

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ. БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 630*424.5:581.52: 504.5

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОЧВЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЁЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ НА НАПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ СОСНЯКА ЛИШАЙНИКОВО-ЗЕЛЕНОМОШНОГО В УСЛОВИЯХ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

И. В. Лянгузова, В. В. Горшков, И. Ю. Баккал, М. С. Бондаренко

Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук,
Российская Федерация, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 2
E-mail: I.Lyanguzova@binran.ru

В условиях полевого эксперимента по влиянию полиметаллической пыли, выбрасываемой в атмосферу комбинатом «Североникель» (г. Мончегорск, Кольский полуостров), на компоненты лесных экосистем северной тайги было исследовано состояние и видовое разнообразие нижних ярусов лишайниково-зеленомошного соснового леса (давность последнего пожара 80 лет), а также изучена миграция Ni, Cu, Co из загрязнённой почвы в наземные части доминирующих видов растений и лишайников. Установлено, что видовое разнообразие травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов не изменяется в интервале индекса техногенной нагрузки 2,0–45,5 отн. ед. Однако параметры почвенного покрова в большей или меньшей степени изменены под воздействием тяжёлых металлов, а его послепожарное восстановление заторможено.

Ключевые слова: лесные экосистемы; тяжёлые металлы; загрязнение окружающей среды; почвенный покров; полевые эксперименты; Кольский полуостров.

Введение. Кольский полуостров, площадь которого составляет около 150 тыс. км², занимает крайний северо-запад Европейской части России, располагаясь почти полностью за Полярным кругом. Биогеоценозы Кольского полуострова испытывают воздействие двойного стресса: с одной стороны, суровые климатические условия Крайнего Севера, с другой – аэротехногенное загрязнение окружающей среды.

Своеобразные природные условия, а также антропогенная деятельность (рубки, пожары, атмосферное загрязнение, открытая добыча полезных ископаемых и т.п.) определили особенности организации растительных сообществ данного региона. Характерной чертой растительного покрова этой территории является чередование равнинных редкостойных лесов (занимающих 23 % площади) и болот с растительностью возвышенностей и горных массивов [1, 2].

© Лянгузова И. В., Горшков В. В., Баккал И. Ю., Бондаренко М. С., 2015.

Для цитирования: Лянгузова И. В., Горшков В. В., Баккал И. Ю., Бондаренко М. С. Воздействие почвенного загрязнения тяжёлыми металлами на почвенный покров сосняка лишайниково-зеленомошного в условиях полевого эксперимента // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 3 (27). – С. 74-86.

В современный период основными лесобразующими породами в равнинных лесах являются сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) и ель сибирская (*Picea obovata*). Берёза пушистая (*Betula pubescens*) встречается в составе еловых и сосновых лесов, а также образует производные сообщества. Сосновые сообщества занимают от 30 до 50 % территории, покрытой лесами, еловые формируют 33 % от общей лесопокрытой площади [2, 3]. Почвы в районе исследования представлены Al-Fe-гумусовыми подзолами, развитыми на ледниковых моренных песчаных отложениях [4].

Наиболее развитыми отраслями промышленности в Мурманской области являются горнодобывающая; цветная металлургия; рыбная промышленность; судоремонт [2]. Основным источником загрязнения природной среды центральной части Кольского полуострова является одно из главных предприятий ОАО «Норильский никель» – комбинат «Североникель» (г. Мончегорск), в состав атмосферных выбросов которого входят, в основном, диоксид серы и полиметаллическая пыль, содержащая тяжёлые металлы. На разных этапах технологического цикла в атмосферу поступает мелкодисперсная полиметаллическая пыль, содержащая смесь сульфидов и оксидов металлов: халькозина Cu_2S , халькопирита $CuFeS_2$, пирротина $Fe_7S_8(Ni_x)$, пентландита $(Ni, Fe)_9S_8$, ковеллина CuS , куприта Cu_2O , тенорита CuO , а также металлических никеля и меди [5]. Кроме соединений тяжёлых металлов, в металлургической пыли присутствуют оксиды железа, силикаты кальция, магния, алюминия. Тонкие фракции обогащены соединениями свинца, цинка и мышьяка [5, 6]. В зависимости от размера и массы частиц, направления и силы ветра, а также других метеорологических факторов, пыль, содержащая металлы, оседает на почву, кроны деревьев, кустарников и кустарничков; цветковые растения, мхи и лишайники; крыши зданий и др. В результате в зоне воздействия промышленных

предприятий нарушается нормальное функционирование лесных экосистем вплоть до полного их разрушения и деградации, при этом сокращается видовое биоразнообразие, снижается продуктивность древостоев, разрушается напочвенный покров, происходит эрозия почвы [7–13]. Поллютанты оказывают как прямое токсическое действие на растительные организмы, так и косвенное; эти воздействия приводят к нарушению минерального питания растений, накоплению повышенных концентраций тяжёлых металлов в их органах, а также к торможению роста и развития [7, 14–19]. Однако при проведении натурных исследований в биогеоценозах, подвергающихся аэротехногенному загрязнению, крайне трудно оценить степень воздействия на растения конкретных загрязнителей, выделить вклад каждого из них, а также разделить влияние газообразных токсических веществ, в первую очередь, диоксида серы, и твёрдых выпадений, включающих тяжёлые металлы. Наиболее адекватным подходом для решения указанной проблемы является постановка вегетационных и полевых экспериментов [20–23]. В связи с этим, при сотрудничестве с Лапландским государственным биосферным заповедником в 1992 году в средневозрастных сосновых лесах фонового района Кольского полуострова, где отсутствуют визуально наблюдаемые повреждения растений, был заложен полевой эксперимент по исследованию влияния полиметаллической пыли, выбрасываемой в атмосферу комбинатом «Североникель», на компоненты лесных экосистем.

Целью настоящей работы является оценка воздействия почвенного загрязнения полиметаллической пылью на состояние и видовое разнообразие напочвенного покрова сосняка лишайниково-зеленомошного, а также анализ миграции ионов никеля и меди из загрязнённого органического горизонта Al-Fe-гумусового подзола в надземные части доминирующих видов растений и лишайников.

Объекты и методика исследования.

В настоящей работе представлены результаты для одного экспериментального участка в сосняке лишайниково-зеленомошном, давность последнего пожара в котором составляет 80 лет. Древостой представлен сосной обыкновенной с примесью ели сибирской, средний возраст деревьев сосны составляет около 60 лет, средняя высота – 8,6 м, диаметр на высоте 1,3 м – 12,3 см. Травяно-кустарничковый ярус в основном сформирован кустарничками: *Vaccinium vitis-idaea*, *V. myrtillus*, *Calluna vulgaris*, *Empetrum hermaphroditum*, в сложении мохово-лишайникового яруса принимают участие виды родов *Cladina* и *Cladonia* и различные виды мохообразных, из которых доминирует *Pleurozium schreberi*.

За период 1992–1997 гг. на поверхность снежного покрова экспериментального участка площадью 0,06 га было вручную рассыпано 33,8 кг полиметаллической пыли, отобранной с электрофильтров цеха рудной плавки комбината «Североникель». Полиметаллическая пыль была распределена пространственно неравномерно, что привело к формированию участков с разной степенью нарушенности напочвенного покрова. В 2014 году на экспериментальном участке было заложено 50 учётных площадок размером 50x50 см (0,25 м²) по грациям проективного покрытия мохово-лишайникового яруса: 0–10 % (максимальная степень разрушения напочвенного покрова), 10–30 %, 30–60 %, 60–80 %, 80–100 % (ненарушенный напочвенный покров). На каждой учётной площадке было измерено проективное покрытие всех слагающих напочвенный покров видов сосудистых растений, лишайников и мхов, а также были отобраны образцы органогенного горизонта (подстилки) Al-Fe-гумусового подзола и надземных частей брусники (*Vaccinium vitis-idaea*), мохообразных (*Pleurozium schreberi*) и лишайников (*Cladina stellaris*).

Оценка изменения видового разнообразия травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов произведена по среднему числу видов на учётных площадках в пределах граций индекса техногенной нагрузки.

Определение содержания кислоторастворимых форм металлов в подстилке (вытяжка 1,0 н HCl) проводили методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии [24, 25]. Для оценки уровня загрязнения почвы тяжёлыми металлами рассчитывали индекс техногенной нагрузки (I_t), который представляет собой превышение суммарного содержания кислоторастворимых форм Ni, Cu и Co в подстилке над их суммарным фоновым содержанием, составляющим 16,2 мг/кг. Для удобства статистической обработки данных весь интервал индекса техногенной нагрузки был разбит на градации с шагом 5 отн. ед.

Образцы растительного материала (листья брусники, живые и отмершие части мха и лишайника) озоляли в муфельной печи при температуре 450°C, золу растворяли в 2,0 н HCl и в растворе определяли содержание Ni, Cu и Co методом атомно-абсорбционной спектрометрии в трёхкратной повторности [25].

Математическую обработку данных проводили в статистических пакетах программ с использованием описательной статистики, ANOVA, непараметрических методов и корреляционного анализа. Достоверность различий оценивали по критериям Фишера (F), Стьюдента (t) и Манна-Уитни (Z).

Результаты и их обсуждение. На учётных площадках экспериментального участка концентрации кислоторастворимых форм тяжёлых металлов в органогенном горизонте почвы варьируют: Ni – от 9,4 до 120 мг/кг, Cu – от 21,6 до 624 мг/кг, Co – от 1,0 до 8,4 мг/кг, а среднее содержание этих металлов в подстилке равно соответственно: Ni – 36,9±1,9, Cu – 214±14, Co – 3,2±0,1 мг/кг. Среднее значение индекса техногенной нагрузки на

экспериментальном участке равно 15,5 отн. ед., а интервал его варьирования составляет от 2,0 до 45,5 отн. ед., что соответствует суммарной концентрации кислоторастворимых форм Ni, Cu и Co в подстилке от 32,7 до 737 мг/кг.

На экспериментальном участке среднее число видов травяно-кустарничкового яруса варьирует от 2 до 6 видов. Наиболее часто встречаются кустарнички: *Vaccinium vitis-idaea* (встречаемость 100 %), *Calluna vulgaris* Hull (62 %), *Vaccinium myrtillus* (52 %), *Empetrum hermaphroditum* (42 %), встречаемость травянистых растений существенно меньше: *Avenella flexuosa* Drej. (35 %), *Luzula pilosa* Willd. (25 %), *Melampyrum pratense* (17 %). Среднее число видов травяно-кустарничкового яруса достоверно различается по градациям индекса техногенной нагрузки ($F=2,47$, $p=0,03$) (рис. 1), однако коэффициент корреляции между этими параметрами незначим ($r=0,08$, $p>0,05$), что свидетельствует об отсутствии однонаправленного изменения видового разнообразия травяно-кустарничкового яруса с увеличением уровня загрязнения почвы тяжёлыми металлами.

На экспериментальном участке среднее значение общего проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса составляет $15,1 \pm 1,4$ % (диапазон варьирования – 4,0–45,1 %), и оно достоверно не изменяется по градациям индекса техногенной нагрузки, так же, как и отсутствуют достоверные различия в проективном покрытии отдельных видов кустарничков ($F=0,53-1,18$, $p=0,38-0,78$). Отсутствие связи проективного покрытия яруса и отдельных видов кустарничков с уровнем загрязнения почвы тяжёлыми металлами подтверждено корреляционным анализом ($r=-0,26-0,08$, $p>0,05$).

Таким образом, в условиях полевого эксперимента общее проективное покрытие и среднее число видов травяно-кустарничкового яруса существенно не изменяются, при этом изменение всех исследуемых параметров не коррелирует с уровнем загрязнения почвы тяжёлыми металлами. Следовательно, можно заключить, что травяно-кустарничковый ярус лишайниково-зеленомошного сосняка устойчив к загрязнению почв тяжёлыми металлами в исследованном интервале индекса техногенной нагрузки (2,0–45,5 отн. ед.).

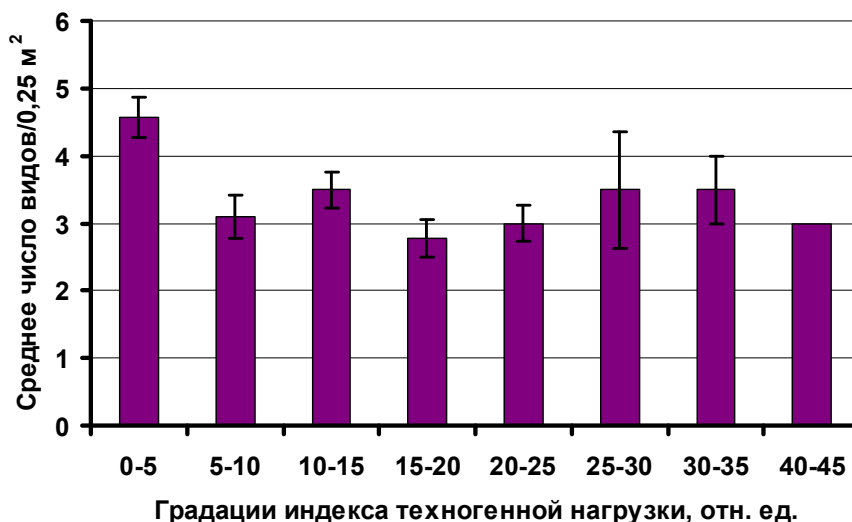


Рис. 1. Среднее число видов травяно-кустарничкового яруса на учётных площадках по градиенту уровня загрязнения почвы тяжёлыми металлами

Число видов мохово-лишайникового яруса на учётных площадках экспериментального участка в среднем составляет 10 и варьирует от 3 до 16, при этом по грациям индекса техногенной нагрузки регистрируются достоверные различия ($F=2,53$, $p=0,03$) (рис. 2), однако однонаправленного снижения среднего числа видов мохово-лишайникового яруса с увеличением уровня загрязнения почвы не выявлено, что подтверждается отсутствием корреляции между этими параметрами ($r=0,24$, $p>0,05$). В лишайниковом покрове абсолютно доминирует и по проективному покрытию, и по встречаемости *Cladina rangiferina* (встречаемость на учётных площадках 100 %). Другими доминирующими видами по встречаемости являются *Cl. mitis* (81 %), *Cl. stellaris* (38 %) и раннесукцессионные виды р. *Cladonia*, встречаемость которых варьирует от 44 % (*Cladonia deformis*) до 71 % (*Cladonia crispata*), но их проективное покрытие невелико, в основном, 0,01–3 %, и лишь у *Cladonia uncialis* оно может достигать 10 %. В моховом покрове наибольшей встречаемостью обладает *Pleurozium schreberi* (90 %) и виды р. *Dicranum* (65 %), а также *Pohlia nutans* (35 %).

Общее проективное покрытие мохово-лишайникового яруса на площадках с ненарушенным напочвенным покровом составляет в среднем 80 ± 2 %. С увеличением уровня загрязнения почвы тяжёлыми металлами наблюдается тенденция к снижению

общего покрытия яруса с 55 до 17 %, которая статистически не подтверждается (рис. 3). Различия в проективном покрытии яруса недостоверны вследствие очень значительного варьирования этого параметра по градиенту техногенной нагрузки, коэффициент вариации в большинстве случаев превышает 50 % (50–90 %). Корреляционный анализ данных не выявил значимой связи между общим проективным покрытием мохово-лишайникового яруса и индексом техногенной нагрузки ($r=-0,21$, $p>0,05$), что обусловлено существенным варьированием обоих параметров на учётных площадках.

Общее проективное покрытие лишайников на экспериментальном участке составляет в среднем 28 ± 3 %, варьирует в достаточно узких пределах 16–35 %, достоверно не различаясь с увеличением индекса техногенной нагрузки, и не связано с уровнем загрязнения почвы тяжёлыми металлами ($r=0,05$, $p>0,05$). В лишайниковом покрове наибольшее проективное покрытие отмечено у *Cladina rangiferina*, что характерно для данной стадии восстановительной сукцессии в лишайниково-зеленомошных сосновых лесах. На экспериментальном участке оно составляет в среднем $18,4 \pm 2,6$ %, интервал его варьирования достаточно узок 14,5–22,3 %, и средние значения этого показателя достоверно не различаются на площадках с разным уровнем загрязнения почвы тяжёлыми металлами ($F=0,20$, $p=0,98$).

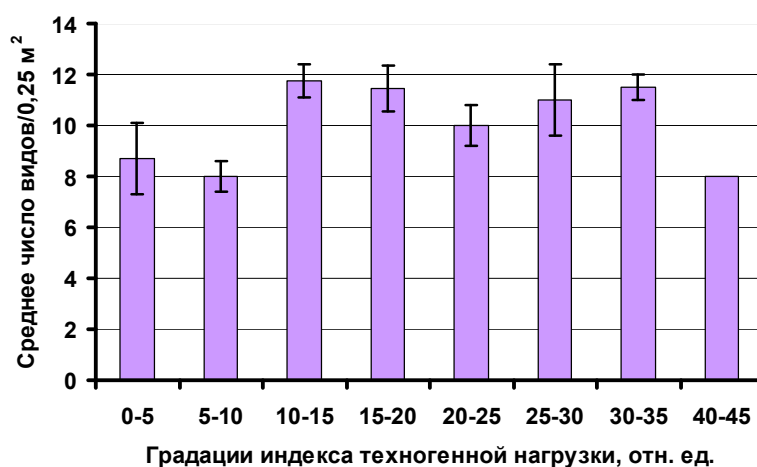


Рис. 2. Среднее число видов мхов и лишайников мохово-лишайникового яруса на учётных площадках по градиенту уровня загрязнения почвы тяжёлыми металлами

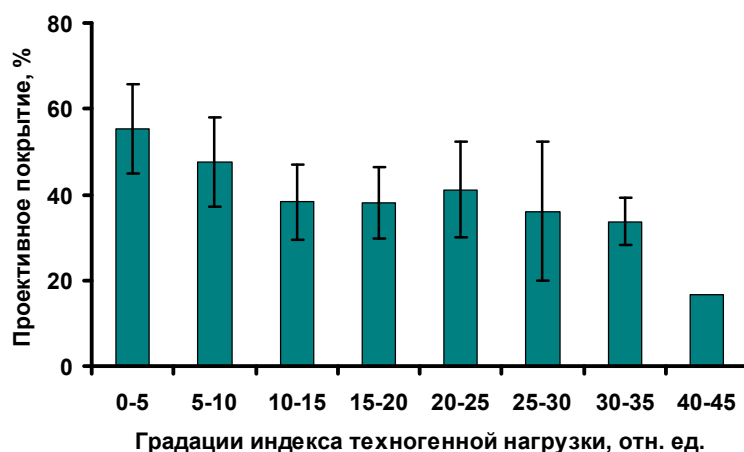


Рис. 3. Общее проективное покрытие мохово-лишайникового яруса по градиенту уровня загрязнения почвы тяжёлыми металлами

Следует особо остановиться на участии раннесукцессионных видов лишайников р. *Cladonia* в сложении мохово-лишайникового яруса на экспериментальном участке сосняка лишайниково-зеленомошного. Их проективное покрытие в среднем составляет $4,5 \pm 0,6$ %, с увеличением индекса техногенной нагрузки оно достоверно возрастает с 1,1 до 8,6 % ($F=3,56$, $p=0,004$) и значимо коррелирует с уровнем загрязнения почвы тяжёлыми металлами ($r=0,39$, $p=0,005$).

Общее проективное покрытие мохообразных на экспериментальном участке в среднем равно 14 ± 3 %, размах варьирования – от 0 до 87 %. Проективное покрытие мхов достоверно не различается по градациям индекса техногенной нагрузки ($F=1,44$, $p=0,22$) из-за значительного варьирования обоих показателей, при этом оно отрицательно связано с уровнем загрязнения почвы тяжёлыми металлами, правда, коэффициент корреляции невелик ($r=-0,30$, $p=0,04$). Из мохообразных наибольшее проективное покрытие имеет *Pleurozium schreberi*, которое в среднем составляет $13,1 \pm 3,6$ %, варьируя от 0 до 86 % и достоверно не различаясь на площадках с разным уровнем загрязнения почвы ($F=1,55$, $p=0,19$).

Таким образом, в условиях полевого эксперимента в сложении мохово-

лишайникового яруса участвуют от 3 до 16 видов, при этом число видов мхов и лишайников достоверно различается по градациям индекса техногенной нагрузки, но значимо не связано с уровнем загрязнения почвы. Общее проективное покрытие яруса существенно не изменяется в исследованном интервале индекса техногенной нагрузки (2,0–45,5 отн. ед.) вследствие высокой степени варьирования обоих параметров. Более благоприятный режим влагообеспеченности в лишайниково-зеленомошных сосновых лесах по сравнению с более сухими лишайниковыми сосняками, по-видимому, препятствует разрушению мохово-лишайникового яруса под воздействием загрязнения почвы тяжёлыми металлами. Однако возрастание доли участия раннесукцессионных видов р. *Cladonia* в лишайниковом покрове свидетельствует о нарушении структуры мохово-лишайникового яруса под воздействием загрязнения почвы тяжёлыми металлами.

В фоновых лишайниково-зеленомошных сосновых лесах при давности пожара 80 лет общее проективное покрытие травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов составляет в среднем 22 и 75 %, а проективное покрытие диагностических видов (*Pleurozium schreberi*) и групп видов (р. *Cladonia* и

р. *Cladonia*) – 33, 35 и 2,5 % соответственно [26]. Сопоставление этих данных и соответствующих средних значений на экспериментальном участке (15, 42, 13, 26 и 4,5 %) показывает, что последние практически во всех случаях меньше, за исключением проективного покрытия видов р. *Cladonia*.

Результаты химического анализа листьев брусники с экспериментального участка показали, что диапазон варьирования содержания тяжёлых металлов довольно узкий: Ni – 2,0–7,5; Cu – 1,5–5,9; Co – 0,02–0,2 мг/кг сух. в-ва, причём концентрации никеля достоверно больше меди ($t=2,49$, $p=0,014$; $Z=2,21$, $p=0,027$). Значимая связь между содержанием тяжёлых металлов в листьях кустарничка и подстилке выявлена только для Ni, однако коэффициент корреляции невелик ($r=0,29$, $p<0,05$). Отсутствие взаимосвязи между содержанием тяжёлых металлов в почве и листьях кустарничка, скорее всего, обусловлено биологическими особенностями данного вида. Брусника – вечнозелёный вегетативно подвижный кустарничек, относящийся к

явнополицентрическому типу биоморф [27]. В связи с этим площадь питания отдельных парциальных кустов брусники достаточно велика и вследствие пространственной неравномерности уровня загрязнения подстилки тяжёлыми металлами их накопление в ассимиляционных органах кустарничка весьма ограничено.

Содержание Ni и Cu в живых частях мха *Pleurozium schreberi* на учётных площадках варьирует в пределах 5,9–27,9 и 3,8–15,8 мг/кг сух. в-ва соответственно, а Co не превышает 1,3 мг/кг сух. в-ва, причём концентрации располагаются в ряду убывания: $Ni > Cu > Co$ (рис. 4). Содержание тяжёлых металлов в мёртвых частях мха достоверно больше по сравнению с таковым в живых частях [$t=-(2,10-4,54)$, $p=0,0001-0,039$; $Z=-(2,04-2,92)$, $p=0,003-0,04$] и в среднем составляет: Ni – $17,4 \pm 1,4$; Cu – $7,6 \pm 0,6$; Co – $0,9 \pm 0,1$ мг/кг сух. в-ва. Выявлены значимые связи между содержанием тяжёлых металлов в живых и мёртвых частях *Pl. schreberi* и концентрациями их кислоторастворимых форм в подстилке ($r=0,59-0,74$, $p<0,05$).

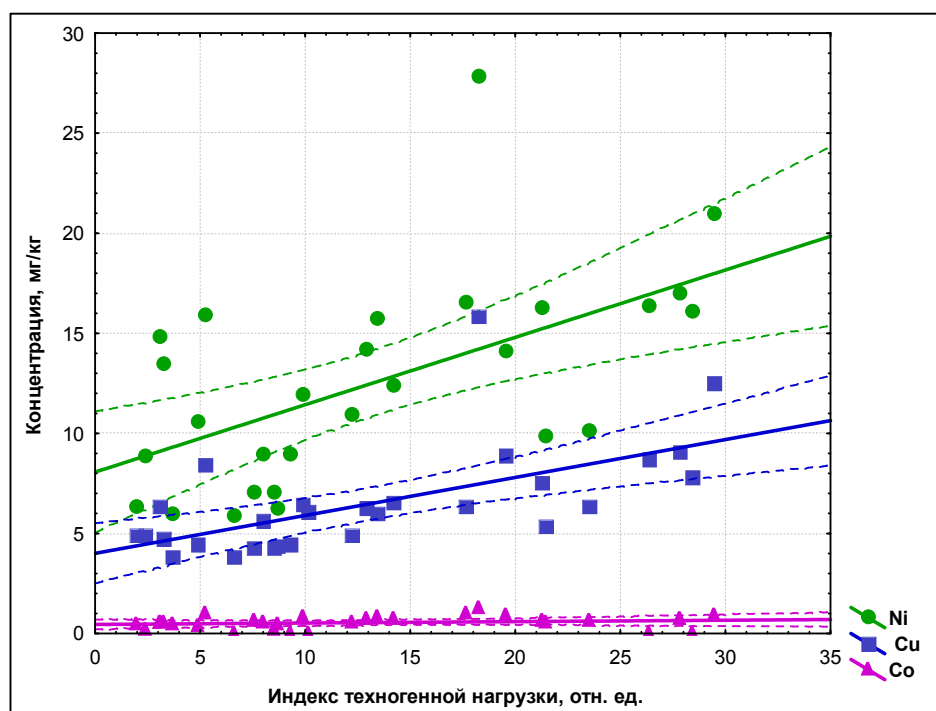


Рис. 4. Зависимость содержания никеля, меди и кобальта в живых частях мха *Pleurozium schreberi* от индекса техногенной нагрузки.

На территории экспериментального участка наименьшими интервалами варьирования содержания тяжёлых металлов характеризовался лишайник *Cladina stellaris*. В живых частях талломов концентрации варьировали в следующих пределах: Ni – 1,9–4,8; Cu – 1,2–3,9; Co – 0,1–1,4 мг/кг сух. в-ва. Содержание первых двух металлов в мёртвых частях было достоверно больше [$t=(4,36-5,05)$, $p=0,00003-0,0002$; $Z=(3,55-3,64)$, $p=0,003-0,004$] и в среднем составляло: Ni – $6,5 \pm 1,5$; Cu – $5,8 \pm 1,7$ мг/кг сух. в-ва, а концентрации Co в живых и мёртвых частях талломов достоверно не различались и в среднем были равны $0,2 \pm 0,1$ и $0,3 \pm 0,2$ мг/кг сух. в-ва соответственно. Между содержанием тяжёлых металлов в мёртвых частях лишайника и подстилке существуют значимые связи, коэффициенты корреляции варьируют от 0,61 до 0,77 ($p < 0,05$), при этом для живых частей талломов такие связи незначимы. Это подтверждает гипотезу о том, что поступление тяжёлых металлов в талломы лишайника контролируется капиллярными силами. Известно, что мёртвые части подстилки выполняют функции капилляров, по которым происходит поднятие водно-минерального раствора из субстрата к живой части [28, 29].

Сопоставление средних концентраций Ni, Cu и Co, регистрируемых в листьях брусники, живых частях мха и лишайника на экспериментальном участке, с их фоновым содержанием показывает лишь 1,3–3-кратное его увеличение, что не превышает порога токсичности тяжёлых металлов для растительных организмов. Это свидетельствует о незначительной миграции тяжёлых металлов из загрязнённой почвы в надземные части растительных организмов. Таким образом, в условиях полевого эксперимента повышенные концентрации тяжёлых металлов в ассимиляционных органах растений и живых частях талломов лишайника не являются летальными для их жизнедеятельности.

Следует особо остановиться на соотношении концентраций Ni:Cu в подстилке и растительном материале, которое принципиально различается в надземных частях растений и лишайников и лесной подстилке. Как было отмечено выше, содержание кислоторастворимых форм Cu в органогенном горизонте почвы всегда существенно больше по сравнению с таковым Ni, что в большой степени определяется химической природой металлов: медь – сильный комплексообразователь и образует прочные комплексы с органическим веществом почвы; прочность аналогичных комплексов с никелем значительно меньше и его подвижность в почве намного меньше [11, 19]. В то же время в растительном материале отмечается обратное соотношение концентраций этих металлов: в листьях брусники, надземных частях мха и лишайника во всех случаях содержание Ni превышает таковое Cu. Известно, что поступление ионов никеля в надземную часть растения из среды (почвы или питательного раствора) с повышенным его содержанием происходит быстрее по сравнению с ионами меди, а уровень его накопления в надземной части растения обычно значительно выше по отношению к ионам меди [19, 30].

Заключение. В условиях полевого эксперимента по искусственному внесению полиметаллической пыли, выбрасываемой в атмосферу комбинатом «Североникель» (Мурманская обл.), на поверхность снежного покрова в сосняке лишайниково-зеленомошном регистрируется пространственно неоднородное загрязнение верхнего органогенного горизонта Al-Fe-гумусового подзола техногенными соединениями Ni, Cu, Co, суммарная концентрация кислоторастворимых форм которых варьирует в пределах от 32,7 до 737 мг/кг, что соответствует интервалу индекса техногенной нагрузки 2,0–45,5 отн. ед. Почвенное загрязнение тяжёлыми металлами приводит к 1,3–3-кратному увеличению суммарного содержания Ni, Cu, Co в

ассимиляционных органах брусники (*Vaccinium vitis-idaea*) и мха (*Pleurozium schreberi*), а также живых частях талломов лишайника *Cladina stellaris*, при этом концентрации металлов располагаются в ряду убывания Ni>Cu>Co. Столь незначительное повышение концентраций тяжёлых металлов в растительных организмах не достигает токсического порога и не является летальным для их жизнедеятельности.

В пределах экспериментального участка лишайниково-зеленомошного сосняка травяно-кустарничковый ярус устойчив к загрязнению почв тяжёлыми металлами в интервале индекса техногенной нагрузки 2,0–45,5 отн. ед., т. к. общее проективное покрытие и среднее число видов травяно-кустарничкового яруса существенно не изменяются и отсутствует корреляция исследуемых параметров с уровнем загрязнения почвы тяжёлыми металлами.

На территории экспериментального участка в сложении мохово-лишайникового яруса участвуют от 3 до 16 видов, при этом число видов мхов и лишайников достоверно различается по грациям индекса техногенной нагрузки, но значимо не связано с уровнем загрязнения почвы. Вследствие высокой степе-

ни варьирования общее проективное покрытие яруса изменяется незначительно в исследованном интервале индекса техногенной нагрузки. Более благоприятный режим влагообеспеченности в лишайниково-зеленомошных сосновых лесах по сравнению с более сухими лишайниковыми сосняками, по-видимому, препятствует разрушению мохово-лишайникового яруса под воздействием загрязнения почвы тяжёлыми металлами. Однако возрастание доли участия раннесукцессионных видов р. *Cladonia* в лишайниковом покрове экспериментального участка свидетельствует о нарушении структуры мохово-лишайникового яруса под воздействием загрязнения почвы тяжёлыми металлами.

Сниженные значения общего проективного покрытия нижних ярусов, диагностического вида мохообразных *Pleurozium schreberi* и диагностической группы лишайников р. *Cladina*, а также повышенная величина покрытия раннесукцессионных видов р. *Cladonia* свидетельствуют о торможении процесса восстановления напочвенного покрова сосняка лишайниково-зеленомошного под воздействием загрязнения почвы тяжёлыми металлами в ходе постпирогенной сукцессии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №14-04-01394-а и №14-04-10112-к).

Список литературы

1. Цветков, В.Ф. Классификационные типологические схемы и лесорастительное районирование Мурманской области / В.Ф. Цветков, В.Г. Чертовской. – Архангельск: Архангельский институт леса и лесохимии, 1978. – 35 с.
2. Кольская энциклопедия. Мурманск, 2008. <http://kolaenc.gov-murman.ru>
3. Цветков, В.Ф. Сосняки Крайнего Севера / В.Ф. Цветков, И.В. Семенов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 116 с.
4. Переверзев, В.Н. Почвообразование в лесной зоне Кольского полуострова / В.Н. Переверзев // Вестник КНЦ РАН. – 2011. – № 2. – С. 74–82.
5. Баркан, В.Ш. Загрязнение почвы никелем и медью от промышленного источника металлургических пылей / В.Ш. Баркан // Экологические проблемы Северных регионов и пути их решения: Материалы Всеросс. науч. конф. с международ-
6. ным участием. – Апатиты: КНЦ РАН, 2008. – Ч. 1. – С. 46–51.
7. Barcan, V. Leaching of nickel and copper from a soil contaminated by metallurgical dust / V. Barcan // Environmental International. – 2002. – Vol. 28, N 1–2. – Pp. 63–68.
8. Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова / Под ред. Б.Н. Норина, В.Т. Ярмишко. – Л.: Наука, 1990. – 195 с.
9. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / Под ред. В.А. Алексеева. – Л.: Наука, 1990. – 200 с.
10. Проблемы экологии растительных сообществ Севера / Под ред. В.Т. Ярмишко. – СПб.: ООО «ВВМ», 2005. – 450 с.
11. Лукина, Н.В. Техногенные сукцессии в лесах Кольского полуострова / Н.В. Лукина, Т.В. Черненко // Экология. – 2008. – № 5. – С. 329–337.

11. Динамика лесных сообществ Северо-Запада России / Под ред. В.Т. Ярмишко. – СПб.: ВВМ, 2009. – 276 с.
12. Хански, И. Ускользящий мир: экологические последствия утраты местообитаний / И. Хански. – М.: Мир, 2010. – 340 с.
13. Черненкова, Т.В. Биоразнообразие лесного покрова при техногенном загрязнении / Т.В. Черненкова // Экология. – 2014. – № 1. – С. 3–13.
14. Лукина, Н.В. Биогеохимические циклы в лесах севера в условиях аэротехногенного загрязнения / Н.В. Лукина, В.В. Никонов. – Апатиты: КНЦ РАН, 1996. – Ч. 1. – 213 с.; Ч. 2. – 192 с.
15. Лукина, Н. В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты / Н.В. Лукина, В.В. Никонов. – Апатиты: КНЦ РАН, 1998. – 316 с.
16. Лянгузова, И.В. Химический состав растений при атмосферном и почвенном загрязнении / И.В. Лянгузова, О.Г. Чертов // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. – Л.: Наука, 1990. – С. 75–86.
17. Лянгузова, И.В. Тяжелые металлы в системе почва–растение: подвижность, поступление и распределение / И.В. Лянгузова // Проблемы экологии растительных сообществ Севера. – СПб.: ООО «ВВМ», 2005. – С. 175–189.
18. Лянгузова, И.В. Динамика содержания никеля и меди в растениях сосновых лесов Кольского полуострова в условиях аэротехногенного загрязнения / И.В. Лянгузова // Растительные ресурсы. – 2008. – Т. 44, вып. 4. – С. 91–98.
19. Лянгузова, И.В. Динамика атмосферных выбросов предприятия по производству цветных металлов и накопление токсических веществ в растениях и почве / И.В. Лянгузова // Динамика лесных сообществ Северо-Запада России / Под ред. В.Т. Ярмишко. – СПб.: ВВМ., 2009. – С. 25–58.
20. Ильин, В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение / В.Б. Ильин. – Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.
21. Титов, А.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам / А.Ф. Титов, В.В. Таланова, Н.М. Казнина, Г.Ф. Лайдинен. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. – 172 с.
22. Елькина, Г.Я. Поведение меди в системе почва–растение в условиях Европейского Северо-Востока / Г.Я. Елькина // Агрохимия. – 2008. – № 6. – С. 72–79.
23. Костюк, В.И. Устойчивость овса к тяжелым металлам / В.И. Костюк. – Апатиты: КНЦ РАН, 2009. – 117 с.
24. Практикум по агрохимии. – М.: МГУ, 2001. – 689 с.
25. Методы изучения лесных сообществ / Под ред. В.Т. Ярмишко, И.В. Лянгузовой. – СПб.: НИИХимии, 2002. – 240 с.
26. Горшков, В.В. Травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы в сосновых лесах / В.В. Горшков, И.Ю. Баккал // Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. – СПб.: ВВМ, 2009. – С. 73–87.
27. Смирнова, О.В. Объем счетной единицы при изучении ценопопуляций растений различных биоморф / О.В. Смирнова // Ценопопуляции растений (основные понятия и структура). – М.: Наука, 1976. – С. 72–80.
28. Андреев, В.Н. Прирост кормовых лишайников и приемы его регулирования / В.Н. Андреев // Труды БИН АН СССР. Сер. 3. Геоботаника. – 1954. – Вып. 9. – С. 11–74.
29. Малышева, Т.В. Влияние искусственного изменения влажности почвы на рост лесных наземных мхов и лишайников / Т.В. Малышева // Экология. – 1981. – № 4. – С. 12–18.
30. Тэмп, Г.А. Никель в растениях в связи с его токсичностью (Обзор) / Г.А. Тэмп // Устойчивость к тяжелым металлам дикорастущих видов. – Л.: Наука, 1991. – С. 139–146.

Статья поступила в редакцию 20.08.15

Информация об авторах

ЛЯНГУЗОВА Ирина Владимировна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук. Область научных интересов – экология, охрана окружающей среды, аналитическая химия. Автор 85 публикаций, в том числе пяти коллективных монографий.

ГОРШКОВ Вадим Викторович – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук. Область научных интересов – биогеоценология, лесоведение, охрана окружающей среды. Автор 155 публикаций, в том числе четырех коллективных монографий.

БАККАЛ Ирина Юрьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук. Область научных интересов – биогеоценология, экология, охрана окружающей среды. Автор 60 публикаций, в том числе трех коллективных монографий.

БОНДАРЕНКО Маргарита Сергеевна – аспирант, Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук. Область научных интересов – экология, охрана окружающей среды. Автор пяти публикаций.

UDC 630*424.5:581.52: 504.5

INFLUENCE OF SOIL POLLUTION (HEAVY METALS) ON THE LICHEN PINE FOREST SOIL COVER IN CONDITIONS OF FIELD EXPERIMENT

I. V. Lyanguzova, V. V. Gorshkov, I. Yu. Bakkal, M. S. Bondarenko

Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences,
2, Professora Popova St., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation
E-mail: ILyanguzova@binran.ru

Key words: forest ecosystems; heavy metals; environment pollution; soil cover; field experiments; Kola Peninsula.

ABSTRACT

The results of a long-term field experiment of the polymetallic dust influence, vented by «Severonikel» (Monchegorsk, Kola Peninsula), on the condition and species composition of soil cover in lichen pine forest as well as migration of Ni, Cu, Co out from the polluted soil into the dominant herbs and lichens were reflected. In case of hand application of the polymetallic dust on the surface of snow cover in lichen pine forest, spatially heterogeneous pollution of the upper organic horizon with manmade compounds of heavy metals (total concentration of acid-soluble forms of which varies within 32,7 – 737 mg/kg) was observed. The grass-shrub layer of lichen pine forest is sustainable to soil pollution with Ni, Cu and Co within the index of manmade load 2,0–45,5 of relative units (no strong changes of projective cover and species diversity as well as no correlation of the studied parameters with the level of soil pollution with heavy metals prove the idea). Lichenous-moss carpet is very sensitive to the polymetallic dust application, causing the change in species composition and lowering of projective cover. Soil pollution with heavy metals leads to 1,3–3-times increase of the total composition of Ni, Cu, Co in the assimilatory body of red bilberry (*Vaccinium vitis-idaea*) and moss (*Pleurozium schreberi*), as well as living parts of lichen thallus *Cladina stellaris*, which is significantly lower than toxic boundary and is not fatal for living. Decrease of projective cover in lower layers of lichen pine forest, the muscoid *Pleurozium schreberi* and the lichens of *Cladina* family as well as increase of *Cladonia* family is the evidence of slowing down of the process of soil cover recovery under the influence of biogeocenose pollution with heavy metals in the course of postpyrogenic succession.

The research was carried out with some support of Russian Foundation for Basic Research (grants №14-04-01394-a and №14-04-10112-к).

REFERENCES

1. Tsvetkov V.F., Chertovskiy V.G. *Klassifikatsionnye tipologicheskie skhemy i lesorastitelnoe rayonirovanie Murmanskoy oblasti* [Classification and Typological Schemes and Forest Growth Zoning in the Murmansk Oblast]. Arkhangelsk: Arkhangelskiy institut lesa i lesokhimii, 1978. 35 p.
2. Kolskaya entsiklopediya [Kola Encyclopedia]. Murmansk, 2008. URL : <http://kolaenc.gov-murman.ru>.
3. Tsvetkov V.F., Semenov I.V. *Sosnyaki Kraynego severa* [Pine Forest in the Far North Region]. Moscow: Agropromizdat, 1985. 116 p.
4. Pereverzev V.N. Pochvoobrazovanie v lesnoy zone Kolskogo poluostrova [Soil Formation in the Kola Peninsula Forests]. *Vestnik KNTS RAN* [Vestnik of Kola Research Center, RAS.]. 2011. № 2. Pp. 74–82.
5. Barkan V.Sh. Zagryaznenie pochvy nikelom i medyu ot promyshlennogo istochnika metallurgicheskikh pyley [Soil Pollution with Nickel and Copper Caused by the Industrial Source (Metallurgical Dust)]. *Ekologicheskie problemy Severnykh regionov i puti ikh resheniya: Materialy Vseross. nauch. konf. s mezhdunarodnym uchastiem* [Ecological Problems in the Northern Regions and the Ways to Solve Them: proceedings of Russian research conference with international participation]. Apatity: KNTS RAN, 2008. P. 1. Pp. 46–51.
6. Barcan V. Leaching of nickel and copper from a soil contaminated by metallurgical dust. *Environmental International*. 2002. Vol. 28, N 1–2. Pp. 63–68.
7. Vliyanie promyshlennogo atmosfernogo zagryazneniya na osnovnye lesa Kolskogo poluostrova: pod red. B.N. Norina, V.T. Yarmishko [Influence of Industrial Pollution on the Pine Forests of the Kola Peninsula: under the editorship of B.N. Norin and V.T. Yarmishko]. Leningrad: Nauka, 1990. 195 p.

8. Lesnye ekosistemy i atmosfernoe zagryaznenie: pod red. V.A. Alekseeva [Forest Ecosystems and Air Pollution: under the editorship of V.A. Alekseev]. Leningrad: Nauka, 1990. 200 p.
9. Problemy ekologii rastitelnykh soobshchestv Severa: pod red. V.T. Yarmishko [Ecological Problems of Northern Plant Societies under the editorship of V.T. Yarmishko]. Saint-Petersburg: LLC «VVM», 2005. 450 p.
10. Lukina N.V., Chernenkova T.V. Tekhnogennye suksessii v lesakh Kolskogo poluostrova [Manmade Successions in the Kola Peninsula Forests]. *Ekologiya* [Ecology]. 2008. № 5. Pp. 329–337.
11. Dinamika lesnykh soobshchestv Severo-Zapada Rossii: pod red. V.T. Yarmishko [Forest Societies Dynamics in Russian North-West: under the editorship of V.T. Yarmishko]. Saint-Petersburg: VVM, 2009. 276 p.
12. Khanski I. *Uskolzaushchiy mir: ekologicheskie posledstviya utraty mestoobitaniy* [Escaping World: Ecological Consequences of the Loss of the Habitat]. Moscow: Mir, 2010. 340 p.
13. Chernenkova T.V. *Bioraznoobrazie lesnogo pokrova pri tekhnogennom zagryaznenii* [Biodiversity of Forest Cover when Manmade Pollution]. *Ekologiya* [Ecology]. 2014. № 1. Pp. 3–13.
14. Lukina N.V., Nikonov V.V. *Biogeokhimicheskie tsikly v lesakh severa v usloviyakh aerotekhnogennoho zagryazneniya* [Biogeochemical Cycles in the Northern Forests in Conditions of Manmade Pollution]. Apatity: KNTS RAN, 1996. Pt. 1. 213 p.; Pt. 2. 192 p.
15. Lukina N.V., Nikonov V.V. *Pitatelnyy rezhim lesov severnoy taygi: prirodnye i tekhnogennye aspekty* [Nutritive Regime in Northern Taiga Forests: Natural and Manmade Aspects]. Apatity: KNTS RAN, 1998. 316 p.
16. Lyanguzova I.V., Chertov O.G. Khimicheskii sostav rasteniy pri atmosfernom i pochvennom zagryaznenii [Chemical Composition of Plants when Air and Soil Pollution]. *Lesnye ekosistemy i atmosfernoe zagryaznenie* [Forest Ecosystems and Air Pollution]. Leningrad: Nauka, 1990. Pp. 75–86.
17. Lyanguzova I.V. Tyazhelye metally v sisteme pochva–rastenie: podvizhnost, postuplenie i raspredelenie [Heavy Metals in the System Soil-Plant: Mobility, Entry and Distribution]. *Problemy ekologii rastitelnykh soobshchestv Severa* [Ecological Problems of Northern Plant Societies]. Saint-Petersburg: LLC «VVM», 2005. Pp. 175–189.
18. Lyanguzova I.V. Dinamika sodержaniya nikelya i medi v rasteniyakh sosnovykh lesov Kolskogo poluostrova v usloviyakh aerotekhnogennoho zagryazneniya [Dynamics of Nickel and Cuprum Content in the Plants of the Kola Peninsula Pine Forests in Conditions of Air Pollution]. *Rastitelnye resursy* [Plant Resources.]. 2008. Vol. 44, Issue 4. Pp. 91–98.
19. Lyanguzova I.V. Dinamika atmosfernykh vybrosov predpriyatiya po proizvodstvu tsvetnykh metallov i nakoplenie toksicheskikh veshchestv v rasteniyakh i pochve [Dynamics of Air Emission of a Manufacturer of Nonferrous Metals and Accumulation of Toxins in Plants and Soil]. *Dinamika lesnykh soobshchestv Severo-Zapada Rossii: pod red. V.T. Yarmishko* [Dynamics of Forest Societies in the Russian North-West: under the editorship of V.T. Yarmishko]. Saint-Petersburg: VVM, 2009. Pp. 25–58.
20. Ilin V.B. *Tyazhelye metally v sisteme pochva–rastenie* [Heavy Metals in the Soil-Plant System]. Novosibirsk: Nauka, 1991. 151 p.
21. Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M., Laidinen G.F. *Ustoychivost rasteniy k tyazhelym metallam* [Plants Resistance to Heavy Metals]. Petrozavodsk: KarNTS RAN, 2007. 172 p.
22. Elkina G.Ya. Povedenie medi v sisteme pochva–rastenie v usloviyakh Evropeyskogo Severo-Vostoka [Cuprum Behaviour in the Soil-Plant System in the European North-East]. *Agrokimiya* [Agrochemistry]. 2008. № 6. Pp. 72–79.
23. Kostyuk V.I. *Ustoychivost ovsa k tyazhelym metallam* [Oat Resistance to Heavy Metals]. Apatity: KNTS RAN, 2009. 117 p.
24. Praktikum po agrokhimii [Practical Guide on Agrochemistry]. Moscow: MSU, 2001. 689 p.
25. Metody izucheniya lesnykh soobshchestv: pod red. V.T. Yarmishko, I.V. Lyanguzovoy [Methods for Forest Society Study: under the editorship of V.T. Yarmishko, I.V. Lyanguzova]. Saint-Petersburg: NIIKhimii, 2002. 240 p.
26. Gorshkov V.V., Bakkal I.Yu. Travyanokustarnichkovyy i mokhovo-lishaynikovyy yarusy v sosnovykh lesakh [Grass-Shrub and Moss-Lichen Layers in Pine Forests]. *Dinamika lesnykh soobshchestv Severo-Zapada Rossii* [Forest Societies Dynamics in Russian North-Western Regions]. Saint-Petersburg: VVM, 2009. Pp. 73–87.
27. Smirnova O.V. Obem schetnoy edinitsy pri izuchenii tsenopopulyatsiy rasteniy razlichnykh biomorf [The Size of the Unit of Time when Studying Plants Cenopopulation of Various Biomorphes]. *Tsenopopulyatsii rasteniy (osnovnye ponyatiya i struktura)* [Plants Cenopopulations (basic ideas and structure)]. Moscow: Nauka, 1976. Pp. 72–80.
28. Andreev V.N. Prirost kormovykh lishaynikov i priemy ego regulirovaniya [Accretion of Forage Lichens and the Ways for its Regulation]. *Trudy BIN AN SSSR. Ser.3. Geobotanika* [Transactions of Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, USSR. Ser. 3. Geobotany]. 1954. Issue 9. Pp. 11–74.
29. Malysheva T.V. Vliyanie iskusstvennogo izmeneniya vlazhnosti pochvy na rost lesnykh nazemnykh mkhov i lishaynikov [Influence of Manmade Soil Moisture Change on the Growth of Forest Moss and Lichens]. *Ekologiya* [Ecology]. 1981. № 4. Pp. 12–18.

30. Temp G.A. *Nikel v rasteniyakh v svyazi s ego toksichnostu (Obzor) [Nikel in Plants and its Toxicity (review)]. Ustoychivost k tyazhelym metallam dikorastushchikh vidov [Resistance to Heavy Metals of Wild-Growing Species]*. Leningrad: Nauka, 1991. Pp. 139–146.

The article was received 20.08.15.

Citation for an article: Lyanguzova I. V., Gorshkov V. V., Bakkal I. Yu., Bondarenko M. S. Influence of soil pollution (heavy metals) on the lichen pine forest soil cover in conditions of field experiment. Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2015. No 3 (27). Pp. 74-86.

Information about the authors

LYANGUZOVA Irina Vladimirovna – Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences. Research interests – ecology, environment protection, analytical chemistry. The author of 85 publications, including five multi-authored monographs.

GORSHKOV Vadim Victorovich – Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences. Research interests – biogeocenology, forestry, environment protection. The author of 155 publications, including four multi-authored monographs.

BAKKAL Irina Yuriyevna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences. Research interests – biogeocenology, ecology, environment protection. The author of 60 publications, including three multi-authored monographs.

BONDARENKO Margarita Sergeyevna – Postgraduate student, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences. Research interests – ecology, environment protection. The author of five publications.