

**Тератоморфизм пыльцы *Pinus sylvestris* L.
в условиях промышленного загрязнения городской среды**

© 2026. Н. В. Василевская, д. б. н., профессор,
П. В. Осечинская, магистр,
Мурманский арктический университет,
183010, Россия, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13,
e-mail: n.v.vasilevskaya@gmail.com

В статье представлены результаты анализа пыльцы сосны (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в условиях промышленного города Апатиты, расположенного за полярным кругом. Пробные площадки заложены в импактной зоне обогатительной фабрики АНОФ-2, где происходит переработка апатит-нефелиновых руд, и хвостохранилища. В результате палиноморфологического анализа пыльцы сосны выявлено 23 тератоморфы с различными аномалиями развития: без воздушных мешков, с их редукцией, одномешковые, разномешковые, с их асимметричным расположением и нарушением развития, с одним линзовидным или воротничковым воздушным мешком, карликовые (в том числе безмешковые, с их редукцией, одномешковые, с петлеобразно разросшейся экзиной), с разрывами экзины, редуцированным телом, гигантские с нормально развитыми воздушными мешками и их патологиями (одномешковые, безмешковые, разномешковые, с их редукцией, с воротничковым воздушным мешком и с нарушениями экзины), с крупными поперечными или продольными трещинами в центре тела пыльцевого зерна, полиады. Содержание пыльцы *P. sylvestris* с аномалиями развития в протестированных образцах очень высокое (80,4–90,4 %). Наиболее распространёнными тератоморфами являются пыльцевые зёрна нормальных, карликовых и гигантских размеров с патологиями воздушных мешков. Образование большого количества генетически аномальных форм пыльцы *P. sylvestris* и особенности её тератологий свидетельствуют о высоком уровне загрязнения среды г. Апатиты. Пыльца сосны может использоваться как биомонитор для выявления фитотоксического и мутагенного действия поллютантов.

Ключевые слова: пыльца, тератогенез, *Pinus sylvestris*, промышленное загрязнение, Субарктика.

***Pinus sylvestris* L. pollen teratomorphism under conditions
of industrial pollution of the urban environment**

© 2026. N. V. Vasilevskaya ORCID: 0000-0002-6926-9353
P. V. Osechinskaya ORCID: 0000-0002-4292-360X
Murmansk Arctic University,
13, Sportivnaya St., Murmansk, Russia, 183010,
e-mail: n.v.vasilevskaya@gmail.com

The article presents the results of the palynological analysis of *Pinus sylvestris* L. growing in the Apatity industrial city, located above the Arctic Circle (Murmansk Region, Russia). Apatity is impacted by the Apatit JSC, which is one of the world leaders in the production of phosphate raw materials for mineral fertilizers. Four sample plots are laid in the impact zone of the apatite-nepheline processing plant (ANPP-2) and its tailing dump. At the end of June microstrobils with mature pollen (N = 35) are collected at each sample plot and fixed in a 40 % alcohol solution. For palynological analysis, the pollen was stained by Lugol's solution. The studies were carried out by light microscopy, with a 200 magnification. As a result of palynomorphological analysis of pine pollen samples, 23 teratomorphs with various developmental anomalies were identified: without sacchi, with their reduction, with a single saccus, with two dissimilar sacchi, with their asymmetric arrangement and developmental disorders, with one lenticular or collar saccus, dwarf (including without sacchi, with their reduction, with a single saccus, with a loop-like overgrown exine), with exine ruptures, with reduced body, giant with normally developed sacchi or with their pathologies (with a single saccus, without sacchi, with two dissimilar sacchi, with their reduction, with a collar saccus and with exine disorders), with large transverse or longitudinal cracks in the center of the pollen grain body, polyads. The teratomorphic pollen content in the tested samples is very high (80.4–90.4 %). The most common teratomorphs are pollen grains of normal, dwarf and giant sizes with anomalies in the development of sacchi. Such pollen loses not only its ability of long-range transport through air, but also its ability to pollinate and fertilize. From the adaptive evolution point of view, the bilaterally symmetrical sacchi of coniferous pollen, first of all are balancers on the ovule nucellus. Violation of their morphological structure does not allow them to

perform this function and limit reproduction. A large quantity of genetically abnormal *P. sylvestris* pollen forms and the peculiarities of its teratology indicate a high level of environmental pollution of the city of Apatity. Due to its sensitivity to pollutants *P. sylvestris* pollen can be used as a biomonitor to detect the phytotoxic and mutagenic effects of them.

Keywords: pollen, teratogenesis, *Pinus sylvestris*, industrial pollution, Subarctic.

Экологическая палинология – новое направление экологических исследований, активно развивающееся в последние десятилетия. Пыльцевой анализ обычно используется для палеогеографических и палеогеоэкологических реконструкций, сравнительно недавно этот метод стали применять для оценки качества окружающей среды (ОС) [1]. На урбанизированных территориях проводятся исследования с целью использования пыльцы в качестве биомониторов для улавливания тяжёлых металлов и других поллютантов [2], изучения её аномалий развития и жизнеспособности [3, 4], аллергенности [5], палиноиндикации ОС [1, 6]. Пыльца различных видов растений является биоиндикатором качества атмосферного воздуха в условиях повышенной транспортной нагрузки [7–9], импактных зон промышленных предприятий [10, 11]. Под воздействием промышленных эмиссий растения продуцируют большое количество тератоморфных и стерильных пыльцевых зёрен. При этом с ухудшением экологической обстановки увеличивается содержание патологической пыльцы [1, 6, 10]. Особую актуальность приобретают исследования в области экологической палинологии хвойных урбанизированных и промышленных территорий [6, 11–13]. В Российской Субарктике такие исследования немногочисленны [10, 14, 15]. В качестве тест-объекта для определения уровня загрязнения атмосферного воздуха часто используют *Pinus sylvestris* L., поскольку в условиях экологического стресса у неё отмечается увеличение тератоморфоза пыльцы [6, 10].

Цель работы – изучение тератоморфизма пыльцы *Pinus sylvestris* L. в условиях промышленного загрязнения г. Апатиты.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является сосна обыкновенная, широко распространённая в городах Мурманской области. В г. Апатиты *P. sylvestris* в основном произрастает на окраинах города в составе еловых и сосновых лесов с примесью берёзы [16]. Пыльцевые зёрна *P. sylvestris* – двухмешковые, гетерополярные, билатерально-симметричные. Воздушные

мешки продолговато-эллиптической формы, резко отделены от пыльцевого зерна и смещены на дистальную сторону [1].

Исследования проведены в г. Апатиты, который расположен за Полярным кругом, в предгорьях Хибин (67°34'03" с. ш., 33°23'36" в. д.), в подзоне северо-таёжных лесов. Город находится в зоне промышленного воздействия комбината «Апатит», одного из лидеров среди мировых производителей фосфатного сырья для минеральных удобрений [17]. В состав горно-обогатительного комплекса входят рудники, обогатительные фабрики (АНОФ-2 и АНОФ-3), хвостохранилище и ряд цехов. В выбросах АО «Апатит» содержатся стронций, цинк, фосфор, кальций, натрий, калий, алюминий, азотные соединения и железо. Апатитовая пыль содержит некоторое количество естественных радионуклидов [17]. Отходы обогащения апатит-нефелиновых руд складываются в хвостохранилище, расположенном на берегу губы Белой озера Имандра, в 9 км от г. Апатиты [18]. Хвостохранилище АНОФ-2 принимает хвосты флотации апатит-нефелиновых руд и золу Апатитской ТЭЦ, их совместное хранение нарушает законодательную и традиционную практику горно-химических производств России [19]. Отходы обогащения состоят из фракции тонкодисперсных нефелиновых песков, которые при сильных ветрах переходят в аэрозольное состояние, формируя пылевые облака, и переносятся на дальние расстояния [20]. Атмосферный воздух г. Апатиты сильно загрязнён пылью, которая содержит токсичные соединения. Содержание стронция в 4 раза превышает фоновые значения, меди – в 2 раза, фосфатов – в 10 раз, сульфатов и фторидов – в 3 раза [21].

В мае 2020 г. в окрестностях г. Апатиты заложено четыре пробные площадки: ПП₁ – «Хвостохранилище», представляет собой лесной ценоз в 2 км от центра хвостохранилища АНОФ-2 в юго-восточном направлении; ПП₂ – «АНОФ-2», лесной ценоз в 1 км от обогатительной фабрики АНОФ-2 в юго-восточном направлении; ПП₃ – «ул. Козлова», лесопарковая зона на северной окраине г. Апатиты, в 3,8 км от центра АНОФ-2 и 35 м от железной дороги; ПП₄ – «Любкино болото», лесопарк

в юго-восточной части г. Апатиты, в 5,7 км от центра фабрики АНОФ-2. «Любкино болото» – уникальный природный объект, на территории которого произрастает 11 видов орхидей, включённых в Красную книгу Мурманской области и Красную книгу Восточной Фенноскандии [22]. Контрольная площадка заложена в пос. Верхнетуломский, в 130 км от г. Апатиты. На территории и в окрестностях посёлка отсутствуют экологически опасные промышленные объекты.

В конце июня, в период массового пыления сосны, на каждой пробной площадке с 5 деревьев *P. sylvestris* собрано по 7 микростробил с созревшей пыльцой (N = 35). Мужские шишки подсушивали и фиксировали в 40 % растворе спирта. Собранный материал хранился в холодильнике при температуре 0–4 °С. Для пыльцевого анализа использовали микроспорофиллы из средней части микростробил, пыльцу окрашивали раствором Люголя. Исследования проводили методом световой микроскопии, с увеличением в 200 раз. Палинологический анализ выполнялся по микрофотографиям, выполненным через окуляр микроскопа 13-мегапиксельной камерой Xiaomi Redmi Note 5A Prime. На основе микросъёмки препаратов в каждой пробе описывалось по 550 пыльцевых зёрен. Тератоморфы выделяли на основе аномалий

развития пыльцы *P. sylvestris* согласно работе [1], определяли количество и процентное содержание нормальной и тератоморфной пыльцы в пробах.

Результаты и обсуждение

В результате палиноморфологических исследований определено, что наибольшее количество нормальной, морфологически неизменённой пыльцы *P. sylvestris* содержится в образцах контроля (рис. 1). В г. Апатиты и его окрестностях доля типичной пыльцы очень низкая и варьирует от 9,6 % (ПП₂) до 19,6 % (ПП₁). Во всех пробах выявлены пыльцевые зёрна сосны, не соответствующие по своим морфологическим характеристикам общепринятой норме. Нетипичные (тератоморфные) пыльцевые зёрна отличаются от нормальных формой, размерами, наличием аномалий развития.

В протестированных пробах из г. Апатиты выделено 23 тератоморфы пыльцы *P. sylvestris* (рис. 2), их содержание очень велико (80,4–90,4 %) (рис. 1). Больше всего аномальной пыльцы в пробе ПП₂ (90,36%). Однако самый высокий уровень полиморфизма пыльцы отмечен в образцах ПП₁ – 23 тератоморфы. В пос. Верхнетуломский (контроль), расположенном на большом удалении от г. Апатиты и других промышленных центров Мурман-

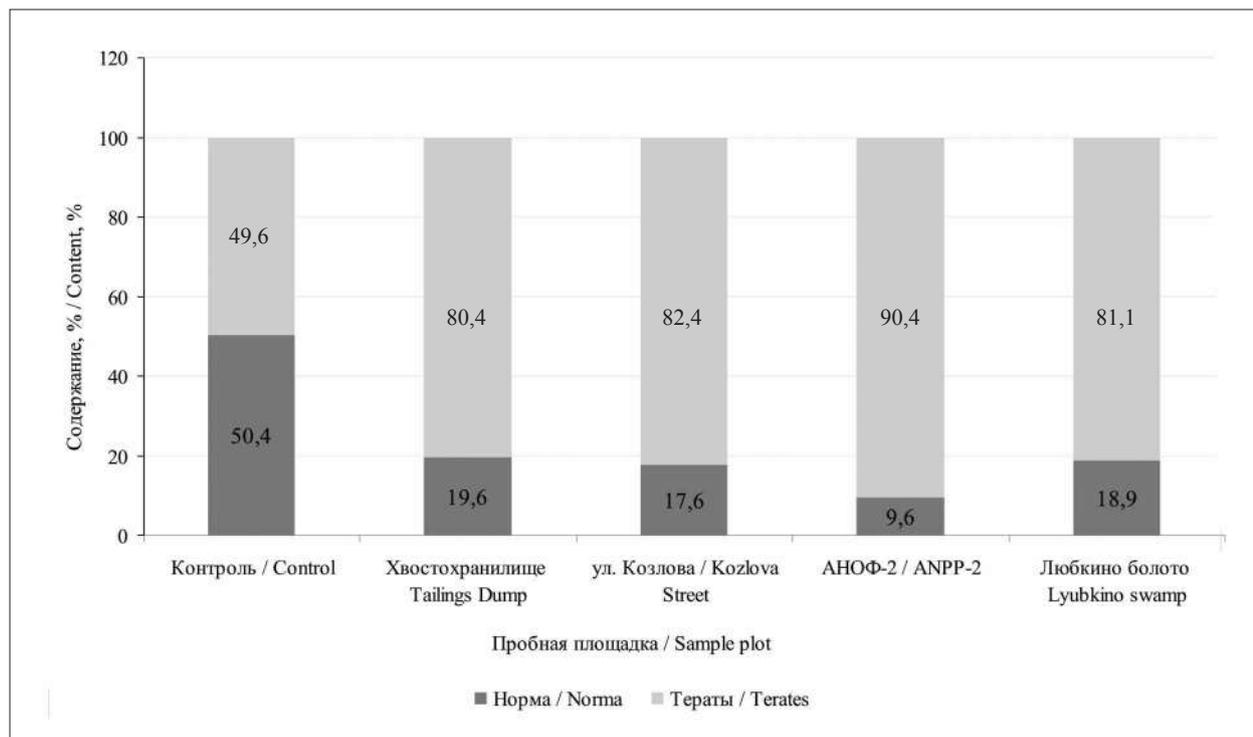


Рис. 1. Соотношение нормальной и тератоморфной пыльцы *Pinus sylvestris*, %.
 Fig. 1. The ratio of *Pinus sylvestris* normal and teratomorphic pollen, %.

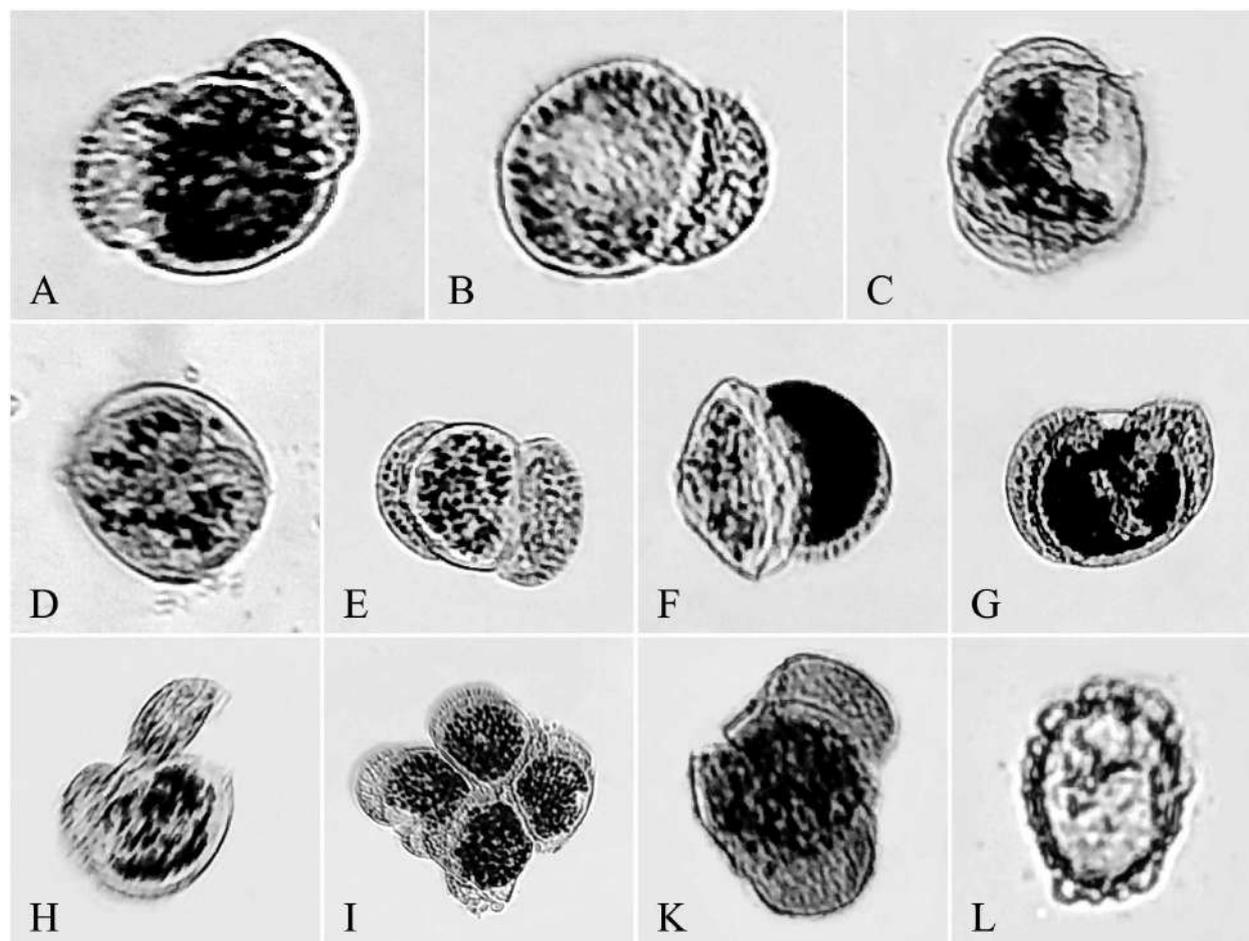


Рис. 2. Тератоморфы пыльцы *P. sylvestris*: А – нормальное, В – одномешковое, С – с редукцией воздушных мешков, D – без воздушных мешков, E – двухразномешковое, F – с линзовидным воздушным мешком, G – с воротничковым воздушным мешком, H – с нарушениями воздушных мешков, I – полиада, K – с трещиной в экзине, L – карликовое с петлеобразными наростами на экзине
Fig. 2. Teratomorphs of *P. sylvestris* pollen: A – normal, B – with a single saccus, C – with reduced sacci, D – without sacci, E – with two dissimilar sacci, F – with one lenticular saccus, G – with collar-like saccus, H – with disorders of saccus, I – polyads, K – with crack in exine, L – dwarf with loop-like growths on the exine

ской области, выделено 16 тератоморф. Это свидетельствует об очень высокой чувствительности *P. sylvestris* к загрязнению среды и дальнем атмосферном переносе аэрозолей от предприятий.

Наиболее часто встречается пыльца нормальных размеров с патологиями развития воздушных мешков: с их редукцией, безмешковая, одномешковая, разномешковая, с асимметричным расположением, нарушениями развития, со сросшимися воздушными мешками (линзовидным и воротничковым) (рис. 2). Высокая суммарная доля пыльцы с такими патологиями выявлена в пробах ПП₄ (59,6 %), ПП₂ (53 %), ПП₃ (52 %), что является индикатором воздействия пылевых выбросов комбината «Апатит». По данным экологического мониторинга, проведённого учёными МГУ

им. М. В. Ломоносова, г. Апатиты и, особенно его северо-восточные и восточные районы, находятся под влиянием деятельности АНОФ-2 и пыления хвостохранилища [21]. Самой распространённой тератоморфой *P. sylvestris* является редукция пыльцевых мешков (рис. 2С, рис. 3). Такая аномалия развития считается наиболее характерной для мужского гаметофита сосны. В образцах выявлено много безмешковой пыльцы (рис. 2D), особенно на ПП₃ (рис. 3). Содержание одномешковых пыльцевых зёрен (рис. 2B) значительно ниже (рис. 3). Реже встречаются разномешковые (0,55–3,82 %) (рис. 2E), с их асимметричным расположением (1,82–4,0 %), с линзовидным (0,73–1,45 %) (рис. 2F) воздушным мешком. Во всех образцах, кроме контроля, выявлена пыльца с воротничковым сплошным полусфе-

рическим мешком (0,55–3,27 %) (рис. 2G); на ПП₂ и ПП₄ её содержание максимально. Такая тератоморфа встречается у сосны только в условиях очень сильного загрязнения среды [11].

В образцах пыльцы *P. sylvestris* из г. Апатиты часто встречаются гигантские экземпляры, в 1,5 раза больше типичных, предположительно диплоидные, в том числе с аномалиями развития воздушных мешков и экзины (одномешковая, безмешковая, разномешковая, с их редукцией, с воротничковым воздушным мешком, с нарушениями экзины). Наибольшее суммарное содержание гигантской пыльцы с различными патологиями выявлено в образцах ПП₁, ПП₂, ПП₃ (рис. 4). Появление гигантской пыльцы связано с нарушениями мейоза под воздействием мутагенов различной природы. В пробах выявлено много карликовой пыльцы *P. sylvestris*, в том числе с аномалиями развития воздушных мешков (с их редукцией, одномешковые, безмешковые), её суммарное содержание максимально в пробах ПП₁, ПП₂, ПП₃ (рис. 4). Особенно высока доля карликовых безмешковых пыльцевых зёрен (7,3–13,1 %), в большинстве слу-

чаев они стерильны. В образцах с площадок ПП₁, ПП₂ и ПП₄ обнаружена безмешковая нанопыльца с петлеобразным разрастанием экзины (0,4–1,6 %) (рис. 2L), она также стерильна. Особенностью патоморфоза пыльцы *P. sylvestris* в зоне промышленного воздействия АО «Апатит» являются пыльцевые зёрна с крупными поперечными или продольными трещинами (открытыми или закрытыми) в центре тела, их максимальное содержание выявлено в пробах ПП₁ и ПП₂, в контроле они отсутствуют (рис. 2K, рис. 4).

В палинотератном комплексе *P. sylvestris* г. Апатиты встречаются пыльцевые зёрна с нарушениями экзины (1,1–5,1 %), с редуцированным телом (0,4–1,1 %). В образцах площадок ПП₁ и ПП₃ выявлены полиады (0,2–0,4 %) (рис. 2I).

Исследования показали, что в палинотератном комплексе *P. sylvestris* г. Апатиты и его окрестностей высоко содержание тератоморф пыльцы нормальных, карликовых и гигантских размеров с аномалиями развития воздушных мешков. Известно, что размеры пыльцевых зёрен являются стабильным видовым признаком и характеризуются очень низ-

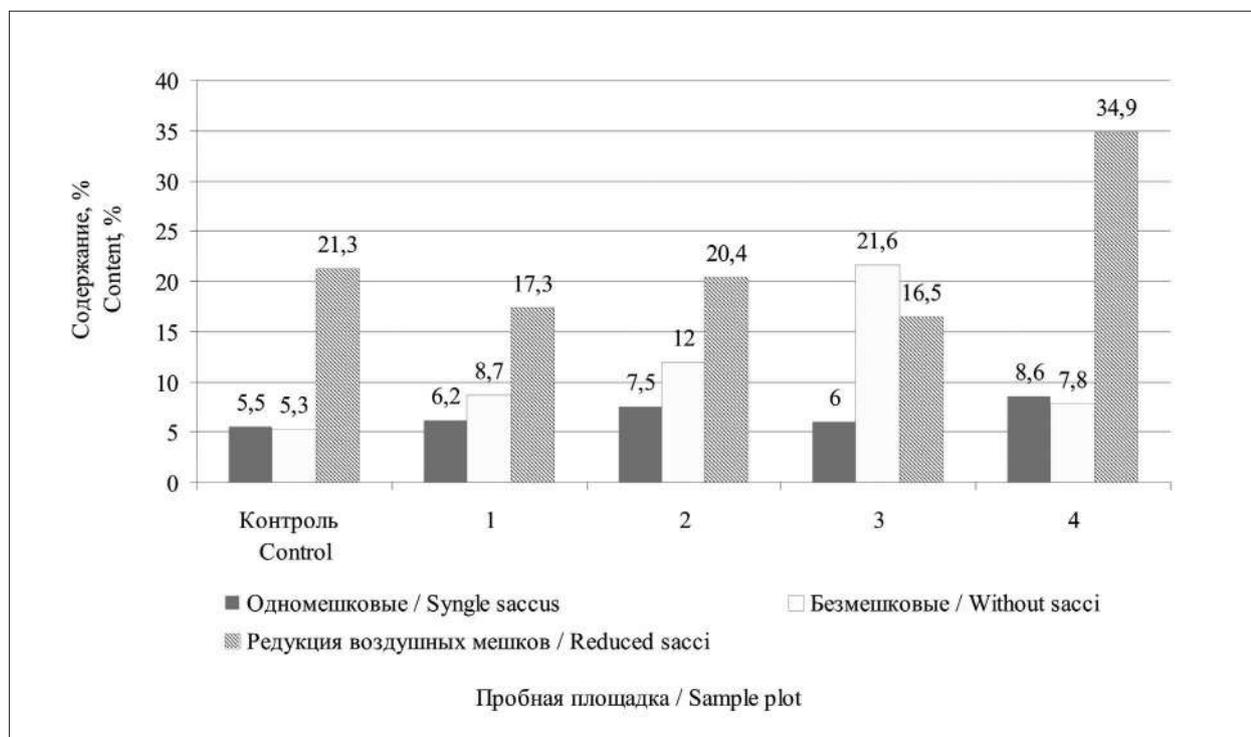


Рис. 3. Соотношение пыльцы *P. sylvestris* с различными патологиями воздушных мешков (%).

Примечание: здесь и на рис. 4 размещение пробных площадок см. в тексте

Fig. 3. The ratio of *P. sylvestris* pollen with different pathologies in the sacci (%).

Note: here and in Fig. 4: control plot – in the village Verkhnetulomsky, in 130 km from Apatity; sample plots: 1 – forest cenosis in 2 km to south-east from the apatite-nepheline processing plant (ANPP-2) tailing dump; 2 – forest cenosis in 1 km to south-east from the ANPP-2; 3 – forest park area in the northern Apatity, in 3.8 km from the ANPP-2 and 35 m from the railway; 4 – Lyubkino swamp – forest park to the southeast of Apatity, in 5.7 km from the ANPP-2

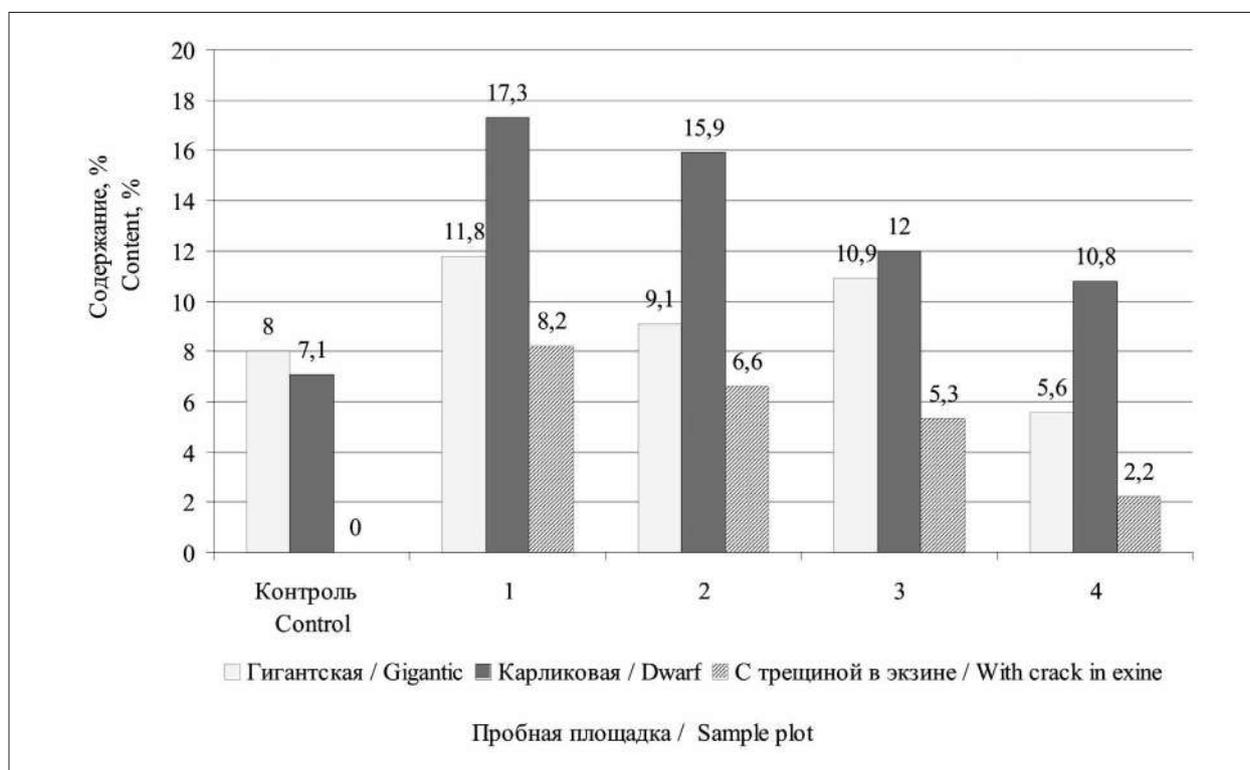


Рис. 4. Соотношение карликовой и гигантской пыльцы *P. sylvestris* (в том числе с нарушениями воздушных мешков) и с трещиной в центре тела (%)
Fig. 4. The ratio of dwarf and giant *P. sylvestris* pollen (including those with violations of the sacci) and with a crack in the center of the body (%)

кой индивидуальной, внутривидовой географической изменчивостью [23]. Размеры пыльцы незначительно варьируют в природных популяциях, в отличие от импактных зон. В работе [24] отмечено, что при геоботанических стрессах общей тенденцией тератоморфоза является нанизм пыльцевых зёрен. На образование мелкой пыльцы вследствие сухости воздуха в условиях промышленного загрязнения указывают многие авторы [1, 11]. В то же время показано [25], что карликовая пыльца образуется при нарушениях мейоза, утрачивая часть генетического материала в результате повреждения веретена деления или хромосомных мутаций. Высокое содержание в пробах из г. Апатиты гигантских пыльцевых зёрен *P. sylvestris* с различными нарушениями развития воздушных мешков также является следствием мутагенеза и нарушения процесса мейоза. Такая пыльца, с огромным телом и карликовыми мешками, и наоборот, описана при исследовании природных геоботанических катастроф [24]. Пыльца *P. sylvestris* с патологиями развития пыльцевых мешков утрачивает не только возможность дальнего переноса по воздуху, но и способность к опылению. С точки зрения адаптивной эволюции, билатерально-симметричные воз-

душные мешки пыльцы хвойных выполняют роль балансиров на нуцеллусе семязпочки [26]. Нарушение их морфоструктуры не позволяет им выполнять эту функцию и, таким образом ограничивает репродукцию. Особенностью патоморфоза *P. sylvestris* в зоне промышленного воздействия концерна «Апатит» является частая встречаемость пыльцы с крупными поперечными или продольными трещинами в центре тела, а также карликовые пыльцевые зёрна с петлеобразным разрастанием экзины. Аналогичные тератоморфы были выявлены около атомной станции в г. Соновый Бор Ленинградской области [27], они рассматриваются как индикаторы присутствия радионуклидов и высокого уровня загрязнения среды.

Уровень тератоморфоза пыльцы сосны в г. Апатиты превышает аналогичные показатели в промышленных городах Севера России, где проводились аналогичные исследования [6, 10, 11, 15]. В г. Мончегорске – центре цветной металлургии Мурманской области, доля тератоморфной пыльцы *P. sylvestris* варьировала в образцах из разных районов города от 10 до 55 % [10], в Мурманске от 54,2 до 70,6 % [15]. В г. Костомукше (Республика Карелия), расположенном в импактной зоне комбина-

та «Карельский окатыш», доля аномальной пыльцы сосны в среднем составила 43 % [6].

Заключение

Палиноморфологические исследования *P. sylvestris* впервые проведены в г. Апатиты, в импактной зоне фабрики АНОФ-2 по обогащению апатит-нефелиновых руд и хвостохранилища, где складываются отходы их переработки. На всех пробных площадках выявлен высокий уровень тератогенеза пыльцы (80,4–90,4 %), в то время как содержание аномальных пыльцевых зёрен сосны в популяциях северных лесных экосистем не превышает 3–7 %. Аномалии в развитии пыльцы *P. sylvestris* в г. Апатиты свидетельствуют о том, что пыльники микростробил подвергаются воздействию токсичных пылевых выбросов АНОФ-2 и хвостохранилища, что приводит к нарушениям микрогаметогенеза и исключает возможность участия пыльцы в процессах опыления и оплодотворения. У пыльцы сосны происходят генетические нарушения процессов морфогенеза, наиболее распространёнными аномалиями развития являются: редукция воздушных мешков, их отсутствие, срастание с образованием линзовидного или воротничкового мешка, одномешковость, а также гигантская и карликовая пыльца с различными тератологиями воздушных мешков. Образование большого количества генетически аномальных форм пыльцы сосны и особенности её тератологий свидетельствуют о высоком уровне загрязнения среды г. Апатиты. Полученные результаты подтверждают данные экологического мониторинга, проведённого учёными МГУ им. М. В. Ломоносова, и свидетельствуют о высоком уровне загрязнения атмосферного воздуха города токсичными соединениями. Исследования показали, что пыльца *P. sylvestris* может использоваться как биоиндикатор для выявления фитотоксического и мутагенного действия поллютантов, что согласуется с результатами эколого-палинологического анализа пыльцы сосны, проведённого в некоторых промышленных центрах России. Это обусловлено высокой чувствительностью пыльцы к действию загрязнителей и тем, что именно в гаплоидном состоянии проявляются летальные мутации. Для того, чтобы выявить причины тератоморфизма пыльцы *P. sylvestris* под воздействием промышленных выбросов комбината «Апатит» и уточнить экологические причины генетических воздействий, необходим долгосрочный мониторинг.

Литература

1. Дзюба О.Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра, 2006. 197 с.
2. Kalbande D.M., Dhadse S.N., Chaudhari P.R., Wate S.R. Biomonitoring of heavy metals by pollen in urban environment // Environ. Monit. Assess. 2008. V. 138. P. 233–238. doi: 10.1007/s10661-007-9793-0
3. Comtois P., Schemenauer R.S. Tree pollen viability in areas subject to high pollutant deposition // Aerobiologia. 1991. V. 7. P. 144–151. doi: 10.1007/BF02270683
4. Gottardini E., Cristofolini F., Paoletti E., Lazzeri P., Pepponi G. Pollen viability for air pollution biomonitoring // J. Atmos. Chem. 2004. V. 49. P. 149–159. doi: 10.1007/s10874-004-1221-z
5. Namork E., Johansen B.V., Løvik M. Detection of allergens adsorbed to ambient air particles collected in four European cities // Toxicol. Lett. 2006. V. 165. No. 1. P. 71–78. doi: 10.1016/j.toxlet.2006.01.016
6. Ерохина И.С., Елькина Н.А., Марковская Е.Ф. Палиноиндикация природной среды г. Костомукши // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 6. С. 20–23.
7. Cerceau-Larrival M.Th., Bocquel C., Carbonnier-Jarreau M.C., Verhille A.M. Pollen: bio-indicator of pollution // J. Aerosol Sci. 1996. V. 27. Suppl. 1. P. S227–S228. doi: 10.1016/0021-8502(96)00186-3
8. Calzoni G.L., Antognoni F., Pari E., Fonti P., Gnes A., Speranza A. Active biomonitoring of heavy metal pollution using *Rosa rugosa* plants // Environ. Pollut. 2007. V. 149. No. 2. P. 239–245. doi: 10.1016/j.envpol.2006.12.023
9. Faur A., Șteflea F., Ciuciu A.E. Study on pollen viability as bioindicator of air quality // Annals of West University of Timișoara. Biology. 2012. V. 15. No. 2. P. 137–140.
10. Василевская Н.В., Петрова Н.В. Морфологическая изменчивость пыльцы *Pinus sylvestris* L. в условиях промышленного города (на примере г. Мончегорска) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 4. С. 7–11.
11. Третьякова И.Н., Носкова Н.Е. Пыльца сосны обыкновенной в условиях экологического стресса // Экология. 2004. № 1. С. 26–34.
12. Калашник Н.А., Ясовиева С.М., Преснухина Л.П. Аномалии пыльцы хвойных видов деревьев при промышленном загрязнении на Южном Урале // Лесоведение. 2008. № 2. С. 33–40.
13. Sheng X., Zhang S., Jiang L., Li K., Gao Y., Li X. Lead stress disrupts the cytoskeleton organization and cell wall construction during *Picea wilsonii* pollen germination and tube growth // Biol. Trace Elem. Res. 2012. V. 146. No. 1. P. 86–93. doi: 10.1007/s12011-011-9212-9
14. Vasilevskaya N.V., Domakhina A.D. Teratomorphism of pollen of *Larix sibirica* Ledeb. (*Pinaceae* Lindl.)

in the Arctic urbanized territory // Czech Polar Reports. 2018. V. 8. No. 1. P. 24–36. doi: 10.5817/CPR2018-1-2

15. Vasilevskaya N.V., Petrova N.V., Domakhina A.D. Palynoidication of the environment of industrial cities in the Far North // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021. V. 839. Article No. 052020. doi: 10.1088/1755-1315/839/5/052020

16. Мингалёва Т.А., Горячев А.А., Мингалёва Е.И., Мингалёв А.И. Социальные и экологические функции общественных парков малого города в условиях Севера (на примере города Апатиты Мурманской области) // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11. № 8. С. 179–195. doi: 10.37614/2307-5252.2020.2.8.019

17. Карначёв И.П., Жиров В.К., Загвоздина О.И., Крымская М.М. Эколого-гигиеническая оценка состояния окружающей среды в районе размещения Хибинского горно-химического комплекса Мурманской области // Вестник МГТУ. 2011. Т. 14. № 3. С. 552–560.

18. Терещенко С.В., Марчевская В.В., Павлишина Д.Н. Пути снижения негативного воздействия горного производства на окружающую природную среду // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. Т. 4. С. 62–66.

19. Приймак Т.И., Зосин А.П., Маслобоев В.А. Экологические аспекты гипергенеза минерального сырья в условиях субарктики. Апатиты: Кольский науч. центр РАН, 2013. 108 с.

20. Тимофеева Ю.Р., Степанова Е.А., Богданов В.Л. Биологическая рекультивация нарушенных земель горно-промышленным комплексом (на примере ОАО «Апатит») // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2016. № 42. С. 294–299.

21. Воробьевская Е.Л., Седова Н.Б., Слипенчук М.В., Цымбал М.Н. Геоэкологические исследования снега и поверхностных вод в зимний период в центральной части Кольского полуострова // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 64–70. doi: 10.25750/1995-4304-2020-1-064-070

22. Блинова И.В. Численность популяций орхидных и их динамика на северном пределе распространения в Европе // Ботанический журнал. 2009. Т. 94. № 2. С. 212–240.

23. Козубов Г.М. Биология плодоношения хвойных на Севере. Л.: Наука, 1974. 134 с.

24. Левковская Г.М. Зональные особенности современной растительности и рецентных спорово-пыльцевых спектров Западной Сибири // Методические вопросы палинологии: труды III Междунар. палинол. конф. М.: Наука, 1973. С. 116–120.

25. Бессонова В.П. Состояние пыльцы как показатель загрязнения среды тяжёлыми металлами // Экология. 1992. № 4. С. 45–50.

26. Токарев П.И. Морфология и ультраструктура пыльцевых зёрен. М.: Изд-во КМК, 2002. 51 с.

27. Дзюба О.Ф., Борейша И.К., Яковлева Т.П., Шейнерман Н.А., Надпорожская М.А. Качество пыльцы высших растений и некоторых клеточных структур животных организмов в условиях промышленной площадки ЛАЭС и города Сосновый Бор // Пыльца как индикатор состояния окружающей среды и палеоэкологические реконструкции. СПб: ВНИГРИ, 2001. С. 69–78.

References

1. Dzyuba O.F. Palynoidication of the environment quality. Sankt-Peterburg: Nedra, 2006. 197 p. (in Russian).

2. Kalbande D.M., Dhadse S.N., Chaudhari P.R., Wate S.R. Biomonitoring of heavy metals by pollen in urban environment // Environ. Monit. Assess. 2008. V. 138. P. 233–238. doi: 10.1007/s10661-007-9793-0

3. Comtois P., Schemenauer R.S. Tree pollen viability in areas subject to high pollutant deposition // Aerobiologia. 1991. V. 7. P. 144–151. doi: 10.1007/BF02270683

4. Gottardini E., Cristofolini F., Paoletti E., Lazzeri P., Peponi G. Pollen viability for air pollution biomonitoring // J. Atmos. Chem. 2004. V. 49. P. 149–159. doi: 10.1007/s10874-004-1221-z

5. Namork E., Johansen B.V., Løvik M. Detection of allergens adsorbed to ambient air particles collected in four European cities // Toxicol. Lett. 2006. V. 165. No. 1. P. 71–78. doi: 10.1016/j.toxlet.2006.01.016

6. Erokhina I.S., Elkina N.A., Markovskaya E.F. Palynoidication of the Kostomuksha environment // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2011. No. 6. P. 20–23 (in Russian).

7. Cerceau-Larrival M.Th., Bocquel C., Carbonnier-Jarreau M.C., Verhille A.M. Pollen: bio-indicator of pollution // J. Aerosol Sci. 1996. V. 27. Suppl. 1. P. S227–S228. doi: 10.1016/0021-8502(96)00186-3

8. Calzoni G.L., Antognoni F., Pari E., Fonti P., Gnes A., Speranza A.N. Active biomonitoring of heavy metal pollution using *Rosa rugosa* plants // Environ. Pollut. 2007. V. 149. No. 2. P. 239–245. doi: 10.1016/j.envpol.2006.12.023

9. Faur A., Șteflea F., Ciuciu A.E. Study on pollen viability as bioindicator of air quality // Annals of West University of Timișoara. Biology. 2012. V. 15. No. 2. P. 137–140.

10. Vasilevskaya N.V., Petrova N.V. Morphological variability of pollen of *Pinus sylvestris* L. in the conditions of industrial town (Russia, Monchegorsk) // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2014. No. 4. P. 7–11 (in Russian).

11. Tretyakova I.N., Noskova N.E. Scots pine pollen under environmental stress // Ecology. 2004. No. 1. P. 26–34 (in Russian).

12. Kalashnik N.A., Yasovieva S.M., Presnukhina L.P. Pollen anomalies of coniferous tree species under the industrial pollution in the Southern Urals // Lesovedenie. 2008. No. 2. P. 33–40 (in Russian).

13. Sheng X., Zhang S., Jiang L., Li K., Gao Y., Li X. Lead stress disrupts the cytoskeleton organization and cell wall construction during *Picea wilsonii* pollen germination and tube growth // Biol. Trace Elem. Res. 2012. V. 146. No. 1. P. 86–93. doi: 10.1007/s12011-011-9212-9
14. Vasilevskaya N.V., Domakhina A.D. Teratomorphism of pollen of *Larix sibirica* Ledeb. (*Pinaceae* Lindl.) in the Arctic urbanized territory // Czech Polar Reports. 2018. V. 8. No. 1. P. 24–36. doi: 10.5817/CPR2018-1-2
15. Vasilevskaya N.V., Petrova N.V., Domakhina A.D. Palynoidication of the environment of industrial cities in the Far North // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021. V. 839. Article No. 052020. doi: 10.1088/1755-1315/839/5/052020
16. Mingaleva T.A., Goryachev A.A., Mingaleva E.I., Mingalev A.I. Social and environmental functions of public parks of a small northern town (on the example of the Apatity town in the Murmansk region) // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. 2020. V. 11. No. 8. P. 179–195 (in Russian). doi: 10.37614/2307-5252.2020.2.8.019
17. Karnachev I.P., Zhiron V.K., Zagvozdina O.I., Krymskaya M.M. Ecological and hygienic assessment of the state of the environment in the area of the Khibiny mining and chemical complex of the Murmansk region // Vestnik of MSTU. 2011. V. 14. No. 3. P. 552–560 (in Russian).
18. Tereshchenko S.V., Marchevskaya V.V., Pavlishina D.N. Ways to reduce negative environmental impact of mining industry // Herald of the Kola Science Center of RAS. 2016. V. 4. P. 62–66 (in Russian).
19. Priymak T.I., Zosin A.P., Masloboev V.A. Ecological aspects of hypergenesis of mineral raw materials in the subarctic region conditions. Apatity: Kola Science Center RAS, 2013. 108 p. (in Russian).
20. Timofeeva Yu.R., Stepanova E.A. Bogdanov V.L. Biological reclamation of disturbed land on the industrial complex (for the example OJSC “Apatite”) // Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2016. No. 42. P. 294–299 (in Russian).
21. Vorobyevskaya E.L., Sedova N.B., Slipenchuk M.V., Cymbal M.N. Environmental situation in the central part of the Kola Peninsula // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 64–70 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-064-070
22. Blinova I.V. Number of individuals and dynamics of orchid populations at the northern limit of their distribution in Europe // Botanicheskii Zhurnal. 2009. V. 94. No. 2. P. 212–240 (in Russian).
23. Kozubov G.M. Biology of coniferous fruiting in the North. Leningrad: Nauka, 1974. 134 p. (in Russian).
24. Levkovskaya G.M. Zonal features of modern vegetation and recent spore-pollen spectra in Western Siberia // Methodical issues of palynology: trudy III Mezhdunarodnoy palinologicheskoy konferentsii. Moskva: Nauka, 1973. P. 116–120 (in Russian).
25. Bessonova V.P. Pollen state as an index of environmental pollution with heavy metals // Ekologiya. 1992. No. 4. P. 45–50 (in Russian).
26. Tokarev P.I. Morphology and ultrastructure of pollen. Moskva: KMK Publishing House, 2002. 51 p. (in Russian).
27. Dziuba O.F., Boreisha I.K., Yakovleva T.P., Sheynerman N.A., Nadporozhskaya M.A. The quality of higher plants pollen and some cellular structures of animals in the industrial site of the Leningrad Nuclear Power Plant and in Sosnovyy Bor city // Pollen as an indicator of environmental state and paleoecological reconstructions. Sankt-Peterburg: VNIGRI, 2001. P. 69–78 (in Russian).