

Т. А. Сухарева

## **Пространственно-временная изменчивость кислотности почв северотаежных лесов при снижении техногенной нагрузки**

Проведена оценка состояния почв, подверженных влиянию аэрополлютантов комбината "Североникель" (г. Мончегорск, Мурманская область). Представлены результаты анализа пространственно-временной динамики кислотности органогенного горизонта Al-Fe подзолистых почв в процессе техногенной дигрессии еловых и сосновых лесов. Исследования проведены в 1992 и 2007 гг. на стационарных пробных площадях, расположенных на разном удалении от источника выбросов. Парцеллярные различия выявлены в фоновом ельнике кустарничково-зеленомошном, где актуальная кислотность органогенного горизонта почв древесных парцелл ниже, чем межкрупных. В условиях аэротехногенного загрязнения парцеллярные различия в кислотности почв не выражены. В сосновых лесах пространственная динамика характеризуется снижением актуальной и гидролитической кислотностей верхнего горизонта почв и возрастанием обменного алюминия по градиенту загрязнения. В дефолирующих еловых лесах и редколесье снижение актуальной кислотности почв отмечено только в межкрупных пространствах, а гидролитической кислотности – в обеих парцеллах. Особо выделяется стадия начальной дефолиации крон хвойных деревьев, наиболее удаленная от источника эмиссии поллютантов. На данной стадии органогенный горизонт почв еловой парцеллы более кислый, чем в ненарушенном фитоценозе, а гидролитическая кислотность почв остается на уровне фоновых значений. На фоне сокращения атмосферных выбросов в 2007 г. отмечено увеличение актуальной кислотности изучаемых горизонтов почв в дефолирующих лесах. На участках, близко расположенных от комбината (7–10 км), изменений значений pH органогенного горизонта почв за исследуемый период не обнаружено. В сосновых дефолирующих лесах и техногенном редколесье возрастает гидролитическая кислотность почв. В еловых лесах, подверженных атмосферному загрязнению, уровень гидролитической и обменной кислотности почв снижается, за исключением стадии начальной дефолиации северотаежных лесов. На данной стадии дигрессии древостоя достоверно увеличиваются обменная кислотность почв, содержание обменного алюминия и водорода. Результаты исследований могут быть использованы при мониторинге природной среды, оценке почвенного плодородия лесных экосистем, находящихся под воздействием природных и техногенных факторов, а также способствовать развитию методов восстановления антропогенно нарушенных почв.

**Ключевые слова:** медно-никелевое производство, атмосферное загрязнение, бореальные леса, северотаежная подзона, подзолы, органогенный горизонт почв, кислотность почв.

### **Введение**

Как известно, лесные экосистемы Крайнего Севера являются высокоуязвимыми к техногенному воздействию и медленно самовосстанавливающимися. Поступление промышленных эмиссий в атмосферу – это мощный фактор, определяющий состояние почв бореальных лесов. В центральной и северо-западной частях Мурманской области основными источниками аэротехногенного загрязнения являются предприятия горно-металлургического комплекса, длительное воздействие со стороны которых привело к деградации почвы на значительных по площади территориях. С точки зрения оценки динамики состояния лесных экосистем вблизи северной границы их распространения под влиянием природных и техногенных факторов данная территория является репрезентативной. Годовые объемы выбросов самого мощного в Северной Европе источника атмосферного загрязнения – металлургического комбината "Североникель" (г. Мончегорск) – за период 1991–2007 гг. существенно снизились. За эти годы также сократилось количество поступающих в атмосферу приоритетных поллютантов: SO<sub>2</sub> и тяжелых металлов (Ni, Cu). Вместе с тем многолетнее аэротехногенное воздействие привело к значительной трансформации физико-химических свойств почв северотаежных лесов [1; 2].

Изучению свойств почв антропогенно нарушенных лесных экосистем Северной Фенноскандии посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов [1–9], однако регулярных исследований, проводимых на стационарных пробных площадях, позволяющих оценить не только пространственное, а также и временное варьирование изучаемых параметров, недостаточно. В этой связи необходимость в длительных стационарных наблюдениях за изменением почвенных характеристик сохраняется.

Как известно, кислотность почв оказывает существенное влияние на подвижность и миграцию химических элементов в лесных биогеоценозах, в том числе элементов минерального питания и поллютантов [1]. Особое значение определение параметров кислотности имеет для органогенного горизонта почв, являющегося основным источником минерального питания растений. Изменение кислотности почв на фоне аэротехногенного загрязнения может влиять на круговорот биофильных элементов, плодородие почв, продуктивность лесных экосистем. В этой связи целью работы явилось изучение кислотности органогенного горизонта почв после

значительного снижения выбросов сернистого газа и полиметаллической пыли медно-никелевым комбинатом "Североникель". Данная цель предусматривала решение следующих задач: 1) исследовать кислотность почв в процессе техногенной дигрессии сосновых и еловых лесов с учетом парцеллярной структуры биогеоценозов; 2) дать оценку изменений актуальной, гидролитической и обменной кислотности почв после снижения аэротехногенной нагрузки на лесные экосистемы.

Анализ параметров кислотности почв позволяет диагностировать их состояние в условиях меняющейся техногенной нагрузки. Данные регулярных стационарных исследований лесных экосистем в зоне влияния комбината "Североникель" могут быть использованы при мониторинге природной среды, оценке почвенного плодородия и корректно интерполированы на почвы Северной Фенноскандии.

### Объекты и методы

Объектом исследования явились органогенные горизонты иллювиально-гумусовых подзолов в ельниках кустарничково-зеленомошных и сосняках кустарничково-лишайниковых на территории Мурманской области. Исследования проводили в зоне воздействия медно-никелевого комбината "Североникель". Древоστοи, произрастающие на стационарных пробных площадях (ПП), представляют основные стадии дигрессионной сукцессии северотаежных лесов. Обследовано 9 постоянных пробных площадей, расположенных по градиенту промышленного загрязнения от комбината, в еловых (7, 28, 31, 100, 167 км от комбината) и сосновых (8, 31, 48 и 175 км от комбината) лесах. Экосистемы, подверженные воздушному загрязнению, представлены дефолирующими лесами (20–100 км от источника загрязнения) и техногенными редколесьями (5–20 км). Фоновые ПП расположены на значительном расстоянии от источника атмосферных выбросов, в юго-западной части Мурманской области (рис.)

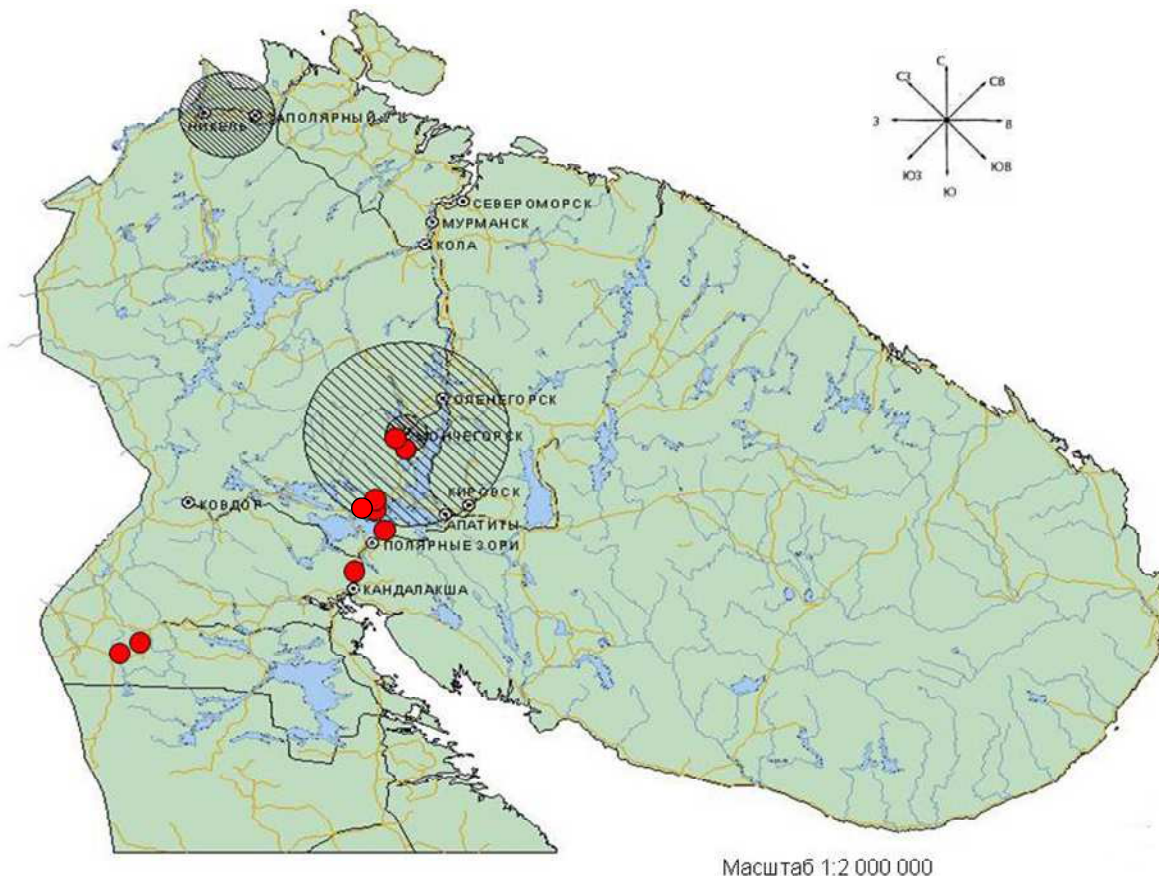


Рис. Карта-схема расположения пробных площадей на фоновых и техногенно-нарушенных территориях Мурманской области  
 Fig. The map of locating trial plots on background and technogenically disturbed territories of the Murmansk region

Для установления пространственной вариабельности физико-химических свойств почв проводили исследования в различных парцеллах. При этом для еловых лесов выделены древесная (еловая кустарничковая) и межкروновая (кустарничково-зеленомошная и кустарничковая) парцеллы, для сосновых лесов – древесная (сосновая кустарничково-лишайниковая, сосновая лишайниковая и сосновая кустарничковая) и межкروновая (кустарничково-лишайниковая, лишайниковая и кустарничковая).

Почвы в районе исследования представлены Al-Fe-гумусовыми подзолами, развитыми на ледниковых моренных песчаных отложениях [10]. В современной классификации<sup>1</sup> подзолы, имеющие профиль O–E–BH–C, выделяются на уровне типа и входят в отдел альфагумусовых почв ствола постлитогенных почв [11].

Отбор образцов органогенного горизонта почв (O) проводили в межкروновых и подкروновых пространствах изучаемых фитоценозов в периоды 1992 и 2007 гг. Мощность органогенного горизонта в ненарушенных северотаежных лесах достигала 11–13 см, в дефолирующих лесах – 10–13 см (в еловой парцелле до 19 см), в техногенных редколесьях – 10–12 см.

Почвенные образцы высушивали при комнатной температуре, затем просеивали. Аналитической обработке подвергали мелкозем (фракция < 1,0 мм).

Кислотность почв определяли в вытяжках, используя соотношение почва : растворитель для органогенных горизонтов как 1 : 25. Полученные суспензии оставляли на ночь, затем встряхивали в течение 2 ч на ротаторе и фильтровали. Актуальную кислотность (рН) измеряли потенциметрически в водной вытяжке. Обменную кислотность определяли в вытяжке 1N KCl по методу А. В. Соколова, гидролитическую кислотность – в вытяжке 1M CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> (рН = 7) по методу Каппена [12].

Математическую обработку данных проводили с помощью общепринятых статистических методов с использованием пакета программ Microsoft Excel 6.0. Проведена оценка достоверности различия средних значений с использованием непараметрических статистических критериев: *U*-критерия Манна – Уитни (для попарных сравнений) и *H*-критерия Краскела – Уоллиса.

## Результаты и обсуждение

**Еловые леса.** За исследованный период *актуальная кислотность* органогенных горизонтов почв межкروновых пространств фоновых ельников кустарничково-зеленомошных варьировала от 3,4 до 4,3, в дефолирующих лесах и техногенном редколесье – от 3,7 до 4,3 рН. В подкروновых пространствах рН органогенного горизонта почв, сформировавшихся в фоновых условиях, варьировала в широких пределах, изменяясь от 3,5 до 5,1. В дефолирующих лесах и техногенном редколесье диапазон изменения исследуемого показателя был уже и составлял от 3,5 до 4,3.

Парцеллярные различия проявлялись только в почвах фоновых участков, где актуальная кислотность верхнего горизонта подкروновых пространств ниже, чем межкроновых ( $H_{4,8} = 3$ ,  $p < 0,03$ ). В условиях аэротехногенного загрязнения средние значения рН почв подкроновых пространств сопоставимы по показателям с органогенными горизонтами почв межкроновых микрогруппировок (табл. 1), несмотря на то что верхний горизонт почв еловых парцелл испытывает дополнительную нагрузку кислотообразующих веществ, поступающих с подкроновыми и стволовыми водами [13]. Прежде всего это связано с высоким содержанием кальция в многолетней опадающей хвое ели, составляющей 4,0–5,4 г/кг [14]. Как известно, хвойный опад преимущественно поступает под кроны деревьев и обогащает почву основными катионами, создавая гетерогенность педоусловий. Кислотность органогенных горизонтов почв подкроновых пространств, подверженных постоянному воздействию кислотообразующих веществ, поступающих со стволовыми и кроновыми водами, практически не изменялась, так как существуют эффективные механизмы ее нейтрализации. В почвах древесных парцелл часть кислотной нагрузки нейтрализуется при взаимодействии кроновых и стволовых вод с верхними слоями подстилки. В этих слоях органогенных горизонтов одним из механизмов нейтрализации кислотности является взаимодействие поступающих кислот с солями сильных оснований и слабых органических кислот, при котором происходит протонирование органических анионов этих кислот [1; 13]. В древесных парцеллах условия для формирования таких солей более благоприятные, чем в межкроновых пространствах, поскольку здесь в составе опада преобладает хвоя, богатая соединениями кальция [15; 16]. Установлено, что содержание обменного кальция в исследуемом горизонте почв древесных парцелл выше по сравнению с межкроновыми, где происходит частичная нейтрализация кислотности в органогенных горизонтах почв древесных парцелл обменными основаниями [2].

В дефолирующих лесах и техногенных редколесьях (данные 2007 г.) наблюдалось уменьшение актуальной кислотности почв в межкроновых пространствах ( $U_{4,24} = 9,6$ ,  $p < 0,05$ ). Напротив, на стадии начальной дефолиации лесных древостоев, произрастающих на расстоянии 100 км от комбината, кислотность органогенного горизонта еловой парцеллы повышалась ( $U_{4,43} = 14,7$ ,  $p < 0,006$ ). Данная стадия характеризуется интенсивным опадением высоковозрастной хвои и постепенным выпадением зеленых мхов. Последние, как известно, являются доминантом напочвенного покрова ельников в природных условиях [1]. Исследования характера трансформации растительных остатков, локализованных на поверхности подзолистых почв, показали, что из свежего растительного опада в раствор продуцируется в 4 раза больше углерода водорастворимых органических соединений, чем из гумифицированных остатков [17], что может являться причиной статистически значимого повышения актуальной кислотности почвы на данной стадии трансформации.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что верхний органогенный горизонт Al-Fe гумусовых подзолов в условиях атмосферного загрязнения обладал или меньшей кислотностью (межкroновое

<sup>1</sup> Классификация почв России. М. : Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 1997. 235 с.

пространство) или достоверно не изменялся (подкروновое пространство) по сравнению с почвами ненарушенных северотаежных лесов. Исключение составляла стадия начальной дефолиации крон хвойных деревьев, на которой органогенный горизонт почв еловой парцеллы более кислый, по сравнению с почвами ненарушенных фитоценозов ( $H_{8,8} = 8,5$ ,  $p < 0,01$ ).

Сравнительный анализ двух периодов исследования показал, что в 2007 г. произошло увеличение актуальной кислотности верхнего горизонта почв подкроновых пространств на стадии начальной дефолиации ( $H_{3,8} = 0$ ,  $p < 0,01$ ) и дефолирующих лесов ( $H_{3,10} = 3$ ,  $p < 0,04$ ) (табл. 1). Повышение кислотности органогенных почв может быть обусловлено интенсификацией биогенного кислотообразования за счет увеличения количества растительного опада, поступающего в результате дефолиации крон хвойных деревьев, а также отмирания зеленых мхов и лишайников.

Таблица 1. Динамика кислотности органогенного горизонта почв в процессе техногенной дигрессии еловых лесов

Table 1. Dynamics of acidity of organic soil horizon in the process of technogenic digression of spruce forests

Расстояние от источника загрязнения, км/год исследования	Актуальная кислотность, рН	Гидролитическая кислотность, Нг, мг экв/100 г	Обменная кислотность, ОК, мг экв/100 г	Обменный алюминий, $Al_{обм.}$ , мг экв/100 г	Обменный водород, ОН, мг экв/100 г	
Межкروновое пространство						
Фон						
167	1998	4,2 ± 0,1	147,2 ± 14,8	8,7 ± 1,0	3,4 ± 0,7	5,3 ± 0,6
	2007	3,5 ± 0,1	157,5 ± 9,8	13,1 ± 1,2	8,3 ± 0,6	4,8 ± 1,0
Стадии техногенной дигрессии						
Начальная дефолиация						
100	1992	3,8 ± 0,1	147,6 ± 11,3	7,4 ± 0,5	3,9 ± 0,1	5,4 ± 1,6
	2007	3,9 ± 0,1	162,8 ± 6,2	84,5 ± 22,1	46,3 ± 12,6	38,2 ± 10,3
Дефолирующие леса						
31	1992	4,1 ± 0,1	180,3 ± 4,3	20,1 ± 0,9	13,5 ± 0,7	6,6 ± 0,3
	2007	3,9 ± 0,1	137,2 ± 2,8	14,3 ± 1,1	8,6 ± 1,2	5,7 ± 0,2
28	1992	3,9 ± 0,1	131,1 ± 2,4	15,5 ± 0,6	6,3 ± 1,2	9,2 ± 0,6
	2007	3,8 ± 0,1	116,0 ± 5,1	12,2 ± 0,3	6,9 ± 0,9	5,3 ± 0,26
Редколесье						
7	1992	3,9 ± 0,1	140,5 ± 10,4	14,8 ± 1,0	5,9 ± 0,4	8,9 ± 1,1
	2007	3,9 ± 0,2	126,4 ± 17,0	14,0 ± 1,6	9,5 ± 0,6	4,5 ± 1,8
Подкروновое пространство						
Фон						
167	2007	4,1 ± 0,2	152,8 ± 4,9	6,6 ± 0,6	2,3 ± 0,3	4,3 ± 0,6
Стадии техногенной дигрессии						
Начальная дефолиация						
100	1992	4,0 ± 0,0	163,5 ± 0,8	7,1 ± 0,8	2,8 ± 0,3	4,3 ± 0,6
	2007	3,6 ± 0,1	163,1 ± 3,8	94,5 ± 18,6	41,2 ± 9,0	53,2 ± 11,8
Дефолирующие леса						
31	1992	4,2 ± 0,1	186,8 ± 2,7	20,4 ± 4,3	12,6 ± 4,6	7,8 ± 0,6
	2007	3,9 ± 0,1	134,8 ± 3,5	13,7 ± 1,3	8,2 ± 1,4	5,4 ± 0,5
28	1992	3,6 ± 0,0	182,9 ± 3,8	19,5 ± 1,0	8,5 ± 1,1	11,1 ± 0,5
	2007	3,8 ± 0,0	143,6 ± 5,8	14,3 ± 0,9	8,3 ± 0,9	6,0 ± 0,3
Редколесье						
7	1992	4,0 ± 0,0	154,6 ± 7,0	21,2 ± 2,4	11,6 ± 1,2	9,6 ± 1,5
	2007	4,0 ± 0,1	117,8 ± 11,9	11,6 ± 2,9	8,7 ± 2,7	2,9 ± 0,5

Гидролитическая кислотность исследуемых почв межкроновых пространств колебалась от 122,3 до 180,2 мг экв/100 г в фоновых условиях, в дефолирующих лесах – от 98,5 до 189,5, в техногенном редколесье – от 106,8 до 160,6. В подкроновых пространствах данный показатель изменялся от 136,5 до 174,4 мг экв/100 г в почвах фоновых лесов, от 114,3 до 190,1 – в дефолирующих лесах, от 86,7 до 170,8 – в редколесье. На всех стадиях деградационной сукцессии гидролитическая кислотность почв снижалась ( $U_{3,30} = 17,1$ ,  $p < 0,001$ ), за исключением стадии начальной дефолиации, где данный показатель сопоставим с фоном. Кроме того, на данной стадии развития фитоценоза в органогенном горизонте почв отмечалось наиболее высокое содержание обменного алюминия ( $H_{8,8} = 0$ ,  $p < 0,001$ ) и водорода ( $H_{8,8} = 1$ ,

$p < 0,001$ ). Снижение гидролитической кислотности изучаемых почв может быть обусловлено уменьшением содержания органического вещества вследствие нарушения растительного покрова и прекращения поступления свежего растительного опада, а также развитием эрозионных процессов и изменением гидрологического режима почв и ландшафтов [18].

За исследованный период гидролитическая кислотность снизилась в почвах межкروновых ( $H_{3,10} = 0$ ,  $p < 0,01$ ) и подкروновых ( $H_{3,10} = 0$ ,  $p < 0,01$ ) пространств дефолирующих лесов. На стадии начальной дефоляции и еловом редколесье значения гидролитической кислотности сопоставимы по двум периодам исследования.

*Обменная кислотность* органогенного горизонта почв межкроновых пространств в фоновом ельнике кустарничково-зеленомошном варьировала от 6,8 до 16,4 мг экв/100 г, в дефолирующих лесах – 9,9–21,6, в техногенных редколесьях – 11,7–21,6. В подкроновых пространствах данный показатель изменялся от 3,1 до 8,5 мг экв/100 г в почвах фоновых лесов, от 7,3 до 27,5 – в дефолирующих лесах, от 4,1 до 25,3 – в редколесье. На начальной стадии дефоляции обменная кислотность варьировала в широких пределах, изменяясь в межкроновых пространствах от 3,9 до 141,4 мг экв/100 г, подкроновых – от 5,5 до 145,8. Сравнительный анализ свойств почв двух периодов наблюдений показал, что на начальной стадии техногенной дигрессии древостоя достоверно увеличилась обменная кислотность верхнего горизонта почв в 2007 г. как в межкроновых ( $H_{2,6} = 0$ ,  $p < 0,05$ ), так и подкроновых пространствах ( $H_{3,8} = 0$ ,  $p < 0,01$ ) (табл. 1). Это указывает на интенсификацию процессов биогенного кислотообразования в почвах, находившихся на более ранних этапах постаэротехногенного загрязнения. В дефолирующих лесах (28 и 31 км от источника выбросов) уровень обменной кислотности достоверно ( $p < 0,05$ ) снизился за исследуемый период.

**Сосновые леса.** За период исследования *актуальная кислотность* органогенных горизонтов почв межкроновых пространств фоновых сосняков лишайниково-зеленомошных варьировала от 3,3 до 4,1, в дефолирующих лесах – от 3,6 до 4,2 и техногенном редколесье – от 4,0 до 4,5 рН. В подкроновых пространствах актуальная кислотность почв в фоновых условиях варьировала от 3,1 до 4,1. В дефолирующих лесах рН изменялась в широком диапазоне от 3,4 до 5,8. В техногенном редколесье показатель рН варьировал незначительно и составлял от 4,2 до 4,4.

По градиенту промышленного загрязнения наблюдалось снижение актуальной кислотности почв в межкроновых ( $U_{3,16} = 13,4$ ,  $p < 0,004$ ) и подкроновых пространствах ( $U_{3,30} = 21,9$ ,  $p < 0,0001$ ) в 2007 г. Существенное снижение кислотности почв в техногенном редколесье, особенно в межкроновых пространствах, связано с резким уменьшением содержания органического вещества на данной стадии техногенной дигрессии древостоя. Об этом свидетельствует уменьшение гидролитической кислотности ( $U_{3,16} = 12,2$ ,  $p < 0,007$ ) и концентрации обменного водорода ( $U_{3,16} = 9,8$ ,  $p < 0,02$ ) в межкроновых пространствах почв, расположенных по градиенту атмосферного загрязнения (табл. 2). Сходные пространственные изменения кислотно-щелочных свойств были отмечены для верхнего горизонта почв подкронового пространства ( $p < 0,05$ ). Эта тенденция обусловлена составом и характером трансформации растительных остатков, локализованных на поверхности подзолистых почв антропогенно нарушенных экосистем. Возрастание кислотности почв может быть связано также с изменением конфигурационного состояния молекул специфических гумусовых кислот под влиянием кислых осадков, при котором становятся активными дополнительные кислотные центры [19]. В органогенном горизонте почвы сосновых парцелл при приближении к источнику загрязнения отмечалось повышение концентрации обменного алюминия ( $U_{3,30} = 19,41$ ,  $p < 0,0002$ ).

Статистически значимые различия значений кислотности почв были выявлены между двумя периодами исследований (1992 и 2007 гг.) в фоновых и дефолирующих (31 км от источника загрязнения) лесах. В 2007 г. в дефолирующих лесах увеличилась актуальная кислотность почв межкроновых ( $H_{3,6} = 0$ ,  $p < 0,02$ ) и подкроновых пространств ( $H_{3,10} = 3$ ,  $p < 0,04$ ); сходные закономерности также обнаружены для почв ненарушенных фитоценозов (табл. 2). В сосновом редколесье изменений в кислотности почв по сравнению с предыдущим периодом исследования не произошло.

*Гидролитическая кислотность* органогенного горизонта почв межкроновых пространств изменялась от 152,3 до 191,5 мг экв/100 г в фоновых условиях, в дефолирующих лесах – от 89,6 до 159,4, в техногенном редколесье – от 71,7 до 151,1. В подкроновых пространствах данный показатель варьировал от 112,2 до 192,9 мг экв/100 г в почвах фоновых лесов, от 101,4 до 175,9 – в дефолирующих лесах, от 86,3 до 165,5 – в редколесье. За исследованный период гидролитическая кислотность почв межкроновых и подкроновых пространств достоверно ( $p < 0,05$ ) увеличилась на всех стадиях техногенной дигрессии экосистемы.

*Обменная кислотность* почв межкроновых пространств в фоновом сосняке лишайниково-кустарничковом варьировала от 8,7 до 18,3 мг экв/100 г, в дефолирующих лесах – от 10,5 до 17,2, в техногенных редколесьях – от 7,6 до 16,8. В подкроновых пространствах обменная кислотность варьировала в фоновых условиях от 8,1 до 15,9, в дефолирующих лесах – от 8,1 до 16,0, в техногенных редколесьях – от 6,3 до 12,6 мг экв/100 г. Сравнительный анализ двух периодов исследований показал, что в 2007 г. в межкроновых пространствах сосновых и еловых лесов снизилась обменная кислотность изучаемых горизонтов почв, расположенных на расстоянии 31 км от комбината ( $H_{6,5} = 2$ ,  $p < 0,02$ ) (табл. 2).

Таблица 2. Динамика кислотности органогенного горизонта почв в процессе техногенной дигрессии сосновых лесов  
Table 2. Dynamics of acidity of the organic horizon of the soil in the process of technogenic digression of pine forests

Расстояние от источника загрязнения, км/год исследования		Актуальная кислотность, рН	Гидролитическая кислотность, Нг, мг экв/100 г	Обменная кислотность, ОК, мг экв/100 г	Обменный алюминий, Al <sub>обм.</sub> , мг экв/100 г	Обменный водород, ОН, мг экв/100 г
Межкروновое пространство						
Фон						
175	1998	4,1 ± 0,3	162,4 ± 9,6	10,8 ± 1,5	4,8 ± 1,0	6,0 ± 0,8
	2007	3,4 ± 0,0	186,9 ± 2,3	13,0 ± 1,4	6,0 ± 1,0	7,0 ± 0,5
Стадии техногенной дигрессии						
Дефолирующие леса						
48	1992	3,9 ± 0,1	107,9 ± 6,8	13,6 ± 0,8	7,4 ± 0,5	7,1 ± 2,0
	2007	3,8 ± 0,1	149,4 ± 10,0	13,7 ± 0,6	7,4 ± 0,4	6,2 ± 1,1
31	1992	4,1 ± 0,1	126,6 ± 5,0	14,2 ± 0,9	7,1 ± 0,6	7,1 ± 0,7
	2007	3,7 ± 0,1	149,1 ± 3,6	11,4 ± 0,4	5,9 ± 0,6	5,5 ± 0,6
Редколесье						
10	1992	4,5 ± 0,1	84,6 ± 3,1	10,7 ± 0,8	6,9 ± 0,6	3,8 ± 0,4
	2007	4,3 ± 0,1	129,1 ± 8,4	9,7 ± 1,3	7,2 ± 1,0	2,5 ± 0,6
Подкروновое пространство						
Фон						
175	1998	3,6 ± 0,3	193,3 ± 6,0	14,6 ± 1,0	4,6 ± 0,6	10,1 ± 1,5
	2007	3,3 ± 0,0	180,9 ± 5,0	12,2 ± 0,5	5,1 ± 0,6	7,1 ± 0,5
Стадии техногенной дигрессии						
Дефолирующие леса						
48	1992	4,1 ± 0,1	105,4 ± 9,6	12,4 ± 1,2	6,8 ± 0,6	5,7 ± 0,5
	2007	4,1 ± 0,4	154,2 ± 10,9	11,9 ± 0,9	5,2 ± 0,5	6,7 ± 0,6
31	1992	4,2 ± 0,1	105,2 ± 3,2	10,3 ± 0,3	5,2 ± 0,3	5,1 ± 0,1
	2007	3,9 ± 0,0	142,0 ± 6,0	10,4 ± 0,8	6,5 ± 0,7	3,9 ± 0,3
Редколесье						
10	1992	4,0 ± 0,1	92,4 ± 3,3	12,3 ± 0,4	6,7 ± 0,4	5,6 ± 0,1
	2007	4,2 ± 0,1	141,8 ± 8,8	12,8 ± 1,3	8,4 ± 0,8	4,4 ± 0,6

### Заключение

В настоящее время в результате промышленной деятельности горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий на значительной по площади территории Мурманской области наблюдается деградация лесных почв. Для оценки состояния почв северотаежных лесов изучена пространственно-временная динамика кислотности органогенного горизонта почв еловых и сосновых лесов, подверженных долговременному аэротехногенному воздействию со стороны медно-никелевого металлургического комбината "Североникель". Показано, что верхний органогенный горизонт Al-Fe гумусовых подзолов в условиях атмосферного загрязнения обладает или меньшей кислотностью или достоверно не изменяется по сравнению с почвами ненарушенных северотаежных лесов. Установлено, что в процессе техногенной дигрессии сосновых лесов снижается актуальная и гидролитическая кислотность почв межкрупных и подкрупных пространств. В древесных парцеллах возрастает содержание обменного алюминия. В процессе техногенной дигрессии еловых лесов актуальная кислотность верхнего горизонта почв снижается только в межкрупных пространствах. В органогенном горизонте почв древесных парцелл существуют эффективные механизмы нейтрализации кислотности обменными основаниями, так как в составе опада преобладает хвоя, обогащенная кальцием.

Парцеллярные различия обнаружены в фоновом ельнике кустарничково-зеленомошном, где актуальная кислотность почв древесных парцелл ниже, чем межкрупных. В условиях аэротехногенного загрязнения средние значения кислотности органогенных горизонтов почв подкрупных пространств сопоставимы с почвами межкрупных микрогруппировок как в еловых, так и в сосновых лесах.

На фоне сокращения атмосферных выбросов в сосновых дефолирующих лесах отмечено увеличение актуальной кислотности органогенного горизонта почв межкрупных и подкрупных пространств. В техногенных редколесьях изменений рН по сравнению с предыдущим периодом исследования не выявлено. Показано, что за исследованный период гидролитическая кислотность достоверно возрастает на всех стадиях техногенной

дигрессии сосновых лесов, а уровень обменной кислотности снижается только в органогенном горизонте почв межкрупных пространств дефолирующих лесов. В еловых лесах, подверженных атмосферному загрязнению, выявлено снижение уровней гидролитической и обменной кислотности почв, за исключением стадии начальной дефолиации лесов. На стадии начальной дефолиации крон хвойных деревьев зафиксировано увеличение кислотности органогенного горизонта почв еловой парцеллы. Причиной статистически значимого повышения актуальной кислотности почв на данной стадии антропогенной трансформации может являться интенсивное опадание высоковозрастной хвои и постепенное исчезновение из фитоценоза зеленых мхов – доминантов напочвенного покрова ельников. В 2007 г. выявлено значительное возрастание обменной кислотности, содержания обменного алюминия и водорода, что указывает на интенсификацию процессов биогенного кислотообразования в почвах, находящихся на данном этапе развития древостоя.

Несмотря на то что антропогенный пресс на лесные экосистемы снизился, достигнутое к настоящему времени сокращение выбросов загрязняющих веществ недостаточно для появления устойчивой тенденции к улучшению состояния почв. Это подтверждается оценкой пространственного и временного варьирования параметров кислотности органогенного горизонта почв антропогенно нарушенных сосняков кустарничково-лишайниковых и ельников кустарничково-зеленомошных, а также ранее выполненным анализом состояния доминирующих растений и лишайников на этих же объектах исследования [20; 21]. Предполагается, что дальнейшие регулярные стационарные наблюдения позволят дать объективную оценку состояния антропогенно нарушенных почв, оценить процессы, происходящие в лесных экосистемах, расположенных в зоне влияния горно-металлургических комбинатов региона.

### Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории наземных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН: зав. лабораторией, канд. с.-х. наук, доценту Л. Г. Исаевой, инженеру Е. А. Беловой за организацию и помощь в проведении полевых работ, а также вед. инженеру Г. Н. Андреевой за выполнение химических анализов.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания по теме № 0233-2015-0004 "Динамика восстановления биоразнообразия и функций наземных экосистем Субарктики в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов".

### Библиографический список

1. Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги = Nutrient status of north taiga forests : природные и техногенные аспекты / под ред. Л. О. Карпачевского. Апатиты : КНЦ РАН, 1998. 316 с.
2. Кислотные осадки и лесные почвы = Acidic deposition and forest soils / под ред. В. В. Никонова, Г. Н. Копчик. Апатиты : КНЦ РАН, 1999. 320 с.
3. Копчик Г. Н., Копчик С. В., Венн К., Омрид Д., Странд Л. [и др]. Изменение кислотности и катионообменных свойств лесных почв под воздействием атмосферных кислотных выпадений // Почвоведение. 1999. № 7. С. 873–884.
4. Кашулина Г. М., Переверзев В. Н., Литвинова Т. И. Трансформация органического вещества почв в условиях экстремального загрязнения выбросами комбината "Североникель", Кольский полуостров // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1265–1275.
5. Федорев Н. Г., Солодовников А. Н. Воздействие эмиссий Костомукшского горно-обогатительного комбината на лесные подстилки сосняков в северотаежной подзоне Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 6. С. 143–152.
6. Лянгузова И. В. Тяжелые металлы в северотаежных экосистемах России. Пространственно-временная динамика при аэротехногенном загрязнении. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 269 с.
7. Медведева М. В., Яковлев А. С. Изменение биохимических показателей почв в зоне влияния Костомукшского горнообогатительного комбината // Почвоведение. 2011. № 2. С. 233–239.
8. Derome J., Myking T., Aarrestad P., Isaeva L., Paatero J. [et al.]. Current state of terrestrial ecosystems in the joint Norwegian, Russian and Finish border area in Northern Fennoscandia. Helsinki : Finish Forest Research Institute, 2008. 98 p.
9. Myking T., Aarrestad P., Derome J., Bakkestuen V., Bjerke J. W. [et al.]. Effects of air pollution from a nickel-copper industrial complex on boreal forest vegetation in the joint Russian-Norwegian-Finnish border area // Boreal Environment Research. 2009. V. 14, N 2. P. 279–296.
10. Переверзев В. Н. Почвообразование в лесной зоне Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. 2011. № 2. С. 74–82.
11. Переверзев В. Н. Зональные особенности альфагумусового почвообразования на моренных породах Кольского полуострова // Почвоведение. 2007. № 1. С. 5–11.



12. Александрова Л. Н., Найденова О. Ф. Лабораторно-практические занятия по почвоведению. 3-е изд., перераб. и доп. Л. : Колос, 1976. 280 с.
13. Лукина Н. В., Сухарева Т. А., Исаева Л. Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах = Pollution-induced digressions and rehabilitation successions in Northern taiga forests. М. : Наука, 2005. 245 с.
14. Сухарева Т. А., Лукина Н. В. Минеральный состав ассимилирующих органов хвойных деревьев после снижения уровня атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Экология. 2014. № 2. С. 97–104.
15. Казимиров Н. И., Морозова Р. М. Биологический круговорот веществ в ельниках Карелии. Л. : Наука, 1973. 174 с.
16. Манакон К. Н., Никонов В. В. Биологический круговорот минеральных элементов и почвообразование в ельниках Крайнего Севера. Л. : Наука, 1981. 196 с.
17. Яшин И. М., Кауричев И. С. Особенности процессов глее- и подзолообразования в почвах таежных экосистем // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1996. № 1. С. 79–98.
18. Кашулина Г. М., Кубрак А. Н., Коробейникова Н. М. Кислотность почв в окрестностях медно-никелевого комбината "Североникель", Кольский полуостров // Почвоведение. 2015. № 4. С. 486–500.
19. Соколова Т. А., Толпеша И. И., Трофимов С. Я. Почвенная кислотность. Кислотно-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и почвенном растворе. Тула : Гриф и К, 2012. 124 с.
20. Сухарева Т. А. Оценка состояния сосновых лесов в зоне влияния медно-никелевых комбинатов при уменьшении эмиссионной нагрузки // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 3 (3). С. 1072–1076.
21. Сухарева Т. А. Элементный состав талломов лишайника *Cladonia stellaris* в условиях атмосферного загрязнения // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 4. С. 70–82.

## References

1. Lukina N. V., Nikonov V. V. Pitatelnyi rezhim lesov severnoy taygi = Nutrient status of north taiga forests : prirodnye i tehnogennye aspekty / pod red. L. O. Karpachevskogo. Apatity : KNTs RAN, 1998. 316 p.
2. Kislotnye osadki i lesnye pochvy = Acidic deposition and forest soils / pod red. V. V. Nikonova, G. N. Koptsik. Apatity : KNTs RAN, 1999. 320 p.
3. Koptsik G. N., Koptsik S. V., Venn K., Omlid D., Strand L. [i dr]. Izmenenie kislotnosti i kationoobmennyykh svoystv lesnykh pochv pod vozdeystviem atmosferykh kislotnykh vypadeniy [The change in the acidity and cation exchange properties of forest soils under atmospheric acid deposition] // Pochvovedenie. 1999. N 7. P. 873–884.
4. Kashulina G. M., Pereverzev V. N., Litvinova T. I. Transformatsiya organicheskogo veshchestva pochv v usloviyakh ekstremalnogo zagryazneniya vybrosami kombinata "Severonikel", Kolskiy poluostrov [Transformation of soil organic matter under conditions of extreme pollution by emissions of the plant "Severonikel", the Kola Peninsula] // Pochvovedenie. 2010. N 10. P. 1265–1275.
5. Fedorets N. G., Solodovnikov A. N. Vozdeystvie emissiy Kostomukshskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata na lesnye podstilki sosnyakov v severotaezhnoy podzone Karelii [The impact of emissions of the Kostomuksha mining and processing plant on the forest floor of pine forests in the Northern taiga subzone of Karelia] // Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. 2013. N 6. P. 143–152.
6. Lyanguzova I. V. Tyazhelye metally v severotaezhnykh ekosistemah Rossii. Prostranstvenno-vremennaya dinamika pri aerotehnogennom zagryaznenii [Heavy metals in north taiga ecosystems of Russia. Space-time dynamics in aerotechnogenic pollution]. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 269 p.
7. Medvedeva M. V., Yakovlev A. S. Izmenenie biohimicheskikh pokazateley pochv v zone vliyaniya Kostomukshskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata [Changes in the biochemical characteristics of soils in the impact zone of the Kostomuksha ore-dressing enterprise] // Pochvovedenie. 2011. N 2. P. 233–239.
8. Derome J., Myking T., Aarrestad P., Isaeva L., Paatero J. [et al.]. Current state of terrestrial ecosystems in the joint Norwegian, Russian and Finish border area in Northern Fennoscandia. Helsinki : Finish Forest Research Institute, 2008. 98 p.
9. Myking T., Aarrestad P., Derome J., Bakkestuen V., Bjerke J. W. [et al.]. Effects of air pollution from a nickel-copper industrial complex on boreal forest vegetation in the joint Russian-Norwegian-Finnish border area // Boreal Environment Research. 2009. V. 14, N 2. P. 279–296.
10. Pereverzev V. N. Pochvoobrazovanie v lesnoy zone Kolskogo poluostrova [Soil formation in the forest zone of the Kola Peninsula] // Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2011. N 2. P. 74–82.
11. Pereverzev V. N. Zonalnye osobennosti alfavagumusovogo pochvoobrazovaniya na morennykh porodakh Kolskogo poluostrova [Zonal peculiarities of alpha humus soil formation on the moraine rocks of the Kola Peninsula] // Pochvovedenie. 2007. N 1. P. 5–11.



12. Aleksandrova L. N., Naydenova O. F. Laboratorno-prakticheskie zanyatiya po pochvovedeniyu [Laboratory and practical classes on soil science]. 3-e izd., pererab. i dop. L. : Kolos, 1976. 280 p.
13. Lukina N. V., Suhareva T. A., Isaeva L. G. Tehnogennyye digressii i vosstanovitelnye suksessii v severotaezhnykh lesah = Pollution-induced digressions and rehabilitation successions in Northern taiga forests. M. : Nauka, 2005. 245 p.
14. Suhareva T. A., Lukina N. V. Mineralnyi sostav assimiliruyuschih organov hvoynyh derezev posle snizheniya urovnya atmosfernogo zagryazneniya na Kolskom poluostrove [The mineral composition of assimilating organs of pine trees after reducing the atmospheric pollution in the Kola Peninsula] // Ekologiya. 2014. N 2. P. 97–104.
15. Kazimirov N. I., Morozova P. M. Biologicheskii krugovorot veshchestv v elnikah Karelii [Biological cycle of matter in spruce forests of Karelia]. L. : Nauka, 1973. 174 p.
16. Manakov K. N., Nikonov V. V. Biologicheskii krugovorot mineralnykh elementov i pochvoobrazovanie v elnikah Kraynego Severa [Biological cycle of mineral elements and soil formation in the spruce forests of the Far North]. L. : Nauka, 1981. 196 p.
17. Yashin I. M., Kaurichev I. S. Osobennosti protsessov glee- i podzoloobrazovaniya v pochvah taezhnykh ekosistem [Features of gley and podzolic soils in taiga ecosystems] // Izvestiya Timiryazevskoy selskokozyaystvennoy akademii. 1996. N 1. P. 79–98.
18. Kashulina G. M., Kubrak A. N., Korobeynikova N. M. Kislotnost pochv v okrestnostyakh medno-nikelevogo kombinata "Severonikel", Kolskiy poluostrov [The acidity of the soil in the vicinity of the copper-nickel smelter "Severonikel" on the Kola Peninsula] // Pochvovedenie. 2015. N 4. P. 486–500.
19. Sokolova T. A., Tolpesha I. I., Trofimov S. Ya. Pochvennaya kislotnost. Kislотно-osnovnaya bufernost pochv. Soedineniya alyuminiya v tverдой faze pochvy i pochvennom rastvore [Soil acidity. Acid-base buffering of soils. Aluminum compounds in the solid phase of soil and soil solution]. Tula : Grif i K, 2012. 124 p.
20. Suhareva T. A. Otsenka sostoyaniya osnovnykh lesov v zone vliyaniya medno-nikelevykh kombinatov pri umenshenii emissionnoy nagruzki [Assessment of the status of the pine forests under influence of copper-nickel smelters by decreasing emission loads] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. 2013. V. 15, N 3 (3). P. 1072–1076.
21. Suhareva T. A. Elementnyi sostav tallomov lishaynika *Cladonia stellaris* v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya [Elemental composition of thalli of lichen *Cladonia stellaris* under air pollution] // Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. 2016. N 4. P. 70–82.

#### Сведения об авторе

**Сухарева Татьяна Алексеевна** – мкр Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: suhareva@inep.ksc.ru

**Suhareva T. A.** – 14a, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. of Biol. Sci., Senior Researcher, e-mail: suhareva@inep.ksc.ru

T. A. Sukhareva

### **Spatial-temporal variability of soils' acidity of Northern taiga forests at lower technogenic load**

The condition of soil under the influence of airpollutions copper-nickel smelter "Severonickel" (Monchegorsk, the Murmansk region) have been analyzed. The spatial-temporal dynamics of acidity of Al-Fe podzolic organic soil horizon in the process of technogenic digression of spruce and pine forests has been performed. The studies conducted in 1992 and 2007 on fixed sample plots at different distances from the emission source. Parcellary differences have been found in background spruce forest, where the actual acidity of organic soil horizon spruce parcels is lower than between crown space. Under air pollution parcellary differences of soil acidity are not expressed. In the pine forests the spatial dynamics is characterized by reduced actual and hydrolytic acidity of the organic horizon and the growing exchange of aluminium along a gradient of atmospheric pollution. In defoliating spruce forests and sparse forests the actual soil acidity reduction is observed only in between crown spaces, and hydrolytic soil acidity – in both parcels. The stage of initial defoliation of the crowns of coniferous trees, most remote from the source of emission of pollutants is identified. At this stage, the organogenic horizon of the spruce soils is more acidic than in the undisturbed phytocenosis, and the hydrolytic acidity of the soils remains at the background level. Under the reduction of atmospheric emissions soil acidity decreased in defoliating forests in 2007. In the immediate vicinity of the smelter (7–10 km) soil pH has not changed during the study period. In the pine defoliating forests and sparse forests hydrolytic soil acidity has increased. In spruce forests under atmospheric pollution, the level of hydrolytic and exchange acidity has decreased, with the exception of the stages of initial defoliation of North taiga forests. The exchange soil acidity, the content of the exchange of aluminium and exchange of hydrogen reliably increase at this stage of forest digression. The results of the research can be used in monitoring environment, assessing soil fertility of forest ecosystems under the influence of natural and technogenic factors and contribute to the development of methods of disturbed soils' rehabilitation.

**Key words:** copper-nickel smelter, air pollution, boreal forests, north taiga subzone, podzols, organogenic soil horizon, soil acidity.