

# РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И БИОИНДИКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАЙОНЕ КОСТОМУКШСКОГО ЗАПОВЕДНИКА И АО «КАРЕЛЬСКИЙ ОКАТЫШ»

М.Г. Опекунова<sup>1</sup>, И.С. Гайдыш<sup>2</sup>, А.Р. Никулина<sup>1</sup>, И.В. Кушнир<sup>1</sup>, А.А. Панова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ, г. Санкт-Петербург, *m.opekunova@mail.ru, anna.2001-nik@mail.ru, st097582@student.spbu.ru, asja612@yandex.ru*

<sup>2</sup>ГПБЗ «Костомукшский», г. Костомукша *kost.zap.nauka@mail.ru*

## THE RESULTS OF GEOECOLOGICAL MONITORING AND BIOINDICATION STUDIES IN THE REGION OF THE KOSTOMUKSHA RESERVE AND JSC «KARELIAN OKATYSH»

M.G. Opekunova, I.S. Gaydysh, A.R. Nikulina, I.V. Kushnir, A.A. Panova

*St. Petersburg State University, St. Petersburg*

Аннотация. Изучено содержание Fe, Sc, K, Ca, Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr, Sr, V и Mn в почвах и лишайниках на территории Костомукшского заповедника, г. Костомукша и АО «Карельский окатыш». Показано, что элементами-индикаторами техногенного загрязнения являются Fe, Cr, Ni и V, на урбанизированной территории – также Zn, Pb, Cu, Ni, Cd. Изменение видового разнообразия растительности связано с разновозрастными вырубками. Наличие тератов и изменение биоиндикационных характеристик *Pinus sylvestris* (покрытие эпифитных лишайников; возраст, диаметр деревьев, высота прикрепления кроны и высота отторгнутой корки; возраст и состояние хвои, морфология пыльцы) и березы *Betula pubescens* (флуктуирующая асимметрия листьев и количество устьиц) указывают на нарушение жизнедеятельности растений под влиянием техногенного загрязнения.

*Ключевые слова: антропогенное загрязнение, тяжелые металлы, особо охраняемые природные территории, биоиндикация.*

### Введение

В последнее время большое внимание уделяется оценке состояния природной среды, планированию и реализации мер, направленных на сокращение негативного воздействия на биоразнообразие в зоне крупных промышленных предприятий. Исследования, связанные с воздействием Костомукшского ГОКа (АО «Карельский окатыш») на окружающую среду, ведутся с начала его деятельности. С 1980-х проводятся исследования Институтом леса и Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН [1], С.-Петербургским горным институтом, СПбГУ и др. С 2021 г. на базе государственного заповедника «Костомукшский» реализуется программа «Мониторинг и сохранение биоразнообразия в регионе присутствия АО «Карельский окатыш»», в которой принимают активное участие сотрудники кафедры геоэкологии СПбГУ. Цель – изучение видового разнообразия и оценка морфологической изменчивости растений в государственном природном биосферном заповеднике (ГПБЗ) «Костомукшский», санитарно-защитной зоне предприятия АО «Карельский окатыш» и г. Костомукша.

### Регион исследований, объекты и методы

Летом 2021-2022 гг. изучено состояние растительности на пробных площадях на территории АО «Карельский окатыш», в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) предприятия, в черте г. Костомукша и на территории ГПБЗ «Костомукшский».

Дана детальная физико-географическая характеристика природно-территориальных комплексов (ПТК) на 39 станциях мониторинга (СМ), в т. ч. 12 пикетах на 5 профилях, вблизи источников антропогенного воздействия и на фоновой территории, проведены биоиндикационные исследования с отбором проб почв, корки, древесных кернов и пыльцы сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., а также листьев березы пушистой *Betula pubescens* Ehrh. На территории Костомукшского заповедника изучено 10 площадей, видовое разнообразие и биоиндикационные характеристики которых приняты за фоновые.

Анализ содержания Fe, Sc, K, Ca, Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr, Sr, V и Mn в почвах проведен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на приборе «ELAN-6100 DRC» с полным кислотным разложением проб в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского. Для определения проективного покрытия (ПП) эпифитных лишайников на СМ случайным образом выбирались по 8 деревьев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. Описания эпифитного лишайникового покрова производились при помощи рамки 10×20 см на высоте 130 см от земли с 4 сторон света. Степень повреждения хвои сосны некрозом и хлорозом определялась по бонитировочной шкале в баллах от 1 до 6. Для оценки качества пыльцы собрано 30 проб микростробил сосны *P. sylvestris* с созревшей пылью из средней части микростробила: по 5 микростробил с одной СМ помещали в пробирку, фиксировали в 70% этиловом спирте и хранили при температуре +4 – +6°. Исследование проводилось с помощью светового микроскопа при увеличении 10×40. В каждом образце изучали не менее 500 пыльцевых зерен, фиксировали наличие / отсутствие тератоморфных пыльцевых зерен, подсчитывали их количество и анализировали морфологические особенности. Отбор кернов древесины сосны проведен с высоты 1.3 м с помощью бурава «Пресслера» по 2 керна по двум радиусам, ориентированным к сторонам света. С использованием бинокулярного микроскопа на полуавтоматической установке LINTAB и программы TSAPWin получены данные по ширине годовых колец, построены хронологии радиального прироста сосны и проведен статистический анализ.

В качестве исследуемых параметров листьев березы выбраны флуктуирующая асимметрия листовых пластинок *Betula pubescens* [2] и изменение числа устьиц. Листья собирали с нижней части кроны, на уровне поднятой руки с разных сторон дерева. В ходе полевых работ отобрано 900 листьев березы, сделано 2760 слепков устьиц для лабораторных исследований. Для оценки токсичности образцов почвы проведено биотестирование с использованием тест-объектов *Daphnia magna* Straus. и *Chlorella vulgaris* Beijer. Биотестирование проводили согласно методическим указаниям, водные вытяжки готовили из почвы в воздушно-сухом состоянии в соотношении с дистиллированной водой 1:4 [4, 5].

### **Обсуждение результатов**

Проведённые анализы показали, что содержание большинства химических элементов в почвах г. Костомукша и СЗЗ комбината превышает фоновые значения. Концентрация Pb, Cr, Cu, Ba в 1.5-2 раза, Mn и Ni до 5 раз, Fe в 3–14 раз выше фона. Валовое содержания Ni, Zn и Cd на ряде СМ превосходит ОДК.

Содержание Fe, Cr, Ni и V в лишайниках *Cladonia rangiferina* и *C. stellaris* вблизи ГОКа возрастают на порядок по сравнению с фоном в ГПБЗ; в меньшей степени (5-10 раз) рост содержания характерен для Sc, Co, Sr и Ba. Содержание Cu и Pb увеличиваются в 2-3 раза, а Zn и Cd меняется незначительно. Элементами-индикаторами эмиссии со стороны техногенных объектов служат Fe, Cr, Ni, V, концентрации которых существенно возросли за последние 10 лет [3].

Сравнительный анализ видового состава сосудистых растений на фоновых и контрольных СМ отразил низкое видовое разнообразие северо- и среднетаежных фитоценозов. На фоновых участках количество видов сосудистых растений варьирует от 7 (сосняк кустарничково-зеленомошный) до 29 (лугово-разнотравно-щучковое сообщество) при среднем значении 18 видов на СМ. Наименьшее видовое разнообразие отмечено на рекультивированном участке в СЗЗ на склоне отвала с фрагментарной растительностью – 6 видов; наибольшее число сосудистых растений – 30 видов – на старом рекультивированном отвале в березняке чернично-крупнотравном. Изменение числа видов растений связано также с вырубками различной давности. Вторичные сукцессии сопровождаются инвазией рудеральных и апохорных видов, широко представленных по обочинам грунтовых дорог и распространяющихся на участки сплошной вырубки.

На контрольных СМ, расположенных вблизи комбината и в СЗЗ, сосновые древостои представлены разновозрастными посадками на месте сплошных вырубок, что затрудняет проведение сравнительного анализа динамики радиального прироста *P. sylvestris* и покрытия эпифитных лишайников на фоновых и контрольных СМ. Вместе с тем, установлена общая тенденция к уменьшению радиального прироста сосен, что может быть вызвано влиянием климатических факторов, которые с 1960-х усиливались антропогенной нагрузкой.

Результаты биоиндикационных исследований свидетельствуют о наличии ряда анатомических и морфологических отклонений у растений по мере приближения от ГПБЗ «Костомукшский» к г. Костомукша и АО «Карельский окатыш». На контрольных СМ отмечается суховершинность деревьев, указывающая на неблагоприятные условия обитания и загрязнение тяжелыми металлами. Вблизи объектов комбината высота отторгнутой корки сосны уменьшается до 0.7-2 м, что отличается от фоновых значений в 3.5-10 раз. На контрольных СМ диаметр одновозрастных сосен в 1.5–2 раза меньше по сравнению с фоном. Возраст хвои сосны на контрольных станциях уменьшается в 1.5-2 раза по сравнению с фоном (с 3-4 до 2-3 лет), состояние хвои с 2 баллов на фоновых СМ до 3-4 на ряде контрольных станций. Проективное покрытие эпифитных лишайников на стволах сосен сокращается в 3 раза на СМ вблизи комбината по сравнению с фоном (23 % против 72 %). При этом ПП эпифитных лишайников на контрольных СМ не превышает 80 %, тогда как в фоновых условиях может достигать 95%. Рассматриваемый параметр в ГПБЗ составляет не менее 30%, а на СМ на территории комбината ПП эпифитных лишайников может падать до < 0.1-7%.

Все площадки по состоянию пыльцы относятся к загрязненным территориям. Содержание тератоморфных пыльцевых зерен на четырех СМ на террито-

рии промышленной зоны комбината соответствует критическому уровню загрязнения. Остальные участки относятся к зоне сильного загрязнения. Наибольшее влияние аэротехногенных выбросов на тератогенез проявляется на расстоянии 3-7 км от комбината. Количество поврежденных талломов снижается по мере удаления от комбината.

Показатели ФА листьев березы *B. pubescens* на территории заповедника соответствуют категориям «чисто» и «относительно чисто». На большинстве СМ, расположенных на территории комбината и СЗЗ – «грязно» и «очень грязно». Наблюдается зависимость величины показателя ФА березы от близости к комбинату и городу. Прослеживается тенденция увеличения числа устьиц при приближении СМ к СЗЗ и промышленной площади АО «Карельский окатыш» в среднем с 9-11 до 13-17 на единицу площади. Результаты исследований устьичного аппарата березы, полученных с разных СМ, подтверждают зависимость между количеством устьиц и до АО «Карельский окатыш».

Биотестирование отразило в целом невысокий уровень токсичности почв в районе исследований. Негативный биологический эффект биотестов *Daphnia magna* Straus и *Chlorella vulgaris* Beijer в большей степени проявляется в пробах из поверхностных горизонтов почв, что указывает на преимущественно аэротехногенное поступление загрязняющих веществ. Наибольшая смертность дафний и отклонения оптической плотности хлореллы зафиксированы на СМ вокруг комбината и СЗЗ. Увеличение токсичности проб наблюдается по мере приближения к комбинату, вблизи автодорог и локальных свалок бытовых отходов.

### Выводы

1. Видовой состав растительности на всех изученных станциях мониторинга сходен. Виды сосудистых растений, занесённые в Красные книги РК и РФ, в пределах фоновых и контрольных СМ не обнаружены.

2. Антропогенное загрязнение проявляется в изменении химического состава почв и лишайников. Воздействие горнорудного производства сопровождается увеличением содержания Fe, Cr, Ni и V, урбанизации и автотранспорта – Zn, Pb, Cu, Ni, Cd, Fe и др. Токсичность почв согласно реакции тест-объектов *D. magna* и *Chl. vulgaris* связана главным образом с аэротехногенным загрязнением и увеличивается по мере приближения к комбинату, вблизи автодорог и локальных свалок бытовых отходов.

3. Изменение видового состава сосудистых растений наиболее явно проявляется на территории города, по берегу хвостохранилища в районе северной части Обводного канала и в лесных массивах, сохранившихся вблизи Центрального карьера. Большое влияние на состав и структуру лесных фитоценозов оказали вырубки различного возраста.

4. Наличие тератов и изменение биоиндикационных характеристик сосны *Pinus sylvestris* (проективное покрытие эпифитных лишайников; возраст и состояние хвои; возраст, диаметр деревьев, высота прикрепления кроны и высота отторгнутой корки) и березы *Betula pubescens* (флуктуирующая асимметрия листьев и количество устьиц) указывают на нарушение процессов жизнедеятельности растений в этих условиях.

5. На рекультивированных отвалах отмечается зарастание рудеральными видами с участием кустарничков, фрагменты корневищ которых перенесены с торфом. На старых рекультивированных отвалах формируются березовые сообщества с преобладанием рудеральных видов. Наблюдается инвазия видов растений, не характерных для лесных сообществ северной тайги: *Ribes nigrum*, *Frangula alnus*, *Melandrium dubium* и др.

### Литература

- [1] Федорец Н.Г., Солодовников А.Н. Воздействие эмиссий Костомукшского горно-обогатительного комбината на лесные подстилки сосняков в северотаежной подзоне Карелии / Тр. КарНЦ РАН. 2013. № 6. С. 143-152.
- [2] Опекунова М.Г., Башарин Р.А. Применение флуктуирующей асимметрии листьев березы *Betula pubescens* Ehrh. для оценки загрязнения окружающей среды в районе Костомукши // Вестник СПб ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2014. № 3. С. 58-70.
- [3] Опекунова М.Г., Гизетдинова М.Ю. Использование лишайников в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей среды // Вестник СПб ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2014. № 1. С. 78-93.
- [4] Токсикологические методы контроля. Методика измерений количества *Daphnia magna* Straus для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления методом прямого счета. М., 2014. 39 с.
- [5] Токсикологические методы контроля. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла *Chlorella vulgaris* Beijer для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. М., 2014. 38 с.

**S u m m a r y.** The content of chemical elements Fe, Sc, K, Ca, Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Co, Cr, Sr, V, and Mn in soils and lichens on the territory of the Kostomuksha Reserve, in the Kostomuksha city and JSC «Karelian Okatysh» was studied. It is shown that Fe, Cr, Ni and V are indicators of technogenic pollution. Changes in the species diversity of plant communities in the region are associated with clearcuts of different ages. The presence of terates and changes in the bioindicative characteristics of *Pinus sylvestris* (coverage of epiphytic lichens; age, tree diameter, height of crown attachment and height of detached crust; age and condition of needles, pollen morphology) and *Betula pubescens* (fluctuating leaf asymmetry and number of stomata) indicate a violation of the vital processes of plants under the influence of anthropogenic pollution.