev A.N., Koshovskii T.S., Zhidkin A.P., Metals in the soils of a small watershed in the forest-steppe zone of the Central Russian upland, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 6, pp. 584–592.

- Samonova O.A., Kasimov N.S., Aseeva E.N., Metally v granulometricheskikh fraktsiyakh pochv ovrazhnoi sistemy (yugo-vostochnaya chast' Smolensko-Moskovskoi vozvyshechnosti) (Grain size distribution of metals in soils of a gully system (southeastern Smolensk-Moscow upland)), *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2016, No. 3, pp. 18–28.
- Shi L., Zhang H., Liu T., Mao P., Zhang W., Shao Y., Fu S., An increase in precipitation exacerbates negative effects of nitrogen deposition on soil cations and soil microbial communities in a temperate forest, *Environmental Pollution*, 2018, Vol. 235, pp. 293–301
- Smorkalov I.A., Vorobeichik E.L., Soil respiration of forest ecosystems in gradients of environmental pollution by emissions from copper smelters, *Russian J. Ecology*, 2011, Vol. 42, No. 6, pp. 464–470.
- Sorokin N.D., Afanasova E.N., Mikrobiologicheskaya diagnostika sostoyaniya pochv i filosfery lesnykh ekosistem Sibiri (Microbiological diagnostics of soil stage in the phyllosphere of the woodland ecosystem of Siberia), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya biologicheskaya*, 2012, No. 1, pp. 100–108.
- Svistov P.F., Polishchuk A.I., Pershina N.A., Kachestvennaya otsenka zagryazneniya okruzhayushchei sredy (po dannym o khimicheskom sostave atmosferynykh osadkov) (Qualitative assessment of environmental pollution (based on data on the chemical composition of atmospheric precipitation)), *Trudy glavnoi geofizicheskoi observatorii A.I. Voeikova*, 2010, No. 2, pp. 4–17
- Vershinin A.A., Petrov A.M., Akaikin D.V., Ignat'ev Y.A., Assessing the biological activity of oil-contaminated soddy-podzolic soils with different textures, *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47, No. 2, pp. 134–139.
- Vodyanitskii Y.N., Vasil'ev A.A., Kozheva A.V., Sataev E.F., Specific features of iron behavior in soddy-podzolic and alluvial gleyed soils of the middle Cis-Urals region, *Eurasian Soil Science*, 2006, Vol. 39, No. 4, pp. 354–366.
- Vorobeichik E.L., Kaigorodova S.Yu., Mnogoletnyaya dinamika sodержaniya tyazhelykh metallov v verkhnikh gorizontakh pochv v raione vozdeistviya medeplavil'nogo zavoda v period snizheniya ego vybrosov (Long-term dynamics of heavy metals content in upper layers of soils from near the copper plant during the periods of decreased emissions), *Pochvovedenie*, 2017, No. 8, pp. 1009–1024.
- Zharikova E.A., Geochemical characterization of soils of the eastern coast of the Northern Sakhalin lowland, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 1, pp. 34–41.
- Zhukova A.D., Khomyakov D.M., Parameters of microbial respiration in soils of the impact zone of a mineral fertilizer factory, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 8, pp. 862–870.
- Zolotareva B.I., Heavy metals in soils of the Upper Oka river basin, *Eurasian Soil Science*, 2003, Vol. 36, No. 2, pp. 164–172.