

ИРИНА СЕРГЕЕВНА ЕРОХИНА

аспирант кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
irinabikera@yandex.ru

НАДЕЖДА АЛЕКСАНДРОВНА ЕЛЬКИНА

кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
z_nat2003@mail.ru

ЕВГЕНИЯ ФЕДОРОВНА МАРКОВСКАЯ

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой ботаники и физиологии растений эколого-биологического факультета, Петрозаводский государственный университет
volev@sampo.ru

ПАЛИНОИНДИКАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ Г. КОСТОМУКШИ

В статье дана оценка уровня загрязнения г. Костомукши методом палиноиндикации. По результатам анализа в радиусе 20 км от города были выделены 4 зоны по степени загрязнения: условно чистая, умеренного загрязнения, сильного загрязнения и критического загрязнения.

Ключевые слова: палиноиндикация, сосна обыкновенная, Костомукшский ГОК, г. Костомукша, Карелия

Для оценки состояния природной среды территорий, подверженных выбросам промышленных предприятий, часто используют биоиндикационные методы, основанные на определении внешних морфологических изменений листового аппарата и кроны деревьев [5], [15], [25], стабильности развития организма [1], [2], [11], нарушений в формировании генеративных органов [12], [17]. Состояние репродуктивной системы – чувствительный показатель адаптации растительного организма к среде обитания. Наиболее сильное влияние антропогенного стресса испытывают мужские генеративные органы, что проявляется в их аномальном развитии и низком качестве формируемой пыльцы [12], [17]. В условиях дестабилизации среды растения продуцируют много тератоморфных (уродливых, дефектных) пыльцевых зерен [8], [9], [16], [18], [19].

Город Костомукша построен в 1983 году по принципу «город в лесу» с максимальным сохранением участков естественного леса [14]. Возникновение города связано со строительством Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОКа), промышленная площадка которого расположена в 10 км к северо-востоку от города с учетом розы ветров. ГОК является одним из основных источников загрязняющих веществ в Карелии. Так, за 2009 год Костомукшским городским округом было выброшено в атмосферу 45,6 тыс. т загрязняющих веществ, что составляет 41 % всех выбросов в Карелии. В состав основных выбросов комбината входят твердые вещества – 11 %, диоксид серы – 82 %, оксид углерода – 3,1 % и оксиды азота – 3,3 %. При этом © Ерохина И. С., Елькина Н. А., Марковская Е. Ф., 2011

вклад автотранспорта в суммарные выбросы города составляет 9,6 %, из них оксида углерода – 69,2 %, оксидов азота – 41,5 % [6]. Однако факт влияния деятельности Костомукшского горно-обогатительного комбината на экологию города остается дискуссионным [15], [20], [23], [24], [26]. Из литературы известно, что сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) особенно чувствительна к действию диоксида серы. В условиях сильного загрязнения у нее наблюдается угнетение ростовых и генеративных процессов [3], [7], [21].

Цель работы – оценка состояния природной среды на территории г. Костомукши с использованием палинологического анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнена на растениях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Материал собирали в 2009–2011 годах. Для проведения исследований были заложены 22 пробных площади, из них 8 в разных частях города, 10 – на различном удалении от комбината (пробы 1'–5' в юго-западном направлении от комбината, 6'–10' – в северо-восточном направлении), 1 пробная площадь в условно чистом районе (на расстоянии 20 км от города в восточном направлении) и 3 контрольные пробные площади в юго-западном направлении (рис. 1). На каждой пробной площади была взята общая проба микростробил *P. sylvestris* с 5 деревьев.

Микростробилы с уже созревшей пылью фиксировали в 70 % этиловом спирте и хранили в холодильнике. Для цитологического анализа использовали микроспорофиллы из средней

части микростробила, материал окрашивали в 1 % растворе ацетокармина [16], [22]. Исследование проводили с помощью светового микроскопа при увеличении 10 х 40. В каждом образце подсчитывали количество тератоморфных пыльцевых зерен и анализировали морфологические особенности. Изучали не менее 2500 пыльцевых зерен из каждого образца.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы «Microsoft Excel 2010». Для оценки достоверности изменений использовали однофакторные дисперсионный и регрессионный анализы [13].

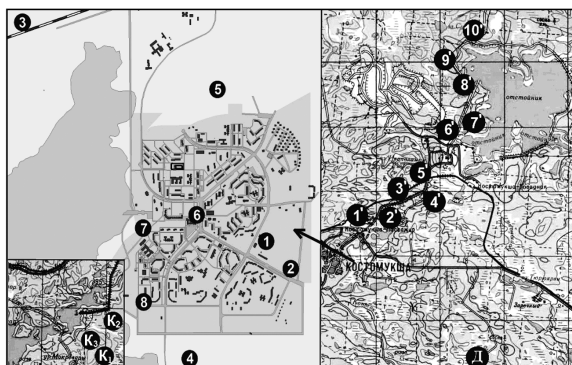


Рис. 1. Расположение пробных площадей: 1–8 – пробные площади на территории города; 1'–10' – трансекта по направлению преобладающих ветров; K1–K3 – контрольные пробные площади; Д – дачные участки (20 км на восток от города)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о большом разнообразии вариантов нарушения морфологического строения пыльцы *P. sylvestris* на территории г. Костомукши и на разном удалении от ГОКа. Всего было выявлено 11 типов нарушений (рис. 2, таблица).

Основная масса пыльцы для каждой пробной площади является нормально развитой, однако количество тератоморфных пыльцевых зерен и типы морфологических нарушений различны для всех территорий. Так, на территории города содержание аномальной пыльцы в среднем составляет 43 %. Наиболее часто встречающаяся аномалия развития – пыльцевые зерна (п. з.) без содержимого (24,6 %), нарушенное развитие пыльцевых мешков (п. м.) (13,1 %), отмечаются отклонения в строении экзины (4,9 %). На условно чистой территории (Д) содержание тератоморфных пыльцевых зерен в два раза меньше – 20,4 %.

Основные нарушения в развитии касаются пыльцевых мешков (14,3 %), имеются пыльцевые зерна без содержимого (3,6 %) и нарушения экзины (2,6 %). Средние значения содержания тератоморфных пыльцевых зерен в образцах, отобранных по направлению от ГОКа к городу (ЮЗ), составляют 11,1 %, по направлению действия преобладающих ветров (СВ) – 13,0 %.

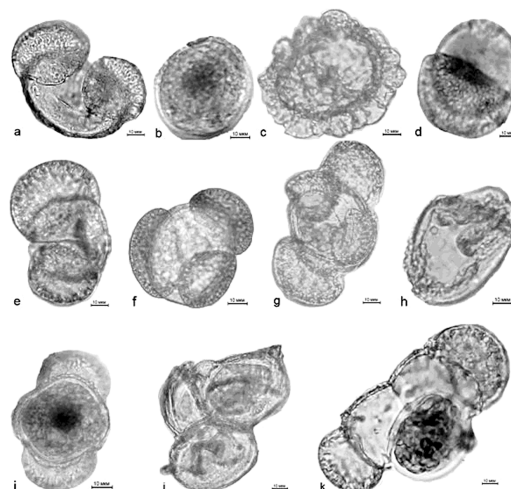


Рис. 2. Типы пыльцевых зерен *Pinus sylvestris* L. на территории г. Костомукши:

а – нормально развитое п. з.; б – без п. м.;
с – недоразвитые п. м.; d – одномешковое п. з.;
е – двухразномешковое п. з.; f – трехмешковое п. з.;
g – четырехмешковое п. з.; h – п. з. без содержимого;
i – нарушение экзины; j – полиады; k – сросшиеся п. з.

Пыльцевые зерна *Pinus sylvestris* с разными типами нарушений морфологического строения (среднее число, %)

Типы п. з.	Места взятия проб				
	Город	Д	ГОК_ЮЗ	ГОК_СВ	К
Норма	57,00 ± 4,41	79,55	88,88 ± 1,44	86,97 ± 1,36	94,45 ± 0,57
Тератоморфные п. з.	43,00 ± 4,41	20,45	11,12 ± 1,44	13,03 ± 1,36	5,55 ± 0,57
Из них: без п. м.	10,95 ± 1,39	7,19	3,56 ± 0,75	3,35 ± 0,69	1,57 ± 0,67
одномешковое п. з.	1,30 ± 0,15	6,51	2,17 ± 0,31	3,75 ± 0,64	0,55 ± 0,15
двухразномешковое п. з.	0,10 ± 0,03	0,00	0,44 ± 0,16	0,28 ± 0,09	0,35 ± 0,23
трехмешковое п. з.	0,73 ± 0,21	0,56	0,39 ± 0,11	0,62 ± 0,26	0,00
четыремешковое п. з.	0,01 ± 0,01	0,00	0,03 ± 0,03	0,03 ± 0,03	0,00
без содержимого	24,62 ± 3,36	3,63	2,46 ± 0,35	3,40 ± 0,75	1,25 ± 0,05
нарушения экзины	4,86 ± 1,22	2,56	1,45 ± 0,44	1,08 ± 0,23	0,74 ± 0,07
полиады	0,11 ± 0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
сросшиеся п. з.	0,004 ± 0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
маленькие	0,14 ± 0,04	0,00	0,58 ± 0,15	0,49 ± 0,23	0,74 ± 0,07
большие	0,16 ± 0,05	0,00	0,03 ± 0,03	0,03 ± 0,00	0,36 ± 0,04

Примечание. ГОК_ЮЗ – пробные площади по направлению от ГОКа к городу; ГОК_СВ – пробные площади по направлению действия преобладающих ветров; К – контрольные пробные площади; Д – дачные участки (20 км на восток от города).

Для данной территории характерны следующие нарушения: изменения в структуре пыльцевых мешков – 6,6 % (ЮЗ) и 8,0 % (СВ), зерна без

содержимого – 2,5 % (ЮЗ) и 3,4 % (СВ), нарушения эскины – 1,4 % (ЮЗ) и 1,0 % (СВ). В контрольных пробах отклонения в развитии пылевых зерен минимальны – 5,6 %, из них 2,5 % – пыльца с нарушениями строения пылевых мешков, 1,2 % – без содержимого, отклонения в развитии эскины составляют 0,7 %. Анализ данных по трансекте до ГОКа показал, что процент нарушений в зависимости от расстояния до комбината изменяется нелинейно. Так, количество аномальной пыльцы на расстоянии 0,5–4,5 км в СВ направлении от ГОКа в среднем составило 15 %, в 6–8 км от ГОКа количество дефектных пылевых зерен снижается (9,6 %), но снова возрастает начиная с 10 км (10,4 %) (рис. 3). Выявленные закономерности подтверждаются литературными данными о нелинейном распространении поллютантов ГОКа [4], [26].

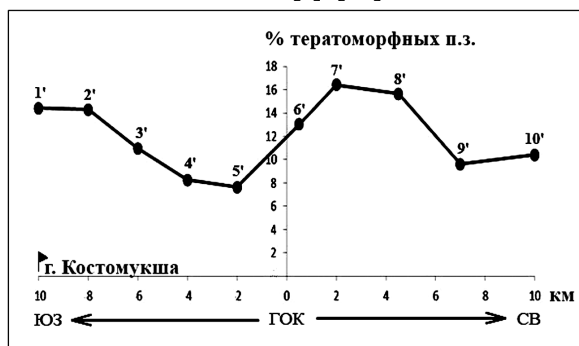


Рис. 3. Зависимость количества тератоморфных пылевых зерен (%) от расстояния до комбината (1'–10' – номера проб)

В ЮЗ направлении количество нарушений несколько ниже около комбината, но увеличивается по мере приближения к городу. Это подтвердил и статистический анализ: количество аномальных пылевых зерен значительно увеличивается ($R^2 = 0,934^{**}$, ОРА). Однако содержание тератоморфной пыльцы на территории города в 4 раза больше, чем в окрестностях ГОКа. Между выборками с территории города и на разном удалении от комбината наблюдаются достоверные различия ($F = 57,8^{***}$, ОДА). Эти данные свидетельствуют о слабом влиянии ГОКа на состояние природной среды города, при этом сочетание аэровыбросов комбината и инфраструктуры города сильнее воздействует на мужские генеративные органы сосны. Довольно высокое содержание дефектных пылевых зерен получено для пробной площади на расстоянии 20 км от комбината в условно чистом в отношении промышленных выбросов районе. Анализ этой территории показал, что вблизи от места отбора проб располагаются дачные участки, где весной интенсивно сжигается мусор, что, как показано в [8], [12], оказывает негативное воздействие на процессы формирования пыльцы.

На территории города распространение аномальной пыльцы неравномерное. Наибольшее количество тератоморфной пыльцы на пробных

площадях 1, 6 и 8 значительно отличается ($F = 14,8^{**}$, ОДА) от остальных проб. Особенностью данных пробных площадей является использование их под стоянки для автотранспорта и как свалки, что также может увеличивать количество аномально развитой пыльцы [12]. Остальные пробные площади расположены ближе к лесу и испытывают меньшую антропогенную нагрузку, что проявляется в увеличении процента нормально развитых пылевых зерен в пробах.

В результате анализа полученных данных было выявлено всего 11 типов нарушений, описанных в литературе [8], [18]. Все они были зафиксированы в пробах, отобранных с территории города, 9 типов нарушений – в пробах на разном удалении от комбината (по трансекте), 5 типов – в 20 км от города в восточном направлении и 7 типов – на контрольных пробных площадях. Большинство нарушений пыльцы связано со строением пылевых мешков, эскины и отсутствием внутреннего содержимого. Данные типы нарушений присутствуют во всех пробах. Отклонения в размерах пыльцы, которые считаются самым нестабильным признаком пылевых зерен представителей рода *Pinus* L. [10], в данном исследовании были встречены в незначительных количествах (менее 1 %).

Исследование показало, что выбросы комбината, которые ориентированы в северо-восточном направлении в соответствии с розой ветров, оказывают существенное влияние на развитие пыльцы, и на расстоянии 2–4 км выявляются максимальные значения нарушений (рис. 3), что связано с особенностями аэротехногенных выбросов ГОКа. Этот факт свидетельствует о негативном действии ГОКа на лесные экосистемы вблизи комбината. В юго-западном направлении количество тератоморфной пыльцы остается низким около комбината и начинает увеличиваться только по мере приближения к городу, где и достигает максимальных значений. Эти наблюдения свидетельствуют о том, что действие ГОКа на состояние природной среды города минимально. Большее число нарушений в развитии пыльцы на территории города может свидетельствовать о других ведущих факторах загрязнения, которые связаны с жизнедеятельностью города.

Н. А. Калашник с соавторами [16] предложено районирование территорий по результатам палинологического анализа (по количеству нормально развитых пылевых зерен). Согласно данной классификации, пробы пыльцы условно чистых территорий содержат более 90,0 % нормально развитой пыльцы, умеренно загрязненных – 89,4–82,9 %, сильно загрязненных – 82,3–75,2 %, критически загрязненных – 68,6–62,0 % и менее нормально развитой пыльцы. В соответствии с этой классификацией территорию города Костомукши можно отнести к зоне критического загрязнения (нормально развитой пыльцы около 57 %), окрес-

тности комбината – к умеренно загрязненной территории (нормально развитой пыльцы до 88 %), территорию на удалении 20 км – к сильно загрязненной территории (нормально развитой пыльцы 79,6 %), а территорию контроля – к условно чистой (около 95 % нормально сформированной пыльцы).

Таким образом, в радиусе 20 км от города по степени загрязнения можно выделить 4 зоны в зависимости от действия ведущих факторов. Так, на территорию города в основном влияют выбросы автотранспорта и деятельность челове-

ка. На территории дачных участков наибольший вред приносит сжигание мусора, которое интенсивно ведется как раз в период формирования пыльцы. Выбросы ГОКа также оказывают негативное воздействие, которое наиболее сильно проявляется в направлении преобладающих ветров. Наименее нарушенной оказалась зона контроля, вдали от источников загрязнения, рядом с территорией заповедника, где содержание тератоморфных пыльцевых зерен в пробах не превышает уровня естественной полиморфности пыльцы *P. sylvestris*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование / Под ред. О. П. Мелеховой, Е. И. Егоровой. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 288 с.
2. Василевская Н. В., Тумарова Ю. М. Оценка стабильности развития популяций *Pinus Sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения (Мурманская область) // Труды Карельского научного центра РАН. Биогеография Карелии. Вып. 7. Петрозаводск, 2005. С. 19–23.
3. Владимирова О. С., Муратова Е. Н., Седаева М. И. Пыльца ели сибирской, произрастающей в различных экологических условиях // Хвойные бореальной зоны. 2008. № 1–2. С. 98–102.
4. Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние сосновых лесов Северной Карелии / Сост.: И. П. Лазарева и др. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. 51 с.
5. Волкова М. В. Влияние промышленного загрязнения воздуха на морфометрические и анатомические показатели вегетативных органов древесных растений // Экология и защита леса: Межвуз. сб. науч. тр. СПб.: ЛТА, 1992. С. 19–24.
6. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2009 г. / Министерство сельского, рыбного хозяйства и экологии РК. Петрозаводск, 2010. 296 с.
7. Горшков М. В. Экологический мониторинг: Учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. 313 с.
8. Дзюба О. Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра, 2006. 197 с.
9. Дзюба О. Ф. Тератоморфные пыльцевые зерна в современных и палеопалинологических пыльцевых спектрах и некоторые проблемы палиностратиграфии // Нефтегазовая геология: Теория и практика. 2007. № 2. С. 1–22.
10. Дзюба О. Ф., Куликова Н. К., Токарев П. И. О естественном полиморфизме пыльцы *Pinus sylvestris* L. в связи с некоторыми проблемами палеопалинологии // Палинология: теория и практика: Материалы конф. (27 сентября – 1 октября, 2005 г.). М., 2005. С. 65–68.
11. Захаров В. М. Онтогенез и популяция (стабильность развития и популяционная изменчивость) // Экология. 2001. № 3. С. 164–168.
12. Ибрагимова Э. Э. Индикация загрязнения окружающей среды в урбанизированных экосистемах с использованием пыльцы *Pinus sylvestris* L. // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер. «Биология, химия». 2009. Т. 22(61). № 4. С. 54–65.
13. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Элементарная биометрия: Учеб. пособие. Петрозаводск, 2005. 104 с.
14. Илюха О. П. История Костомукши: Документы и материалы. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1994. 367 с.
15. Кайбияйнен Л. К., Болондинский В. К., Софронова Г. И., Ялынская Е. Е. Мониторинг физиологического состояния древесных растений в зонах техногенных воздействий // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 100–114.
16. Калашник Н. А., Ясowieва С. М., Преснухина Л. П. Аномалии пыльцы хвойных видов деревьев при промышленном загрязнении на Южном Урале // Лесоведение. 2008. № 2. С. 33–40.
17. Крутских Н. В., Лаврова Н. Б. Загрязнение почв г. Петрозаводска тяжелыми металлами и некоторые аспекты палиноиндикации // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 13. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 153–157.
18. Мельникова Т. А. Аномальная пыльца рода *Pinus* L. как индикатор палеоклиматических флюктуаций в позднем голоцене // Вестник ДВО РАН. 2004. № 3. С. 178–182.
19. Мельникова Т. А. Морфологические аномалии ископаемой пыльцы сосен // Палинология: теория и практика: Материалы конф. (27 сентября – 1 октября, 2005 г.). М., 2005. С. 158–159.
20. Новицкая Л. Л., Бумагина З. Д., Веселкова Л. Л., Житкова Е. А. Структурные особенности клеток мезофилла хвои сосны обыкновенной, произрастающей в районе Костомукшского ГОКа // Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1996. С. 51–63.
21. Носкова Н. Е., Третьякова И. Н., Носков Е. А. Особенности формирования мужской генеративной сферы сосны обыкновенной в условиях техногенеза // Хвойные бореальной зоны. 2006. Т. XXIII. № 2. С. 211–214.
22. Паушева З. П. Практикум по цитологии растений. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1988. 271 с.
23. Сазонова Т. А., Теребова Е. Н., Галибина Н. А., Таланова Т. Ю., Шредерс С. М., Чиненова Л. А., Канючкова Г. К. Оценка функционального состояния *Pinus sylvestris* L. в условиях слабого загрязнения // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России. Петрозаводск, 2001. С. 157–174.
24. Синькевич С. М. Динамика древесного прироста в зонах техногенных эмиссий // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 130–143.
25. Токарева Т. Г. О некоторых показателях для оценки реакций хвойных пород на воздействие промышленных эмиссий // Экология и защита леса: Межвуз. сб. науч. тр. СПб.: ЛТА, 1992. С. 15–19.
26. Фуксман И. Л., Ивонис И. Ю., Габукова В. В., Новицкая Л. Л., Шуляковская Т. А. Основные физиолого-биохимические показатели ранней диагностики состояния соснового древостоя в условиях техногенного загрязнения // Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск, 1996. С. 40–52.