УДК 502.175(470.21):[674.032.475.553:632.15]
https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-440-451

CC BY 4.0

Оригинальная статья

Полиморфизм пыльцы *Picea obovata* Ledeb. в условиях промышленного загрязнения арктического города

Н. В. Василевская✉, Д. В. Миронюк

Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Российская Федерация
✉n.v.vasilevskaya@gmail.com

Аннотация
Мурманская область является одной из наиболее урбанизированных и промышленно развитых территорий российского сектора Арктики. В регионе представлены горнодобывающая, металлургическая, энергетическая, пищевая промышленность. Исследования проведены в г. Мурманск – крупнейшем незамерзающем морском порту России, расположенном за Полярным кругом. Среди портов Северо-Запада России он занимает лидирующее место по объему перерабатываемых сухих грузов. Основными загрязнителями окружающей среды города являются полициклические ароматические углеводороды и летучие вещества (SO_2 и NO_2), тяжелые металлы, нефть. Биоиндикация качества окружающей среды города проведена с использованием новых методов экологической палинологии. Цель работы – изучение полиморфизма пыльцы *Picea obovata* Ledeb. в условиях промышленного загрязнения г. Мурманск. В импактной зоне предприятий города (городские ТЭЦ, мусоросжигательный и судоремонтный заводы) проведены палинологические исследования ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.). На каждой пробной площади маркировались по 5–6 деревьев, мужские шишки собирались во время пыления *P. obovata* в конце июня 2024 г. Исследования пыльцы проводились ацетокарминовым методом. Выявлен высокий уровень полиморфизма пыльцы, содержание в образцах пыльцевых зерен с аномалиями развития варьирует от 62,2 до 87,6 %, в контроле 25,8 %. Максимальное содержание тератоморф выявлено в образцах из окрестностей энергетических предприятий, работающих на угле и мазуте: Росляково Южное (87,6 %), Южная котельная (81,6 %), Мурманская ТЭЦ (76,4 %). Выделены три размерные группы тератоморфной пыльцы *P. obovata*: нормальная, карликовая и гипертрофированная с различными патологиями воздушных мешков и экзины. Образование большого количества генетически аномальных форм пыльцы *P. obovata* и особенности их тератологии свидетельствуют о высоком уровне загрязнения окружающей среды и воздействии мутагенов различной природы. Для экологической безопасности населения и снижения уровня загрязнения г. Мурманск необходимо использование экологически безопасных технологий производства и перевод городских котельных на природный газ.

Ключевые слова: биомониторинг, промышленное загрязнение, Арктика, *Picea obovata*, тератоморфизм пыльцы
Финансирование. Работа выполнена без внешнего финансирования.
Для цитирования: Василевская Н.В., Миронюк Д.В. Полиморфизм пыльцы *Picea obovata* Ledeb. в условиях промышленного загрязнения арктического города. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):440–451. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-440-451

Original article

Polymorphism of *Picea obovata* Ledeb. pollen under industrial pollution of the Arctic city

Natalia V. Vasilevskaya✉, Diana V. Mironyuk

Murmansk Arctic University, Murmansk, Russian Federation
✉n.v.vasilevskaya@gmail.com

Abstract
The Murmansk region is one of the most urbanized and industrially developed areas within the Russian Arctic sector, characterized by established mining, metallurgical, energy, and food industries. This study was conducted in Murmansk, Russia's largest ice-free seaport located beyond the Arctic Circle. Among the ports of Northwestern Russia,

© Василевская Н. В., Миронюк Д. В., 2025

Murmansk holds a leading position in terms of dry cargo throughput. The primary environmental pollutants in the city include polycyclic aromatic hydrocarbons, volatile substances such as SO_2 and NO_2, heavy metals, and oil. Bioindication of the city's environmental quality was performed using novel ecological palynology methods. The purpose of the work is to study the polymorphism of pollen of *Picea obovata* Ledeb. under conditions of industrial pollution in the city of Murmansk. Palynological studies of Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) were conducted within the impact zones of industrial enterprises, including combined heat and power (CHP) plants, waste incineration facilities, and ship repair plants. In each sampling plot, 5–6 trees were selected, and male cones were collected during the *P. obovata* pollination period at the end of June 2024. Pollen was examined using the acetocarmine staining method. A high degree of pollen polymorphism was observed, with the proportion of pollen grains exhibiting developmental anomalies ranging from 62.2% to 87.6% at impacted sites, compared to 25.8% in the control samples. The highest incidence of teratomorphic pollen was recorded in samples collected near energy enterprises: Roslyakovo Yuzhnoye (87.6%), South CHP Plant (81.6%), and Murmansk CHP Plant (76.4%). Three size categories of teratomorphic *P. obovata* pollen were identified – normal, dwarf, and hypertrophied – each displaying various pathologies of the sacci and exine. Emissions from Murmansk thermal power plants, which operate on fuel oil and coal, contain elevated concentrations of heavy metals and exhibit high toxicity, resulting in disruptions of microsporogenesis and the formation of teratomorphic pollen in *P. obovata*. Consequently, to improve environmental safety for the local population and reduce pollution levels in Murmansk, it is necessary to adopt new environmentally sustainable technologies and transition the city's boiler houses to natural gas.

Keywords: biomonitoring, industrial pollution, Arctic, *Picea obovata*, teratomorphism of pollen
Funding. This research received no external funding.
For citation: Vasilevskaya N.V., Mironyuk D.V. Polymorphism of *Picea obovata* Ledeb. pollen under industrial pollution of the Arctic city. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):440–451. (In Russ.); https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-440-451

Введение

Арктика занимает около 10 % поверхности Земли и принадлежит к регионам планеты с наиболее экстремальными природными условиями [1]. В последние годы во всех арктических районах России наблюдается увеличение объемов производства, что приводит к усилению техногенной нагрузки на окружающую среду, которая будет усугубляться с развитием добычи углеводородов, геологоразведочных работ и оказывать негативное влияние на сохранение природно-ресурсного потенциала и экологическую безопасность населения [2]. Мурманская область является наиболее урбанизированной и промышленно развитой территорией российского сектора Арктики. В регионе представлены горнодобывающая, металлургическая, энергетическая, пищевая промышленности, которые являются основными поставщиками токсических веществ в окружающую среду. В городах Мурманской области осуществляется мониторинг загрязнения атмосферного воздуха, воды, почвы, но этих данных недостаточно для составления полной картины экологической обстановки.

Экологическая палинология – одно из новых направлений мониторинга окружающей среды. Известно, что чем выше уровень загрязнения, тем большее количество аномальной пыльцы формируется в процессе микроспорогенеза [3, 4]. Цитологические аномалии растений могут использоваться для мониторинга и распознавания химических веществ, присутствующих в окружающей среде, которые представляют собой генетическую угрозу [5]. Исследуя особенности морфологии пыльцевых зерен, можно не только выявить наличие в атмосферном воздухе гаметопатогенных веществ, но и оценить общий уровень загрязнения среды [3]. Многие экологи считают цитогенетические методы в мониторинге наиболее эффективными [4]. Пыльца различных видов растений используется для биоиндикации качества атмосферного воздуха на урбанизированных территориях с высокой транспортной нагрузкой [6, 7] и в зонах промышленного воздействия [4, 8, 9]. Эколого-палинологические исследования активно проводятся в городах Европейского Севера [3, 9], в том числе и арктической зоны [7]. В Мурманской области проведен мониторинг загрязнения атмосферного воздуха с использованием пыльцы древесных видов растений (*Pinus sylvestris, Sorbus gorodkovii, Syringa josikaea*) в городах Североморск, Мурманск, Апатиты, Мончегорск, Заполярный [10–12].

В условиях промышленного загрязнения среды у хвойных видов образуется большое число аномальной пыльцы [3, 4]. Для мониторинга окружающей среды в качестве тест-объекта наиболее часто используют *Pinus sylvestris* как вид, наиболее чувствительный к загрязнению. Представители родов *Picea, Abies* и *Larix* менее изуче-

ны в плане биоиндикации окружающей среды урбанизированных и промышленных территорий.

Цель работы – изучение полиморфизма пыльцы *Picea obovata* Ledeb. в условиях промышленного загрязнения г. Мурманск.

Материалы и методы исследования

Исследования проведены в г. Мурманск – крупнейшем незамерзающем морском порту России, расположенном за Полярным кругом (68° 58′ 45″ с. ш. 33° 05′ 33″ в. д.). Город находится на берегу Кольского залива Баренцева моря и является базовым по обеспечению перевозок грузов в районы Крайнего Севера, Арктики и дальнего зарубежья. Среди портов Северо-Запада России он занимает лидирующее место по объему перерабатываемых сухих грузов [13]. Качество окружающей среды в г. Мурманск в последние годы снижается за счет пылевого загрязнения от перегрузки угля, апатита, марганцевых и железных руд Мурманским морским торговым портом и выбросов ТЭЦ, использующих мазут низкого качества. Основными загрязнителями окружающей среды города являются полициклические ароматические углеводороды и летучие вещества (SO_2 и NO_2), тяжелые металлы, нефть [14], почвы содержат высокие концентрации тяжелых металлов, превышающие ПДК (Cu, Zn, Ni, V) [15].

Рис. 1. Пробные площади: *а* – «Южная Котельная» (редкостойная тайга), *б* – «Мурманская ТЭЦ» (заболоченная редкостойная тайга). Фото Д. В. Миронюк

Fig. 1. Test plots at the South CHP Plant (sparse taiga (*а*)) and the Murmansk CHP Plant (swampy sparse taiga(*б*)). (Photo by D. V. Mironyuk)

В качестве вида-биоиндикатора выбрана ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), имеющая широкий ареал от Сибири до Европейского Севера. В России произрастает на Урале, в Сибири (кроме Крайнего Севера), на севере европейской части РФ. На Северо-Востоке Европы *Picea obovata* образует гибриды с *Picea abies*, формируя ряд переходных форм, известных под общим названием ель финская (*Picea* × *fennica*). В пределах Фенноскандии *P. obovata* встречается в лесотундре в виде отдельных деревьев, уступая при распространении на север другим видам [16]. На Кольском полуострове *P. obovata* образует северную границу леса с лесотундрой. В г. Мурманск произрастает в составе редкостойных лесов. У всех представителей рода *Picea* пыльцевые зерна имеют общий тип строения: одиночные, гетерополярные, эллипсоидальные, билатерально-симметричные, дистально-однолептомные, в норме с двумя большими воздушными мешками [17]. Известно, что загрязнители воздуха (особенно SO_2, O_3, C_2H_2, HF и тяжелые металлы) отрицательно влияют на развитие и качество пыльцы хвойных [4, 18]. В экстремальных условиях у представителей рода *Picea* могут формироваться аномальные пыльцевые зерна с тремя, четырьмя и даже шестью воздушными мешками, а в отдельных случаях – со сплошным полусферическим воздушным мешком [17].

В июне 2024 г. на территории г. Мурманск было заложено пять пробных площадей в окрестностях экологически опасных предприятий:

«Южная котельная» – ул. Прибрежная, в 800 м от Южной котельной, самой мощной в Мурманской области, относящейся ко II классу экологической опасности. Основным видом топлива является мазут. Участок редкостойной северной тайги (рис. 1). В составе фитоценоза: *Picea obovata*, *Populus tremula*, *Betula czerepanovii*, *B. nana*, *Salix* sp., *Ledum palustre*, *Vaccinium myrtillu*s, *Cornus suecica*, *Chamaenerion angustifolium, Equisetum* sp., *Rubus chamaemorus*, *Sphagnum* sp.

«Мурманская ТЭЦ» – ул. Шмидта, в 1500 м от Мурманской ТЭЦ и 200–300 м и более от автомобильных дорог. Технологической особенностью ПАО «Мурманская ТЭЦ» является ее работа на мазуте, относится ко II классу экологической опасности. В выбросах котельных АО «Мурманская ТЭЦ» содержатся загрязняющие вещества, относящиеся к I и II классам опасности: бенз(а)пирен, формальдегид, гидрохлорид, сероводород, пентаоксид диванадия (V_2O_5), марганец и его

соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид) и другие. Ванадий, бенз(а)пирен, марганец и его соединения обладают высокой мутагенностью [10]. Участок заболоченной редкостойной северной тайги (рис.1). В составе фитоценоза: *Betula czerepanovii, Picea obovata*, *Pinus sylvestris, Betula nana*, *Salix* sp., *Empetrum germaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Juniperus sibirica, Ledum palustre*, *Vaccinium myrtillu*s, *Andromeda polifolia*, *Arctous alpina*, *Eriophorum vaginatum*, *Cornus suecica*, *Rubus chamaemorus*, *Trientalis europaea*, *Festuca ovina*, *Equisetum* sp., *Sphagnum* sp.

«Завод ТО ТБО» – ул. Домостроительная, в 500 м от мусоросжигательного завода и в 300–400 м от автодорог (рис. 2). АО «Завод ТО ТБО» относится к I категории негативного воздействия на окружающую среду. В выбросах содержатся загрязняющие вещества, относящиеся к I и II классам опасности: свинец и его неорганические соединения (в пересчете на свинец), оксид кадмия, гидрохлорид, оксид меди, оксид никеля, бенз(а)пирен, хром, пентоксид диванадия, мазутная зола, триоксид диалюминия, марганец и его соединения и другие [10]. Специфическими выбросами мусоросжигательных заводов также являются супертоксиканты: диоксины и фураны.

Верховое болото возле озера Среднее (см. рис. 2). В составе фитоценоза: *Picea obovata*, *Pinus sylvestris*, *Betula czerepanovii*, *Sorbus aucuparia*, *Populus tremula*, *Betula nana*, *Salix* sp., *Empetrum germaphroditum*, *Ledum palustre*, *Vaccinium vitis-idaea, V. myrtillu*s, *Rubus chamaemorus*, *Cornus suecica*, *Trientalis europaea*, *Eriophorum vaginatum*, *Equisetum* sp. Встречается *Corallorhiza trifid*a – редкий вид орхидей, внесенный в Красную книгу Мурманской области со статусом 3 (редкий вид). Среди мхов преобладает *Sphagnum* sp., встречаются лишайники.

«Судоремонтный завод № 35 «Звездочка» – ул. Адмирала флота Лобова, в 800 м от завода и более 300–400 м от автомобильных дорог. Выбросы завода содержат: сероводород, мазутную золу, газообразные соединения фтора, хром, оксид никеля, марганец и его соединения, оксид меди и другие. Участок редкостойной северной тайги (см. рис. 2). В составе фитоценоза: *Picea obovata*, *Pinus sylvestris*, *Betula czerepanovii*, *Populus tremula*, *Empetrum germaphroditum*, *Ledum palustre*, *Vaccinium myrtillu*s, *Rubus chamaemorus*, *Cornus suecica*, *Eriophorum vaginatum*, *Equisetum* sp. Моховый покров сформирован *Sphagnum* sp., встречаются лишайники.

Рис. 2. Пробные площадки: *а* – «Завод ТО ТБО» (верховое болото), *б* – «Судоремонтный завод «Звездочка» (редкостойная северная тайга). Фото Д. В. Миронюк

Fig. 2. Test sites: Incineration Plant (raised bog) (*а*) and Zvezdochka Ship Repair Plant (sparse northern taiga)(*б*). (Photo by D. V. Mironyuk)

«Росляково Южное» – ул. Молодежная, в 300 м от котельной и более 500 м от автомобильных дорог. Котельная Росляково Южное работает на угле, не оборудована фильтрами очистки выбросов. Уголь складируется открытым способом. Редкостойная северная тайга (рис. 3). В составе фитоценоза: *Picea obovata*, *Pinus sylvestris, Betula czerepanovii*, *B. nana*, *Salix* sp., *Empetrum germaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *V. myrtillu*s, *V. uliginosum*, *Cornus suecica*, *Chamaenerion angustifolium*, *Rubus chamaemorus*, *Equisetum* sp., *Sphagnum* sp.

Контрольная площадка находится в 30 км к северо-востоку от города Мурманск по Серебрянскому шоссе, в более 1,5 км от автомобильных дорог. Редкостойная северная тайга (см. рис. 3). В составе фитоценоза: *Picea obovata, Pinus sylvestris, Betula czerepanovii, B. nana*, *Salix* sp., *Empetrum germaphroditum*, *Juniperus sibirica, Ledum palustre*, *Vaccinium myrtillu*s, *Andromeda polifolia*, *Chamaenerion angustifolium*, *Cornus suecica*, *Trientalis europaea*, *Equisetum* sp. Мохово-лишайниковый ярус сформирован *Sphagnum* sp., встречаются различные виды лишайников.

На каждой пробной площади маркировались по 5–6 деревьев ели сибирской. Выполнено геоботаническое описание пробных площадей. Сбор мужских шишек во время пыления *P. obovata*

Рис. 3. Пробные площадки: *а* – «Росляково Южное» (редкостойная тайга), *б* – «Контроль» (редкостойная тайга). Фото Д. В. Миронюк

Fig. 3. Test sites: Roslyakovo Yuzhnoye (sparse taiga)(*a*) and Control (sparse taiga)(*б*). (Photo by D. V. Mironyuk)

проводился 20–24 июня 2024 г. С каждого из маркированных деревьев были случайным образом отобраны по пять мужских шишек и сформирована общая проба, которую фиксировали в 40° этиловом спирте. Исследования пыльцы проводились ацетокарминовым методом. Цитологический анализ проводили на временных препаратах с помощью светового микроскопа «Микромед Р-1 (LED) при увеличении в 160 раз. В каждой пробе анализировали по 500 пыльцевых зерен с микрофотографий, выполненных через тубус окуляра 13-мегапиксельной камерой Samsung. Подсчитывалось количество нормальных и тератоморфных пыльцевых зерен, их процентное содержание в пробах. Все аномальные пыльцевые зерна описывали и заносили в электронный журнал. Выделены тератоморфы пыльцы нормальных, карликовых и гипертрофированных размеров с различными аномалиями развития. Карликовой считалась пыльца в 1,5–2 раза меньше типичной, гипертрофированной – в 1,5–2 раза больше.

Полученные результаты были обработаны однофакторным дисперсионным анализом с использованием критерия Фишера. Результаты считались достоверными при $p \leq 0{,}05$.

Результаты и обсуждение

В результате палинологического анализа *Picea obovata* получено, что все протестированные пробы содержат нормальные и тератоморфные пыльцевые зерна. В образцах контрольной площадки, расположенной в 30 км на северо-восток от Мурманска, доля типичной пыльцы составляет 74,2 %. В пробах из окрестностей промышленных предприятий содержание нормальной пыльцы очень низкое (12,4–37,8 %), особенно в окрестностях мурманских котельных: Росляково Южное (12,4 %), Южная котельная (18,4 %), Мурманская ТЭЦ (23,6 %) (см. таблицу, рис. 4). Тератоморфные пыльцевые зерна *P. obovata* отличаются формой, размерами, аномальным строением воздушных мешков или экзины. В г. Мурманск выявлен высокий полиморфизм пыльцы ели сибирской, который скорее является тератоморфизмом. Содержание пыльцы с пороками развития составляет 62,2–87,6 %, в контроле

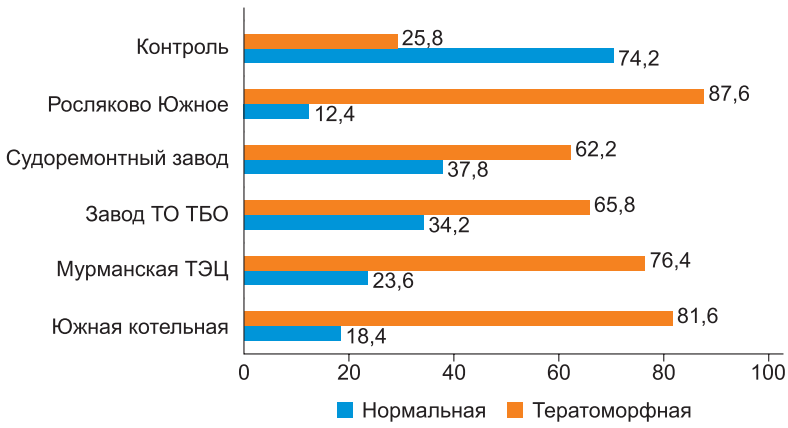

Рис. 4. Соотношение нормальной и тератоморфной пыльцы *Picea obovata* в г. Мурманск (%)

Fig. 4. The ratio of normal to teratomorphic pollen in *Picea obovata* from the city of Murmansk (%)

Количество нормальной и тератоморфной пыльцы *Picea obovata* в окрестностях промышленных объектов г. Мурманск

The quantity of normal and teratomorphic pollen of *Picea obovata* in the vicinity of industrial facilities in the city of Murmansk

Показатель	Южная котельная	Мурманская ТЭЦ	Завод ТО ТБО	Судорем. Завод № 35	Росляково	Контроль
Количество изученных пыльцевых зерен	500	500	500	500	500	500
Количество нормальной пыльцы	92	118	171	189	62	371
Количество тератоморфной пыльцы Из них:	408	382	329	311	438	129
Количество тератоморф норм. размеров	173	155	134	116	167	74
Количество карликовых тератоморф	113	115	101	94	98	25
Количество гипертроф. тератоморф	122	112	94	101	173	30

25,8 % (см. таблицу, рис. 4). Максимальное количество тератоморфных пыльцевых зерен выявлено в пробах из окрестностей энергетических предприятий: Росляково Южное (87,6 %), Южная котельная (81,6 %), Мурманская ТЭЦ (76,4 %). В зоне воздействия мусоросжигательного (65,8 %) и 35-го судоремонтного завода «Звездочка» (62,2 %) доля тератоморфной пыльцы *P. obovata* ниже (см. рис. 4).

Однофакторный дисперсионный анализ показал, что загрязнение окружающей среды в г. Мурманск влияет на количество нормальной и тератоморфной пыльцы ели сибирской. Данные по содержанию нормальной ($F = 5{,}5307$; $p \leq 0{,}05$) и тератоморфной ($F = 14{,}2595$; $p \leq 0{,}05$) пыльцы между площадками статистически значимо различаются.

Среди аномальной пыльцы *P. obovat*а выделены три группы: нормальная, карликовая и гипертрофированная. Чаще всего в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск встречается тератоморфная пыльца нормальных размеров (23,2–34,6 %) (см. таблицу). Во всех образцах выявлено высокое содержание карликовой пыльцы (18,8–22,6 %) с различными патологиями воздушных мешков и экзины, особенно в окрестностях Южной котельной и Мурманской ТЭЦ. Карликовые пыльцевые зерна являются общей тенденцией тератоморфоза при геоботанических стрессах [19]. Содержание в пробах гипертрофированной (гигантской), нередуцированной диплоидной пыльцы, с различными морфологическими отклонениями в развитии варьирует в диапазоне 18,8–34,6 %. Появление гигантских пыльцевых зерен связано с нарушениями мейоза в результате воздействия мутагенов различной природы [19].

По данным Н. А. Калашник [20], в условиях геохимического загрязнения гипертрофированная и карликовая пыльца *P. obovat*а встречаются наиболее часто. В Челябинской области и Башкортостане выявлено, что мелкие пыльцевые зерна *P. obovat*а образуются в условиях сильного и умеренного промышленного загрязнения среды [4]. Аналогичные данные получены в окрестностях Красноярска [18]. В Сибири, в экологических условиях, близких к оптимальным, уменьшение размера пыльцевых зерен *P. obovat*а являлось единственной аномалией развития [21].

Полиморфизм пыльцевых зерен *P. obovat*а нормальных размеров в г. Мурманск наиболее вариативен, выявлено 13 тератоморф, среди них: одномешковые, с асимметрией воздушных мешков, безмешковые, с редукцией воздушных мешков, разномешковые, с линзовидным или воротничковым воздушным мешком, с попарным срастанием четырех пыльцевых мешков, с наростами на экзине, с плазмолизом протопласта, деградировшая пыльца, с трехлучевой трещиной в экзине, сросшиеся пыльцевые зерна (рис. 5).

Выявлено 12 карликовых тератоморф пыльцы *P. obovat*а: двухмешковые, одномешковые, с асимметрией воздушных мешков, безмешковые, с редукцией воздушных мешков, разномешковые, с воротниковым воздушным мешком, с наростами на экзине, с плазмолизом протопласта, деградировшая пыльца, с редукцией тела и воздушных мешков, с редукцией тела и трещиной воздушных мешков (см. рис. 5).

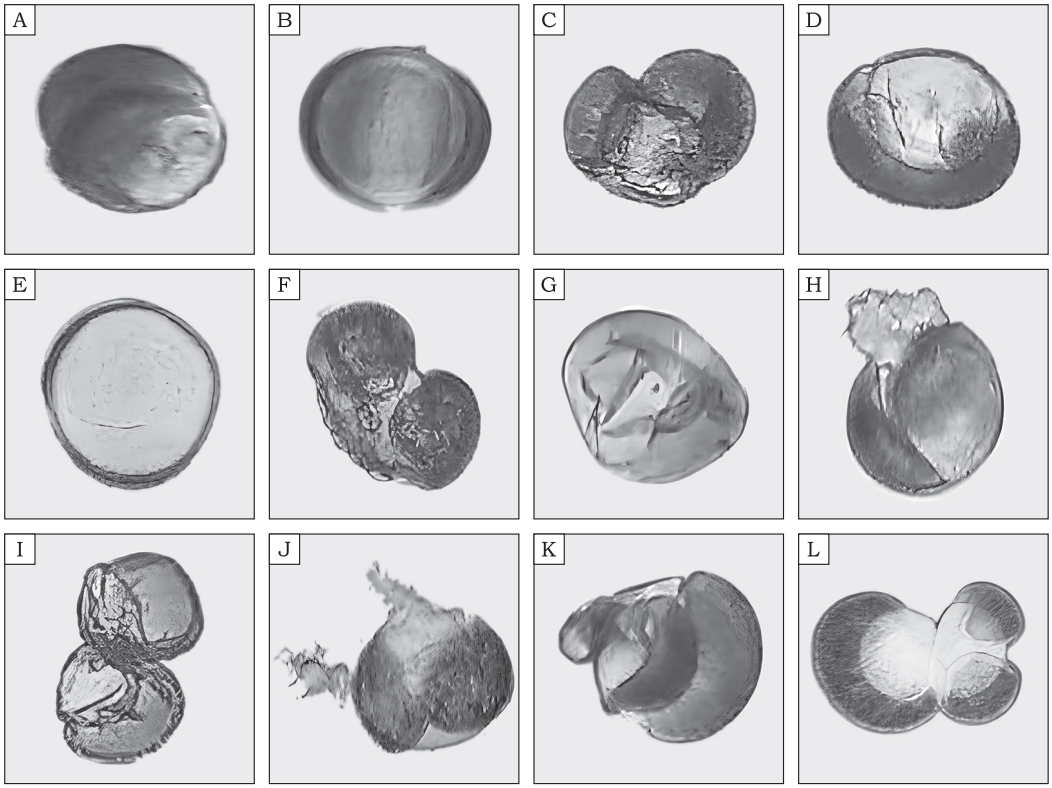

Рис. 5. Микрофотографии тератоморфной пыльцы *Picea obovat*а в г. Мурманск. A – одномешковая, B – гипертрофированная с редукцией воздушных мешков, C – разномешковая, D – с воротничковым воздушным мешком, E – стерильная безмешковая, F – с петлевидными наростами на экзине, G – карликовая с трехлучевой щелью в экзине, H – безмешковая с трещиной в экзине, I – карликовая с редукцией тела и трещинами воздушных мешков, J – гипертрофированная с наростами на экзине, K – сросшиеся воротничковые пыльцевые зерна L– сросшиеся воротничковое и нормальное пыльцевые зерна

Fig. 5. Microphotographs illustrating teratomorphic pollen of *Picea obovata* collected in Murmansk. A – with a single saccus, B – hypertrophied with a reduction of sacci, C –with two dissimilar sacci, D – collar saccus, E – sterile without sacci, F – with loop-like growths on the exine, G – dwarf with a three-beam slit in the exine, H – without sacci, with crack in the exine, I – dwarf with a reduced body and cracks in the saccus, J – hypertrophied with growths on the exine, K – fused collar pollen grains, L – fused collar and normal pollen grains

В протестированных образцах идентифицировано 10 гипертрофированных тератоморф пыльцы ели сибирской: двухмешковые, одномешковые, безмешковые, с редукцией воздушных мешков, с воротниковым воздушным мешком, с наростами на экзине, с повреждением экзины, с плазмолизом протопласта, с воротниковым воздушным мешком и плазмолизом протопласта, с тремя воздушными мешками (см. рис. 5).

Общая тенденция тератоморфоза пыльцы *P. obovat*а в г. Мурманск – нарушение морфологического строения воздушных мешков. Воздушные мешки – это полые боковые расслоения экзины, благодаря которым пыльцевые зерна ели имеют очень высокие аэродинамические свойства [22], при этом они выполняют не только функцию летательного аппарата, но и гармомегата, функционируя в качестве балансира на нуцеллусе семяпочки [17]. Наиболее распространенной патологией является редукция воздушных мешков, что характерно для хвойных [23]. Около всех промышленных предприятий г. Мурманск выявлено высокое содержание гипертрофированной пыльцы *P. obovat*а (см. рис. 5, B) с редукцией воздушных мешков (7,8–17,4 %), особенно ее много в зоне воздействия угольной котельной «Росляково Южное» (рис. 6). Предположительно, это диплоидная пыльца, ее наличие свидетельствует о мутагенном эффекте выбросов мурманских ТЭЦ, мусоросжигательного и судоремонтного заводов. Гигантская пыльца, в том числе с огромным телом и карликовыми воздушными мешками описана при изучении природных геоботанических катастроф [19]. Содержание пыльцы *P. obovat*а нормальных размеров с редукцией воздушных мешков 3,2–7,4 %,

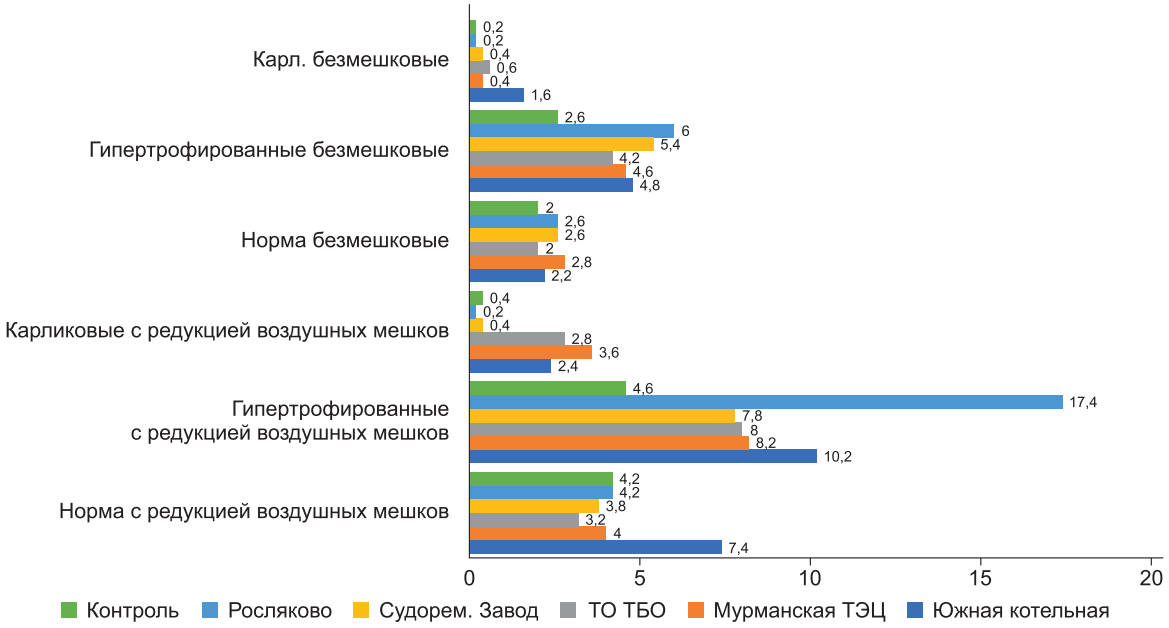

Рис. 6. Соотношение пыльцы *Picea obovata* с редукцией воздушных мешков и безмешковой разных размерных групп (%)

Fig. 6. Proportion of *Picea obovata* pollen with reduced sacci and without sacci across various size groups (%)

карликовых с такой аномалией намного меньше (см. рис. 6).

Безмешковая пыльца (см. рис. 5, E) чаще гипертрофирована (4,2–6,0 %). Отсутствие воздушных мешков встречается реже у нормальной и особенно карликовой пыльцы (см. рис. 6). В Челябинской области и Башкортостане в условиях сильного и умеренного промышленного загрязнения безмешковые пыльцевые зерна *P. obovat*a являются часто встречающейся аномалией [4].

Во всех пробах в г. Мурманск выявлены пыльцевые зерна воротничковой формы (см. рис. 5, D), образующиеся в результате срастания двух пыльцевых мешков, в контроле данная тератоморфа отсутствует. Большая часть такой пыльцы имеет нормальные размеры, особенно высоко ее содержание в окрестностях Росляково Южное (7,6 %) и Южной котельной (5,8 %) (рис. 7). Доля карликовой и гипертрофированной пыльцы с воротничковым мешком повышена около всех мурманских ТЭЦ (см. рис. 7). Пыльца воротничковой формы со сросшимися воздушными мешками встречается у хвойных только в экстремальных условиях среды [17]. В окрестностях г. Красноярск в условиях промышленного загрязнения среды доля этой тератоморфы *P. obovat*a значительно ниже (0,04 %), чем в Мурманске [18].

В окрестностях всех промышленных предприятий г. Мурманск выявлена пыльца *P. obovat*a с линзовидным воздушным мешком (2,0–4,4 %), такие отклонения в развитии не обнаружены у карликовой и гигантской пыльцы.

В протестированных образцах часто встречаются разномешковые пыльцевые зерна (см. рис. 5, C) нормальных размеров (4,0–7,8 %), особенно около мурманских ТЭЦ. Доля карликовой разномешковой пыльцы ниже, у гипертрофированной эта аномалия не выявлена (см. рис. 7). Одномешковые пыльцевые зерна (см. рис. 5, A) имеют нормальные (2,8–4,6 %), гипертрофированные (1,2–2,8 %) и карликовые (1,0–4,4 %) размеры. В Башкортостане и Челябинской области доля пыльцевых зерен *P. obovat*a с одним воздушным мешком составила 0,7–0,8 % [4].

Во всех образцах встречаются пыльцевые зерна нормальных размеров с асимметричным расположением воздушных мешков (2,0–7,4 %), карликовые с такой патологией встречаются реже (0,4–2,6 %), гипертрофированные отсутствуют.

Е. В. Бажина [24] выявила многочисленные патологии развития воздушных мешков пыльцы у современных видов хвойных под воздействием засухи и промышленного загрязнения воздуха в Сибири. По данным Н. А. Калашник [4], в условиях сильного и умеренного промышленного за-

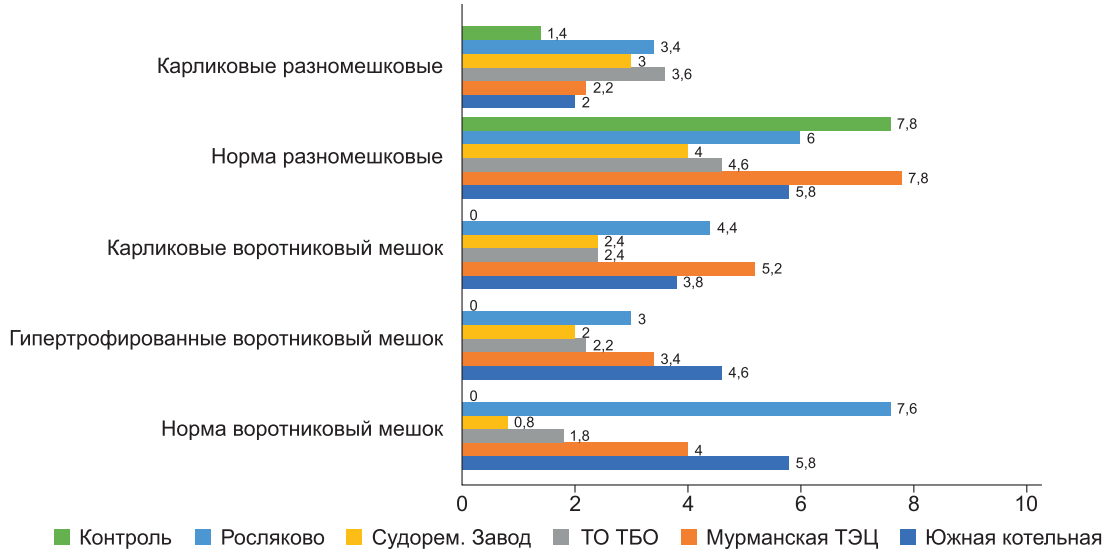

Рис. 7. Соотношение пыльцы *Picea obovata* с воротниковым пыльцевым мешком и разномешковых разных размерных групп (%)

Fig. 7. Proportion of *Picea obovata* pollen with a collar saccus and pollen with various sacci across different size groups (%)

грязнения часто образуются пыльцевые зерна *P. obovat*а с отклонениями в морфологии воздушных мешков: безмешковые, одномешковые, с тремя воздушными мешками. Под воздействием выбросов промышленных предприятий в окрестностях г. Красноярск большинство аномальной пыльцы *P. obovat*а представлено патологиями воздушных мешков: с воротничковым мешком (0,04 %), с тремя мешками (0,036 %), четырьмя (0,073 %), одномешковая (0,073 %) или безмешковая (0,290 %) [18].

Особенностью палинотератного комплекса в г. Мурманск является присутствие в пробах тератоморф пыльцы *P. obovata* с наростами на экзине или трехлучевой щелью в экзине (см. рис. 5, F, G, H, J). Пыльца ели сибирской с петлевидным разрастанием экзины (см. рис. 5, F) выявлена во всех пробах (0,4–1,8 %), кроме контроля. Особенно часто она встречается около Мурманской ТЭЦ (1,8 %) и угольной котельной «Росляково Южное» (0,8 %). Такая тератоморфа пыльцы сосны (*Pinus sylvestris*) была обнаружена О. Ф. Дзюбой вблизи Ленинградской АЭС и в г. Сосновый Бор [3]. Во всех образцах, кроме контроля, выявлены гипертрофированные диплоидные пыльцевые зерна с разрастанием экзины в виде антенн (см. рис. 5, J) (0,2–1,4 %). Наиболее часто такая тератоморфа встречается в окрестностях угольной котельной «Росляково Южное» (1,4 %). Пыльцевые зерна с крупными поперечными или продольными трещинами (открытыми или закрытыми) в центре тела (см. рис. 5, G, H) являются характерным признаком патоморфоза пыльцы *P. obovat*а в окрестностях энергетических предприятий г. Мурманск (0,2–0,4 %). О. Ф. Дзюба [3] отмечает, что тератоморфы, имеющие тетрадные рубцы (напоминающие раскрытые или сомкнутые щели трехлучевых спор), указывают на высокий уровень загрязнения среды, а также повышенную радиационную активность.

В пробах встречаются редкие тератоморфы (см. рис. 5, K, L, I). В образцах из зоны воздействия угольной котельной «Росляково Южное» выявлены сросшиеся воротничковые пыльцевые зерна (0,2 %) (см. рис. 5, K), в окрестностях Южной котельной – сросшиеся воротничковое и нормальное двухмешковое пыльцевые зерна (0,2 %) (см. рис. 5, L). Карликовая пыльца с редукцией тела и трещинами воздушных мешков (см. рис. 5, I) обнаружена в образцах из окрестностей Мурманской ТЭЦ и мусоросжигательного завода (0,2 %). В образцах из окрестностей Судоремонтного завода № 35 и угольной котельной «Росляково Южное» выделены гипертрофированные пыльцевые зерна с воротниковыми воздушным мешком и плазмолизом протопласта (0,2 и 0,4 % соответственно).

Результаты палинологических исследований свидетельствуют о высоком тератоморфизме пыль-

цы *Picea obovat*a (62,2–87,6 %) в окрестностях экологически опасных промышленных предприятий г. Мурманск. Полученные данные подтверждают аналогичные исследования полиморфизма пыльцы *Pinus sylvestris*, проведенные ранее в разных районах города, при этом содержание в пробах аномальной пыльцы варьировало от 54 до 71 % [7].

С. Фостер и С. Афонин [25] предложили рассматривать в качестве критерия экологического стресса у представителей хвойных более 3 % пыльцы с патологиями развития. Другие исследователи [26] использовали показатель более 4,5 % деформированных пыльцевых зерен в общем пуле пыльцы современных голосеменных для вывода о стрессовых условиях произрастания. Недавние исследования Дж. Бенка [27] показали, что у различных видов хвойных в экологически чистых условиях двухмешковая пыльца с пороками развития составляет менее 3 %. Морфологический консерватизм двухмешковых пыльцевых зерен в естественных условиях предполагает, что всплески частоты их деформаций являются результатом экологических воздействий на микроспорогенез у голосеменных [27].

Микроспорогенез является одной из наиболее уязвимых фаз в жизненном цикле семенных растений по отношению к экологическому стрессу [28]. Высокий уровень аномалий пыльцы может быть обусловлен генетическими особенностями изучаемого вида или мутациями, так как мейоз находится под генетическим контролем [29]. Известно, что гетерогенность пыльцы по размеру и форме пыльцевых зерен может быть результатом мейотических нарушений [30]. Образование карликовой пыльцы связано с нарушениями мейоза, при которых теряется часть генетического материала в результате повреждения веретена деления или хромосомных мутаций [30]. У представителей рода *Picea* образование гипертрофированной пыльцы скорее всего происходит в результате нарушений на стадии формирования тетрад или вторичного слияния протопластов микроспор [21].

В семействе Pinaceae, роды *Picea* и *Pinus* производят особенно большое количество двухмешковой пыльцы, и поэтому она легко разносится ветром. Изменение морфологической структуры воздушных мешков не позволяет пыльцевым зернам выполнять летательную функцию, так же, как и функционировать при опылении на нуцеллусе семяпочки. Есть данные, что аномалии тела и структуры воздушных мешков пыльцы хвойных возникают в результате потери части генетического материала в ходе мейоза [31]. Пороки развития пыльцы хвойных с воздушными мешками возникают из-за отклонений в микроспорогенезе, которые происходят на стадиях материнской клетки и тетрады микроспоры [27]. У представителей рода *Picea* образование воздушных мешков начинается сразу после образования тетрад, когда микроспоры увеличиваются в размере [21], а заканчивается в конце стадии тетрады. Это означает, что аномальное развитие формы, размера, ориентации или количества мешков должны проходить пока пыльцевые зерна находятся на ранней стадии тетрады [27]. Неправильно сформированные воздушные мешки пыльцы, по-видимому, сигнализируют о сниженной репродуктивной приспособленности, т. е. о сниженной способности особей передавать свои гены последующим поколениям, а не о сигналах полиплоидного адаптивного преимущества, гибридных сбоев или расширения ареала [27].

Известно, что тяжелые металлы вызывают хромосомные нарушения в мужских гаметах у представителей хвойных, произрастающих в условиях хронического загрязнения предприятиями цветной металлургии, на разных стадиях мейоза [20]. Выбросы мурманских ТЭЦ, работающих на мазуте и угле, содержат высокие концентрации Cu, Ni, V, Cd и Zn и обладают высокой токсичностью [10], что вызывает нарушение процесса микроспорогенеза и формирование тератоморфной пыльцы *Picea obovat*a.

Заключение

Исследования в окрестностях экологически опасных предприятий г. Мурманск показали, что образование большого количества генетически аномальных форм пыльцы *P. obovata* и особенности их тератологии свидетельствуют о высоком уровне загрязнения окружающей среды и воздействии мутагенов различной природы. Наиболее токсичное воздействие на процесс микроспорогенеза и образование пыльцы *P. obovata* оказывают выбросы мурманских ТЭЦ. Повышенное содержание тератоморфной пыльцы свидетельствует об экологическом стрессе и является индикатором низкого качества окружающей среды. Для экологической безопасности населения и снижения уровня загрязнения г. Мурманск

необходимо использование экологически безопасных технологий производства и перевод городских котельных на природный газ.

Список литературы / References

1. Nowak M.D., Birkeland S., Mandakova K., et al. The genome of *Draba nivalis* shows signatures of adaptation to the extreme environmental stresses of the Arctic. *Molecular Ecology Resources*. 2021;21(3):661–676. https://doi.org/10.1111/1755-0998.13280

2. Липина С.А., Зайков К.С., Липина А.В. Внедрение инновационных технологий как фактор экологической модернизации арктических регионов России. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз.* 2017;10(2):164–180. https://doi.org/10.15838/esc.2017.2.50.9

Lipina S.A., Zaykov K.S., Lipina A.V. Introduction of innovative technology as a factor in environmental modernization in Russian Arctic. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2017;10(2):164–180. (In Russ.) https://doi.org/10.15838/esc.2017.2.50.9

3. Дзюба О.Ф. *Палиноиндикация качества окружающей среды*. СПб.: Недра; 2006. 197 с.

Dzyuba O. F. *Palynoindication of Environmental Quality*. St. Petersburg: Nedra; 2006. 197 p. (In Russ.).

4. Калашник Н.А., Ясовиева С.М., Преснухина Л.П. Аномалии пыльцы хвойных видов деревьев при промышленном загрязнении на Южном Урале. *Лесоведение.* 2008;(2):33–40.

Kalashnik N. A., Yasovieva S. M., Presnukhina L. P. Anomalies of pollen in coniferous trees caused by industrial pollution in the South Urals. *Russian Journal of Forest Science*. 2008;2:33–40. (In Russ.)

5. Siddiqui S., Al-Rumman S. Clethodim induced pollen sterility and meiotic abnormalities in vegetable crop *Pisum sativum* L. *Caryologia*. 2020;73(1):37–44. https://doi.org/10.13128/caryologia-269

6. Wang X., Gong S., Nakamura S., et al. Air pollutant deposition effect and morphological change of *Cryptomeria japonica* pollen during its transport in urban and mountainous areas of Japan. *WIT Transactions on Biomedicine and Health.* 2009;14:77–89. https://doi.org/10.2495/EHR090081

7. Vasilevskaya N.V. Pollution of the environment and pollen: A review. *Stresses*. 2022;2(4):515–530. https://doi.org/10.3390/stresses2040035

8. Носкова Н.Е., Третьякова И.Н. Влияние стресса на репродуктивные способности сосны обыкновенной. *Хвойные бореальной зоны*. 2006;3:54–64.

Noskova N. E., Tretyakova I. N. Effect of stress on reproductive abilities of Scots pine. *Conifers of the Boreal Zone*. 2006;3:54–64. (In Russ.)

9. Ерохина И.С., Елькина Н.А., Марковская Е.Ф. Палиноиндикация природной среды города Костомукша. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия естественные науки*. 2011:119(6):20–23.

Erokhina I.S., El'kina N.A., Markovskaya E.F. Palynoindication of environment of the city of Kostomuksha. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences.*2011;119(6):20–23. (In Russ.)

10. Василевская Н.В., Сикалюк А.И. Биомониторинг окружающей среды арктической урбанизированной территории с использованием пыльцы *Sorbus gorodkovii* Pojark. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):425–434. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-425-434

Vasilevskaya N.V., Sikalyuk A.I. Biomonitoring of the environment of the Arctic urbanized area using the pollen of Sorbus gorodkovii Pojark. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):425–434. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-425-434

11. Vasilevskaya N.V., Osechinskaya P.V. Teratomorphism of *Pinus sylvestris* L. pollen of the Subarctic industrial city. *BIO Web of Conferences*. 2024;145:02014. https://doi.org/10.1051/bioconf/202414502014

12. Vasilevskaya N.V., Morozova D.A. Morphological variability and fertility of *Syringa josikaea* pollen under industrial pollution of the arctic city. *BIO Web of Conferences.* 2024;130:01008. https://doi.org/10.1051/bioconf/202413001008

13. Большаков Я.А., Фридкин В.Н. Возможности и перспективы Мурманской области в развитии транспорта Арктического региона. *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2016;19(2):363–371. https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-2-363-371

Bolshakov Ya.A., Fridkin V.N. Opportunities and prospects of the Murmansk region in the development of transport in the Arctic region. *Vestnik MGTU.* 2016;2:363–371. (In Russ). https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-2-363-371

14. Guzeva A.V., Slukovskii Z.I., Myazin V.A. Geochemical features of lakes located in an urbanized area of the Russian Arctic (Murmansk region). *Limnology and Freshwater Biology.* 2020;(4):511–512. https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-511

15. Vasilevskaya N.V., Struzhko V.V. Ontogenetic reactions of mesophyll of leaves of *Betula nana* L. on the industrial pollution of the arctic urbanized territory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2020;421(5):052031. https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052031

16. Толмачев А.И. *Арктическая флора СССР: Вып. 1. Семейства Polypodiaceae — Butomaceae*. М.; Л.: Издательство Академии наук СССР; 1960. 103 с.

Arctic Flora of the USSR: Issue 1. Families of Polypodiaceae — Butomaceae. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1960. 103 p. (In Russ.)

17. Токарев П. И. *Палинология древесных растений, произрастающих на территории России*. Автореф. дис. … докт. биол. наук. М.; 2003. 56 с.

Tokarev P.I. *Palynology of Woody Plants Growing in the Territory of Russia:* Abstr. … Diss. Cand. Sci., Moscow. 2003. 56 p. (In Russ).

18. Bazhina E.V., Sedaeva M.I. Pollen viability of *Picea obovata* Ledeb. under technogenic stress conditions. *Contemporary Problems of Ecology*. 2023;5:657–664. https://doi.org/10.1134/S1995425523050049

19. Левковская Г.М., Карцева Л.А., Коломиец О.Д. и др. Специфика палинотератного «ответа» генеративной сферы растений на Чернобыльскую катастрофу. В кн.: *XI Всероссийская палинологическая конференция «Палинология: Теория и Практика»: материалы конференции, г. Москва, 27 сентября – 1 октября 2005г.* М.: ПИН РАН, 2005. С. 134–136.

Levkovskaya G.M., Kartseva L.A., Kolomiets O.D., et al. Specificity of the palynoterate "response" of the generative sphere of plants to the Chernobyl disaster. In: *Proceedings of XI All-Russian Palynological Conference: "Palynology: Theory & Applications".* Moscow: PIN RAS; 2005, pp. 134–136. (In Russ.).

20. Калашник Н.А. Аномалии пыльцы у ели сибирской в различных экологических условиях. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2011;98(3):105–109.

Kalashnik N.A Pollen anomalies in *Picea obovata* under different ecological conditions. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences*. 2011;98(3):105–109. (In Russ.)

21. Bazhina E.V., Sedaeva M.I., Goryachkina O.V., Muratova E.N. Pollen development and morphology in different Picea A. Dietr. species at the V.N. Sukachev Institute of Forest Arboretum. *The International Journal of Plant Reproductive Biology*. 2017;9:1.0-0. https://doi.org/10.14787/ijprb.2017 9.1.0-0

22. Сурсо М.В. Пыльцевой режим в хвойных насаждениях Севера. *Лесной вестник*. 2009;66(3):33–38.

Surso M.V. Pollen cloud dynamics in the North European conifer stands. *Forestry Bulletin*. 2009;66(3):33–38. (In Russ.)

23. Сурсо М.В. *Репродуктивная биология и полиморфизм хвойных видов (семейства Pinaceae Lindl., Cupressaceae Rich. ex Bartl.) Европейского Севера России (Архангельская область)*. Автореф. дис. … докт. с.-х. наук. Архангельск. 2013: 43 с.

Surso M.V. *Reproductive Biology and Polymorphism of Coniferous Species (Families Pinaceae Lindl., Cupressaceae Rich. ex Bartl.) of the European North of Russia (Arkhangelsk Region)*. Abstr. … Diss. Cand. Sci., Arkhangelsk. 2013. 43 p. (In Russ.)

24. Bazhina E.V., Kvitko O.V., Muratova E.N. *Abies sibirica* Ledeb. meiosis during microsporogenesis in disturbed forest ecosystems. *Forest Science and Technology.* 2007;3(2):95–100. https://doi.org/10.1080/21580103.2007.9656324

25. Foster C.B., Afonin S.A. Abnormal pollen grains: an outcome of deteriorating atmospheric conditions around the Permian–Triassic boundary. *Journal of the Geological Society.* 2005;162:653–659. https://doi.org/10.1144/0016-764904-047

26. Lindström S., McLoughlin S. Synchronous palynofloristic extinction and recovery after the end-Permian event in the Prince Charles Mountains, Antarctica: Implications for palynofloristic turnover across Gondwana. *Review of Palaeobotany and Palynology.* 2007;145(1-2):89–122. https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2006.09.002

27. Benca J.P., Duijnstee I.A.P., Looy C.V. Fossilized pollen malformations as indicators of past environmental stress and meiotic disruption: insights from modern conifers. *Paleobiology*. 2022;48:677–710. https://doi.org/10.1017/pab.2022.3

28. De Storme N., Geelen D. The impact of environmental stress on male reproductive development in plants: biological processes and molecular mechanisms. *Plant, Cell and Environment*. 2014;37(1):1–18. https://doi.org/10.1111/pce.12142

29. Bogdanov Yu.F. Variation and evolution of meiosis. *Russian Journal of Genetics*. 2003;39:363–381. https://doi.org/10.1023/A:1023345311889

30. Rana P.K, Kumar P., Singhal V.K. Spindle stickiness during male meiosis in *Aanemone tetrasepala* (Ranunculaceae). *Turkish Journal of Botany*. 2013;37(1):167–176. https://doi.org/10.3906/bot-1108-23

31. Носкова Н.Е., Третьякова И.Н., Муратова Е.Н. Микроспорогенез и формирование пыльцы у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях современного климата Сибири. *Известия РАН. Серия биологическая*. 2009;36(3):317–322.

Noskova N.E., Tretyakova I.N., Muratova E.N. Microsporogenesis and pollen formation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under modern climate conditions of Siberia. *Biology Bulletin*. 2009;36:317–322. (In Russ.)

Об авторах

ВАСИЛЕВСКАЯ Наталья Владимировна, доктор биологических наук, профессор, https://orcid.org/0000-0002-6926-9353, ResearcherID: AAY-7070-2021, Scopus Author ID: 15926526000, SPIN: 3224-9336, e-mail: n.v.vasilevskaya@gmail.com

МИРОНЮК Диана Владимировна, студентка магистратуры, https://orcid.org/0000-0002-1065-4687, e-mail: daian.mironyuk@yandex.ru

Вклад авторов

Василевская Н.В. – разработка концепции, методология, проведение исследования, руководство исследованием, редактирование рукописи; **Миронюк Д.В.** – проведение исследования, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

VASILEVSKAYA, Natalia Vladimirovna, Dr. Sci. (Biol.), Professor, https://orcid.org/0000-0002-6926-9353, ResearcherID: AAY-7070-2021, Scopus Author ID: 15926526000, SPIN: 3224-9336, e-mail: n.v.vasilevskaya@gmail.com

MIRONYUK, Diana Vladimirovna, Master's student, https://orcid.org/0000-0002-1065-4687, e-mail: daian.mironyuk@yandex.ru

Authors' contribution

Vasilevskaya N.V. – conceptualization, methodology, investigation, supervision, writing – review & editing; **Mironyuk D.V.** – investigation, formal analysis, visualization, writing – original draft

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 06.06.2025
Поступила после рецензирования / Revised 22.08.2025
Принята к публикации / Accepted 26.08.2025