

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

### Экология

УДК 502.175(470.21): [634.18:632.15]  
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-425-434>

Оригинальная статья

### Биомониторинг окружающей среды арктической урбанизированной территории с использованием пыльцы *Sorbus gorodkovii* Pojark.

Н. В. Василевская✉, А. И. Сикалюк

Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Российская Федерация  
✉[n.v.vasilevskaya@gmail.com](mailto:n.v.vasilevskaya@gmail.com)

#### Аннотация

В импактной зоне экологически опасных предприятий г. Мурманск (ТЭЦ, мусоросжигательный завод, морской торговый порт) проведены исследования содержания тяжелых металлов (Cu, Ni, V, Cd, Zn) в репродуктивных органах рябины Городкова (*Sorbus gorodkovii* Pojark.). Наиболее загрязнены тяжелыми металлами образцы из окрестностей мусоросжигательного завода. В окрестностях ТЭЦ, работающих на мазуте, выявлены высокие концентрации ванадия (4,2–4,8 мг/кг), превышение ПДК по Cu, Ni, Cd, Zn. Биомониторинг жизнеспособности пыльцы *S. gorodkovii* показал, что во всех образцах понижено содержание фертильной пыльцы по сравнению с контролем. На пробных площадках Центральной и Южной ТЭЦ доля фертильной пыльцы составляет 35–41 % (в контроле – 72 %). Индуцированная стерильность более чем в 2 раза превышает спонтанную. Высокие концентрации ванадия и других токсичных металлов в выбросах мурманских ТЭЦ оказывают гаметоцидное воздействие на мужской гаметофит *S. gorodkovii*. Выделены размерные группы фертильных и стерильных пыльцевых зерен по длине полярного диаметра: карликовая, нормальная, гипертрофированная. Показано, что в окрестностях ТЭЦ на угле и мазуте снижается доля фертильной пыльцы нормальных размеров (62–69 %), увеличивается содержание карликовой (16–18 %) и гипертрофированной (17,4–22,7 %). Стерильные пыльцевые зерна в основном имеют карликовые размеры (63–70 %). Результаты биомониторинга свидетельствуют о том, что ТЭЦ загрязняют городскую среду ванадием и другими токсичными металлами, вызывающими стерилизацию мужских гамет *S. gorodkovii*. Для улучшения экологической ситуации необходим переход котельных г. Мурманск на использование природного газа.

**Ключевые слова:** биомониторинг, Арктика, тяжелые металлы, *Sorbus gorodkovii* Pojark., стерильность пыльцы  
**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра лабораторного анализа и технических измерений по Мурманской области за помощь в выполнении атомно-абсорбционной спектрофотометрии на содержание тяжелых металлов.

**Для цитирования:** 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>

Original article

### Biomonitoring of the environment of the Arctic urbanized area using the pollen of *Sorbus gorodkovii* Pojark.

N. V. Vasilevskaya✉, A. I. Sikalyuk

Murmansk Arctic University, Murmansk, Russian Federation  
✉[n.v.vasilevskaya@gmail.com](mailto:n.v.vasilevskaya@gmail.com)

#### Abstract

This article investigates the content of heavy metals (Cu, Ni, V, Cd, Zn) in the reproductive organs of the Gorodkov's rowan (*Sorbus gorodkovii* Pojark.) growing in the impact zone of environmentally hazardous facilities in Murmansk

(CHP plants, waste incineration plant and trade sea port). The samples most contaminated by heavy metals were registered in the vicinity of the incineration plant. High concentrations of vanadium (4,2–4,8 mg/kg) and Cu, Ni, Cd, and Zn exceeding the limits of MPC are revealed in the impact zone of CHP plants operating on fuel oil. Biomonitoring of the viability of *S. gorodkovii* pollen showed that in all samples, the content of fertile pollen grains was reduced compared to that in the control. At the test sites of the Central and South CHP plants, the proportion of fertile pollen was 35–41 % (compared to 72 % in the control sample). The induced sterility was more than two times higher than the spontaneous sterility. High concentrations of vanadium and other toxic metals in emissions of Heating Plants have a gametocidal effect on the male gametophyte of *S. gorodkovii*. Groups of fertile and sterile pollen grains were selected according to their size: dwarf, normal, or hypertrophied. In the vicinity of the CHP plants, the proportion of fertile pollen of normal size decreased (62–69 %), whereas the content of dwarf (16–18 %) and hypertrophic pollen (17.4–22.7 %) increased. Sterile pollen grains were mostly dwarf (63–70 %). The results of biomonitoring indicated that CHP plants polluted the urban environment with vanadium and other toxic metals, which caused sterilization of *S. gorodkovii* male gametes. To improve the ecological situation in Murmansk, it is necessary to switch the thermal stations for the use of natural gas.

**Keywords:** biomonitoring, Arctic, heavy metals, *Sorbus gorodkovii* Pojark., pollen sterility

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to the staff of the Center of Laboratory Analysis and Technical Measurements in the Murmansk Region for their help with atomic absorption spectrophotometry for heavy metals.

**For citation:** 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>

## Введение

Обеспечение экологической безопасности – одно из условий устойчивого развития арктических территорий. Для Арктической зоны России характерны экстремальные природно-климатические условия, уязвимость экосистем, кластерный характер освоения территорий, невысокая плотность населения. Мурманск – единственный незамерзающий порт российской Арктики с развитой инфраструктурой и промышленными объектами. Состояние окружающей среды города в последние годы ухудшается за счет выбросов ТЭЦ, работающих на мазуте низкого качества, мусоросжигательного завода, пылевого загрязнения Мурманским морским торговым портом в результате перевалки угля открытым способом.

Мурманск – один из последних региональных центров Северо-Запада РФ, где в котельных используется мазут. Городские ТЭЦ в Петрозаводске, Вологде и Архангельске переоборудованы и работают на природном газе. В выбросах мурманских ТЭЦ содержатся загрязняющие вещества, обладающие высокой мутагенностью (ванадий, бенз(а)пирен, марганец и его соединения и др.). Мурманский морской торговый порт лидирует среди портов Северо-Запада России по объему перерабатываемых сухих грузов, основным из которых является каменный уголь (93,5 %). В состав угольной пыли входят горючие летучие элементы, двуокись кремния, пирит, зола и шлак, состоящие из ок-

сидов кремния, алюминия, железа (III), кальция, калия, редких и рассеянных элементов (Ge, V, W, Ti и т. д.) [1]. Мурманский завод по термической обработке твердых бытовых отходов относится к I классу экологической опасности и к I категории негативного воздействия на окружающую среду. Специфическими выбросами мусоросжигательных заводов являются супертоксиканты: диоксины и фураны, а также тяжелые металлы. Основными загрязнителями окружающей среды г. Мурманск являются полициклические ароматические углеводороды и летучие вещества (SO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub>), тяжелые металлы, нефть [2]. Почвы сильно загрязнены тяжелыми металлами (Cu, Zn, Ni, V) [3], аналогичные данные получены при изучении донных отложений малых озер города [2, 4].

Известно, что многие виды растений рассматриваются как биомониторы и биоиндикаторы генотоксичности загрязненного воздуха за счет накопления поллютантов [5]. В качестве биомониторов на гаметоцидное воздействие загрязняющих веществ могут быть использованы репродуктивные органы растений как наиболее чувствительные к антропогенным факторам [6]. Воздействие поллютантов приводит к формированию стерильной пыльцы, нарушению ее размеров и формы. Использование пыльцевых зерен для выявления мутагенного воздействия загрязняющих веществ обусловлено тем, что именно в гаплоидном состоянии проявляются летальные

мутации [7]. Разработаны биотесты по мутагенности загрязняющих веществ и окружающей среды, основанные на жизнеспособности мужских гамет растений [8, 9], при этом чем выше содержание abortивной пыльцы, тем выше токсичность среды. В Мурманской области исследования эмбриологического состояния пыльцы на фертильность и стерильность проведены на древесных видах растений (*Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*, *Sorbus gorodkovii*, *Syringa josicaca*) в городах Мурманск, Североморск, Мончегорск, Заполярный, Апатиты [9–11].

Цель работы – биомониторинг качества окружающей среды в окрестностях экологически опасных объектов г. Мурманск с использованием пыльцы *Sorbus gorodkovii*.

### Материалы и методы исследования

*Sorbus gorodkovii* Pojark. (рябина Городкова) – европейский гипоарктомонтанный вид, ареал которого расположен за Полярным кругом. Эндемик Восточной Фенноскандии, встречается в тундровой и лесной зонах, горнолесном и горно-тундровом поясах. Таксономический статус *S. gorodkovii* остается предметом дискуссий, ее рассматривают как отдельный вид [12], региональную расу *S. aucuparia* [13] или как гибрид *S. aucuparia* и *S. sibirica* [14]. Согласно С. К. Черепанову [15], данный таксон является отдельным видом. *S. gorodkovii* занесена в Красную книгу Восточной Фенноскандии и Красную книгу Мурманской области, подлежит бионадзору. Повсеместно распространена в городских насаждениях Мурманской области как вид, наиболее устойчивый к субарктическому климату. Неприхотливость к условиям произрастания, хорошая приживаемость позволяют широко использовать *S. gorodkovii* для озеленения улиц в виде рядовых посадок, групп и куртин. Составляет основу зеленых насаждений г. Мурманск [16].

В конце мая 2020 г. на территории г. Мурманск, в зоне воздействия экологически опасных объектов, заложено пять пробных площадок:

1. «Росляково Южное» – ул. Молодежная, в 170 м от котельной «Росляково Южное». Основным видом топлива является уголь, который складирован открытым способом. Котельная не оборудована фильтрами очистки выбросов.

2. «ТО ТБО» – ул. Домостроительная, в 482 м от завода по термической обработке твердых бытовых отходов. В выбросах предприятия присутствуют высокотоксичные тяжелые металлы

(Ni, Cu, Cd, V, Pb, Co), относящиеся к I и II классам опасности.

3. «Мурманский порт» – Портовый проезд, в 950 м от Мурманского морского торгового порта. На его территории осуществляются перегрузка каменного угля, апатита, марганцевой руды, хранение мазута в резервуарах мазутного хозяйства, хранение нефтепродуктов в резервуарах АЗС и др.

4. «Центральная ТЭЦ» – ул. Траловая, в 353 м от Котлотурбинного цеха (Центральная ТЭЦ). Технологической особенностью ПАО «Мурманская ТЭЦ» является его работа на мазуте.

5. «Южная ТЭЦ» – ул. Баумана, в 930 м от Котлотурбинного цеха № 1 (Южная ТЭЦ). Самая мощная котельная на территории г. Мурманск и области. Основной вид топлива – мазут.

Контрольная площадка расположена в пос. Верхнетуломский, в 83 км от г. Мурманск в юго-западном направлении. В поселке и его окрестностях отсутствуют промышленные объекты. Сбор соцветий *S. gorodkovii* для анализа на содержание тяжелых металлов проводился в конце июня 2020 г., в период массового цветения. С каждого из 10 маркированных деревьев на площадках отобраны по 10 соцветий, которые были высушены до воздушно-сухого состояния (N = 100). Определение содержания тяжелых металлов (Cu, Ni, V, Cd, Zn) в соцветиях проводилось на атомно-абсорбционном спектрометре contrAA 300 в аккредитованной лаборатории ЦЛАТИ по Мурманской области. Для определения ПДК тяжелых металлов в репродуктивных органах рябины использовали СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (для плодов и ягод)» от 14.11. 2001.

Для цитологического анализа с каждого из 10 маркированных деревьев на пробных площадках собраны по 10 соцветий с созревшей пыльцой, из которых случайным образом отобраны по пять цветков и сформирована общая проба (N = 500). В качестве фиксатора использовали 40-градусный этиловый спирт. Исследования проводили ацетокарминовым методом [17]. Фертильная пыльца содержит крахмал и окрашивается в малиновый цвет, в отличие от стерильной, которая остается бесцветной. Цитологический анализ проводили на временных препаратах с помощью световой микроскопии (увеличение в 400 раз). Подсчитывалось число фертильной и стерильной пыльцы, всего про-

смотрено не менее 500 пыльцевых зерен в каждой общей пробе. На основе полученных данных проведен расчет индекса стерильности пыльцы *S. gorodkovii*, который показывает, во сколько раз частота индуцированного уровня стерильности, вызванная загрязнением среды, выше уровня спонтанной стерильности в контроле [6]. С помощью окулярмикрометра измерялись размеры полярной оси пыльцевых зерен. Выделены три размерные группы пыльцы: карликовая, нормальная (средняя) и гипертрофированная. К мелким пыльцевым зернам по общепринятой классификации отнесены зерна с длиной полярной оси до 25 мкм. Нормальными (средними) по размерам считались пыльцевые зерна с полярным диаметром 25–27,5 мкм, гипертрофированными – более 27,5 мкм. Данные по жизнеспособности и размерам пыльцевых зерен *S. gorodkovii* обработаны однофакторным дисперсионным анализом с использованием критерия Фишера. Результаты считались статистически достоверными при  $p \leq 0,05$ .

### Результаты и обсуждение

#### Содержание тяжелых металлов в репродуктивных органах *Sorbus gorodkovii*

Атомно-абсорбционная спектрофотометрия соцветий рябины показала, что тяжелые металлы содержатся во всех исследованных образцах. В контроле превышение ПДК по Cu, Ni, V, Cd и Zn незначительно, в окрестностях экологически опасных объектов г. Мурманск – в несколько раз выше (табл. 1). Концентрация меди в репродуктивных органах *S. gorodkovii* в контроле –

1,49 мг/кг, на пробных площадках города варьирует от 2,98 («Морской порт») до 6,33 мг/кг («Южная ТЭЦ») (см. табл. 1). Медь – высокотоксичное, канцерогенное и мутагенное вещество, относящееся ко 2 классу опасности по воздействию на окружающую среду. Значительное превышение ПДК (в 5–6 раз) выявлено в окрестностях городских котельных (Росляково Южное, Центральная и Южная ТЭЦ) и мусоросжигательного завода (см. табл. 1).

Никель содержится в пробах в меньших концентрациях: в контроле – 0,62 мг/кг, в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск варьирует от 0,98 («Росляково Южное») до 2,11 мг/кг («ТО ТБО»), превышая ПДК в 2–4 раза (см. табл. 1). Особенно высокое содержание никеля обнаружено в соцветиях рябины пробных площадок «Морской порт» и «ТО ТБО». Среди тяжелых металлов никель имеет особенно высокую токсичность и большую скорость поступления в надземные органы растений, оказывая сильное влияние на их рост и развитие. В образцах выявлено очень высокое содержание ванадия, от 2,46 («ТО ТБО») до 4,81 мг/кг («Южная ТЭЦ») (см. табл. 1). В связи с тем что ПДК для ванадия не разработано, полученные данные сравнивались с его концентрацией в образце контрольной площадки (0,27 мг/кг). Содержание ванадия в пробах из окрестностей экологически опасных промышленных объектов превысило значения контроля в 9 («ТО ТБО») – 18 раз («Южная ТЭЦ»). Максимальная концентрация (в 16–18 раз выше, чем в контроле) выявлена в

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в соцветиях *Sorbus gorodkovii* (мг/кг) в г. Мурманск

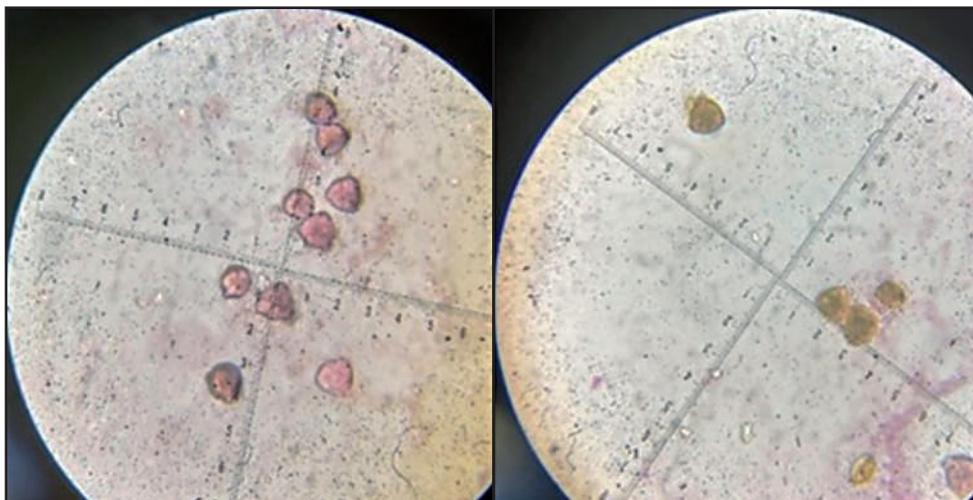
Table 1

The content of heavy metals in the inflorescences of *Sorbus gorodkovii* (mg/kg) in Murmansk

Металл/ Metal	ПДК*/ MPC	Контроль/ Control	Росляково/ Roslyakovo	ТО ТБО/ Incineration plant	Морской порт/ Sea Port	Центральная ТЭЦ/ Central Heating plant	Южная ТЭЦ/ South Heating plant
Cu	1,0	1,49±0,45	5,13±1,54	5,45±1,63	2,98±0,90	5,35±1,60	6,33±1,90
Ni	0,50	0,62±0,19	0,98±0,29	2,11±0,63	1,91±0,57	1,14±0,34	1,18±0,36
V	–	0,27±0,08	2,80±0,84	2,46±0,74	2,54±0,76	4,20±1,26	4,81±1,44
Cd	0,03	0,04±0,01	0,04±0,01	0,11±0,03	0,04±0,01	0,05±0,01	0,05±0,02
Zn	1,0	1,89±0,57	3,0±0,90	6,74±2,02	2,56±0,77	3,22±0,97	3,43±1,03

\* ПДК приводится по: СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (для плодов и ягод)» от 14.11. 2001.

\* MPC according to SanPiN 2.3.2.1078-01 “Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products (for fruits and berries)” dt. 14.11.2001.



**Рис. 1.** Пыльцевые зерна *Sorbus gorodkovii* при увеличении в 400 раз (пыльца с желтой окраской – стерильная, пыльца с розовой окраской – фертильная)

**Fig. 1.** Pollen grains of *Sorbus gorodkovii* at 400 times magnification (pollen with yellow color – sterile, pollen with pink color – fertile)

образцах пробных площадок Центральной и Южной ТЭЦ, работающих на мазуте низкого качества (см. табл. 1). Ванадий – один из рассеянных элементов, присутствует в различных минералах, в природной среде в свободном виде не встречается, очень токсичен. Является основным веществом, входящим в состав мазутной золы. Кадмий накапливается в репродуктивных органах рябины менее значительно, чем другие тяжелые металлы, от 0,04 («Росляково Южное») до 0,11 мг/кг («ТО ТБО») (см. табл. 1). Концентрация кадмия в окрестностях угольной котельной «Росляково Южное» и Мурманского морского торгового порта аналогична контролю. Превышения ПДК выявлены на пробных площадках Центральной и Южной ТЭЦ (1,6–1,7 ПДК) и мусоросжигательного завода (3,6 ПДК). По уровню токсичности кадмий является одним из наиболее опасных химических элементов для растений и окружающей среды [3]. Содержание цинка в соцветиях рябины варьирует от 2,56 («Морской порт») до 6,74 мг/кг («ТО ТБО»), в контроле – 1,89 мг/кг (см. табл. 1). Превышения концентраций цинка обнаружены на всех пробных площадках – от 2,6 («Морской порт») до 6,7 ПДК («ТО ТБО»). При повышенных концентрациях цинк может вызывать нарушения роста и морфогенеза растений [3].

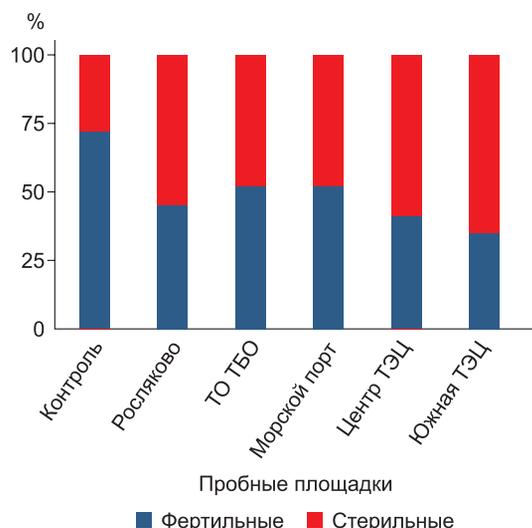
Анализ результатов атомно-абсорбционной спектрофотометрии показал, что в репродуктивных органах *S. gorodkovii* из окрестностей му-

соросжигательного завода и ТЭЦ г. Мурманск (Южная и Центральная ТЭЦ) содержатся высокие концентрации тяжелых металлов. На пробной площадке «ТО ТБО» выявлены максимальные превышения ПДК тяжелых металлов: меди (5,4 ПДК), никеля (4,2), кадмия (3,6) и цинка (6,7). В зоне воздействия Центральной и Южной ТЭЦ в образцах обнаружен чрезвычайно высокий уровень содержания ванадия (в 16–18 раз выше контроля), в 5–6 раз превышены ПДК по меди, в 3 – по цинку, в 2 – по никелю, в 1,6–1,7 раза – по кадмию.

#### *Воздействие тяжелых металлов на фертильность пыльцы Sorbus gorodkovii*

В результате цитологического анализа получено, что при окрашивании препаратов ацетокармином пыльца *S. gorodkovii* приобретает розовую, малиновую, желтую окраску или остается бесцветной (рис. 1). Пыльцевые зерна, окрашенные в розовый и малиновый цвет, рассматривались как фертильные, желтые и бесцветные – как стерильные (абортивные).

В образцах контрольной площадки пос. Верхнетуломский доля фертильной пыльцы рябины составляет 72 %. В пробах из окрестностей экологически опасных промышленных предприятий г. Мурманск выявлено низкое содержание фертильной пыльцы (35–52 %). Минимальная доля фертильных пыльцевых зерен – на пробных площадках Южной (35 %) и Центральной



**Рис. 2.** Соотношение фертильной и стерильной пыльцы *Sorbus gorodkovii* в окрестностях промышленных объектов г. Мурманск (%)

**Fig. 2.** The ratio of fertile and sterile pollen of *Sorbus gorodkovii* in the vicinity of industrial facilities in Murmansk (%)

ТЭЦ (41 %), котельной «Росляково Южное» (45 %) (рис. 2, табл. 2).

Доля стерильной (абортивной) пыльцы в контроле составила 28 % (см. рис. 2, табл. 2). Для

*S. gorodkovii* характерна достаточно высокая спонтанная стерильность мужского гаметофита в природных популяциях, что определяется ее происхождением. Количество стерильной пыльцы увеличивается в зоне воздействия промышленных объектов г. Мурманск. Наибольшее ее содержание выявлено в окрестностях Южной (65 %) и Центральной ТЭЦ (59 %), работающих на мазуте, а также угольной котельной «Росляково Южное» (55 %). Это индуцированная стерильность, вызванная промышленным загрязнением окружающей среды, которая свидетельствует о высокой токсичности выбросов мурманских ТЭЦ. Однофакторный дисперсионный анализ показал, что тяжелые металлы влияют на количество стерильной и фертильной пыльцы. Данные по содержанию фертильной ( $F = 33,8$ ;  $p \leq 0,05$ ) и стерильной пыльцы ( $F = 158,4$ ;  $p \leq 0,05$ ) между площадками статистически значимо различаются. Полученные результаты согласуются с исследованиями, проведенными в г. Североморск, где доля абортивной пыльцы *S. gorodkovii* составляла 38–44 % на пробных площадках в окрестностях городской ТЭЦ, работающей на мазуте [9].

Таблица 2

**Доля фертильной и стерильной пыльцы, индекс стерильности *Sorbus gorodkovii* в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск**

Table 2

**The ratio of fertile and sterile pollen, the index of sterility of *Sorbus gorodkovii* in the vicinity of industrial enterprises in Murmansk**

Пробная площадка/ Test sites	Общее число пыльцевых зерен/ Total number of pollen grains	Стерильной пыльцы/ Sterile pollen		Фертильной пыльцы/ Fertile pollen		Индекс стерильности/ Index of sterility
		Всего/ Total	%	Всего/ Total	%	
Росляково Roslyakovo	500	275	55,0	225	45,0	2,0
ТО ТБО Incineration Plant	521	251	48,2	270	51,8	1,8
Морской порт Sea Port	520	252	48,0	268	52,0	1,8
Центральная ТЭЦ Central Heating Plant	509	299	58,7	210	41,3	2,1
Южная ТЭЦ South Heating Plant	516	334	64,7	182	35,3	2,4
Контроль Control	505	141	28,0	364	72,0	–

Расчет индекса стерильности (ИС) *S. gorodkovii* показал, что индуцированная стерильность пыльцы в окрестностях мурманских котельных в два раза и более превышает спонтанную (в контроле). Наиболее высокие значения индекса стерильности выявлены в окрестностях Южной (2,4) и Центральной ТЭЦ (2,1), котельной «Росляково Южное» (2,0) (см. табл. 2). На пробных площадках мусоросжигательного завода и Морского порта значения индекса стерильности ниже.

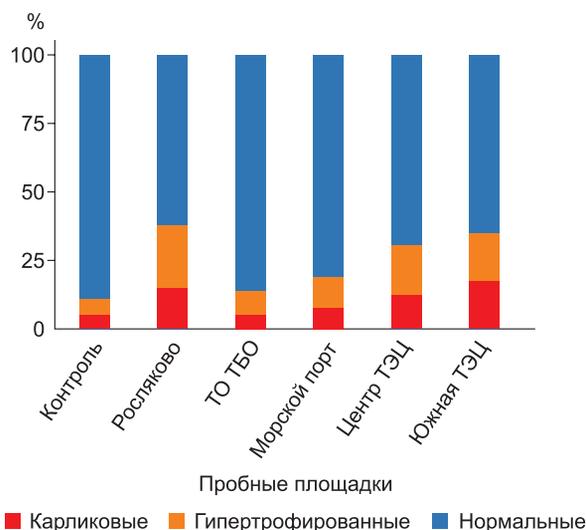
Высокое содержание abortивной пыльцы в соцветиях (48–65 %) и значения индекса стерильности (1,8–2,4) являются индикаторами гаметоцидного воздействия выбросов промышленных предприятий г. Мурманск на процесс формирования гамет *S. gorodkovii*. Причинами стерильности пыльцевых зерен являются генетические мутации, цитоплазматическая мужская стерильность, химическая кастрация [17]. Для стерильной пыльцы характерны деформация и дегенерация ядер, цитоплазмы или целых клеток. Образование такой пыльцы у растений, как правило, связано с нарушениями в ходе мейоза и микроспорогенеза [7].

#### *Влияние тяжелых металлов на размеры пыльцевых зерен*

Пыльца *S. gorodkovii* имеет трехлопастную форму с полюса и эллиптическую с экватора. В результате измерения полярного диаметра пыльцевых зерен получено, что фертильная и стерильная пыльца *S. gorodkovii* значительно варьируют по размерам. Выделено три размерные группы: карликовые, средние (нормальные) и гипертрофированные. Средний размер полярной оси нормальной фертильной пыльцы варьирует от 25,7 до 25,9 мкм, в контроле – 25,8 мкм. Наибольшее содержание фертильных пыльцевых зерен нормальных размеров выявлено в образцах «ТО ТБО» (85,6 %) и «Морской порт» (80,5 %) (рис. 3), ее доля значительно снижается в окрестностях мурманских котельных (61,8–69 %).

В протестированных образцах выявлено много карликовой фертильной пыльцы. Длина полярной оси карликовой фертильной пыльцы 21,9–22,5 мкм, в контроле – 22,3 мкм. В окрестностях мурманских котельных выявлено повышенное содержание нанопыльцы *S. gorodkovii* – от 12,9 до 17,9 % (см. рис. 33), в контроле (поселок Верхнетуломский) – 5,5 % ( $F = 21,8; p \leq 0,05$ ).

Размер полярной оси гипертрофированной фертильной пыльцы *S. gorodkovii* 30,3–31,1 мкм,



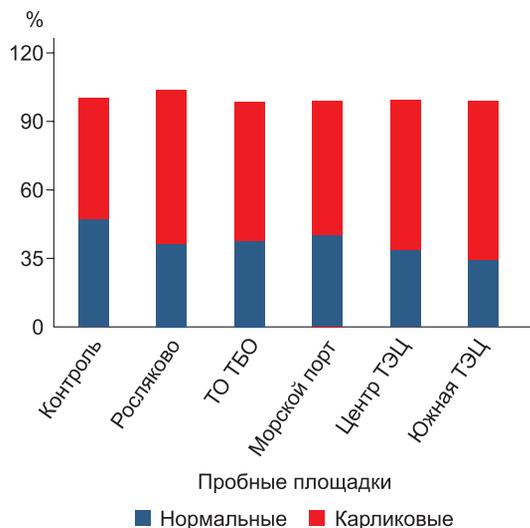
**Рис. 3.** Соотношение размерных групп фертильной пыльцы *Sorbus gorodkovii* в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск (%)

**Fig. 3.** Ratio of normal, dwarf and hypertrophied fertile pollen grains of *Sorbus gorodkovii* in the city of Murmansk (%)

в контроле – 30,5 мкм. Значительное увеличение ее доли выявлено в окрестностях мурманских ТЭЦ (17,4–22,7 %), в контроле – 6 % ( $F = 25,7; p \leq 0,05$ ) (см. рис. 3). Предположительно, это диплоидная пыльца, в 1,2 раза превышающая нормальную в диаметре. Появление гипертрофированной пыльцы связано с воздействием мутагенов на процесс мейоза, а также с асинхронностью расхождения тетрад микроспор при микроспорогенезе [6].

Измерение полярного диаметра стерильной пыльцы *S. gorodkovii* показало, что в основном она имеет карликовые размеры (59–70 %) (рис. 4). При этом она достоверно мельче (19,7–20,8 мкм), чем фертильная (21,9–22,8 мкм). Максимальное количество abortивной нанопыльцы выявлено в окрестностях мурманских котельных (63–70 %) (см. рис. 4). Данные по пробным площадкам статистически значимо различаются ( $F = 163; p \leq 0,05$ ).

Длина полярной оси средних по размеру стерильных пыльцевых зерен 25,2–25,5 мкм. Значительное снижение ее доли отмечено в зоне промышленного воздействия всех предприятий Мурманска, особенно около Южной и Центральной ТЭЦ (см. рис. 4). Средний размер полярной оси гипертрофированной стерильной пыльцы варьирует от 30 до 35 мкм (в контроле – 30 мкм), ее содержание во всех образцах единично (0,6–1,2 %).



**Рис. 4.** Соотношение размерных групп стерильной пыльцы *Sorbus gorodkovii* в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск (%)

**Fig. 4.** Ratio of size groups of sterile *Sorbus gorodkovii* pollen in the vicinity of industrial enterprises in Murmansk (%)

Исследования показали, что наибольшее токсическое воздействие на пыльцу *S. gorodkovii* оказывают выбросы котельных г. Мурманск, работающих на мазуте и угле. Южная и Центральная ТЭЦ относятся ко 2 классу экологической опасности, угольная котельная «Росляково Южная» – к 3. ТЭЦ, использующие в качестве топлива мазут или уголь, являются наиболее опасными для живых организмов, в том числе человека. Выбросы от любых тепловых станций на мазуте имеют повышенное содержание Fe, V, Ni, Cr и других элементов [18]. Летучая зола, образующаяся при сжигании мазута тепловыми станциями, обычно содержит 3–4 % никеля и 2–6 % ванадия [4]. Ванадий и никель являются примесями в мазуте, который в настоящее время используется на Мурманской ТЭЦ [2]. При сжигании топлива образуется пентаоксид диванадия ( $V_2O_5$ ), который обладает высокой токсичностью [19]. В результате исследования малых озер г. Мурманск учеными Кольского научного центра РАН получено, что в воде озер Среднее и Окунево, близко расположенных к ТЭЦ, содержатся наиболее высокие концентрации ванадия [4]. Соединения ванадия представляют наибольшую опасность для растений в связи с высокой токсичностью, вызывая ингибирование процессов развития. По-видимому, именно большие концентрации ванадия в выбросах мурманских ТЭЦ оказывают гаметоцидное воздей-

ствие и вызывают стерилизацию мужского гаметофита *S. gorodkovii*. Превышающие ПДК концентрации меди, никеля, цинка, кадмия также оказывают токсическое воздействие на формирование мужских гамет. При превышении пороговых концентраций меди в растениях возникает токсический эффект, в результате которого происходит торможение роста и развития [3]. Никель влияет на репродукцию растений, вызывая аномальное развитие гамет и нарушение эмбриогенеза [3]. Тяжелые металлы вызывают хромосомные нарушения в мужских гаметах на разных стадиях мейоза у хвойных, произрастающих в условиях хронического загрязнения предприятиями цветной металлургии [20]. Есть исследования, в которых показано, что тяжелые металлы аккумулируются пылью, снижая ее фертильность [21]. Их микрочастицы оседают и накапливаются на экзине пыльцевых зерен [22], что может привести к ее разрыву и способствует выбросу аллергенов в окружающую среду.

В исследовании на территории г. Мурманск выявлено, что под воздействием выбросов котельных формируется много стерильной пыльцы *S. gorodkovii*, имеющей карликовые размеры. Размеры пыльцевых зерен являются стабильным видовым (чаще родовым) признаком, для них характерна очень низкая индивидуальная, внутривидовая и внутривидовая географическая изменчивость [23]. В условиях загрязнения среды пыльца растений варьирует в размерах больше, чем в природных популяциях. Изменение величины пыльцы связано с нарушением процессов роста и деления клеток при формировании первичных клеток археспория и тетрад микроспор, что приводит к генетической разнокачественности. На образование мелкой пыльцы в условиях промышленного загрязнения и под воздействием автотранспорта указывают многие авторы [24]. Появление карликовой пыльцы связано с нарушениями мейоза, при которых происходит потеря части генетического материала в результате повреждения веретена деления или хромосомных мутаций [25]. Размеры пыльцы можно использовать как индикатор изменения ее морфологии в условиях антропогенного стресса.

### Заключение

Исследования на территории г. Мурманск показали, что выбросы ТЭЦ токсичны, содержат высокие концентрации тяжелых металлов (осо-

бенно ванадия), оказывают мутагенное воздействие на процесс формирования мужских гамет *S. gorodkovii*, в результате которого в основном образуется очень мелкая стерильная (абортивная) пыльца. Стерильность пыльцы, вызванная промышленным загрязнением среды, является большой экологической проблемой, затрагивающей продуктивность многих видов растений. В экологических исследованиях высокая доля абортивной пыльцы является индикатором загрязнения среды и присутствия в ней мутагенов, которые вызывают нарушения процесса микрогаметогенеза у высших растений. Результаты биомониторинга в г. Мурманск свидетельствуют о том, что пыльцу гипоарктических видов растений можно использовать для выявления гаметоцидного воздействия токсичных металлов на арктических урбанизированных территориях. Для улучшения экологической ситуации в г. Мурманск необходим переход тепловых станций на использование природного газа.

### Список литературы / References

1. Воробьев А.Е., Мозолькова А.В. Минеральные включения угольных пластов: формы нахождения и основные способы растворения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;3:141–148.  
Vorobyov A.E., Mozolkova A.V. Mineral inclusions of coal seams: forms of occurrence and main methods of dissolution. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;3:141–148. (In Russ.)
2. 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>
3. 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 Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020;421:052031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052031>
4. Slukovskii Z.I., Guzeva A.V., Dauvalter V.A. Vanadium as an indicator of the impact of fuel oiled thermal power plants on the environment: paleolimnological reconstructions. *Limnology and Freshwater Biology*. 2020;4:513–514. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-513>
5. Greguskova E., Mičičeta K. Phytoindication of the ecogenotoxic effects of vehicle emissions using pollen abortion test with native flora. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2013;22:1069–1076.
6. Ибрагимова Э.Э. Генеративные органы высших растений – биомониторы токсического действия аэро-поллютантов. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Серия: Биология и Химия*. 2017;1:13–23.  
Ibragimova E.E. Generative organs of higher plants as biomonitors of the toxic effect of air pollutants. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Series: Biology and Chemistry*. 2017;1:13–23. (In Russ.)
7. Бессонова В.П., Фендюр Л.М., Пересыпкина Т.Н. Влияние загрязнения окружающей среды на мужскую фертильность декоративных цветочных растений. *Ботанический журнал*. 1997;82(5):38–45.  
Bessonova V., Fendyur L., Peresyupkina T. Effect of environmental pollution on male fertility of ornamental flower plants. *Botanicheskii Zhurnal*. 1997;82:38–45. (In Russ.)
8. Fleck A.S., Moresco M.B., Rhoden C.R. Assessing the genotoxicity of traffic-related air pollutants by means of plant biomonitoring in cities of a Brazilian metropolitan area crossed by a major highway. *Atmospheric Pollution Research*. 2016;7:488–493. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.12.002>
9. Vasilevskaya N.V. Pollution of the Environment and Pollen: A Review. *Stresses*. 2022;2: 515–530. <https://doi.org/10.3390/stresses2040035>
10. Vasilevskaya N.V., Domakhina A.D. Teratomorphism of pollen of *Larix sibirica* Ledeb. (*Pinaceae* Lindl.) in the Arctic urbanized territory. *Czech Polar Reports*. 2018;8(1):24–36. <https://doi.org/10.5817/CPR2018-1-2>
11. Vasilevskaya N.V., Osechinskaya P.V. Palynoidication of the environment in the impact zone of the Apatit mining processing plant with the use of pollen of *Pinus sylvestris* L. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;723:032010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032010>
12. Сальникова Л.И. Сравнительная анатомия побегов *Sorbus aucuparia*, *S. gorodkovii* и *S. sibirica* (*Rosaceae*). *Ботанический журнал*. 1980;65(11):1591–1600.  
Salnikova L.I. Comparative anatomy of the shoots of *Sorbus aucuparia*, *S. gorodkovii* and *S. sibirica* (*Rosaceae*). *Botanicheskii Zhurnal*. 1980;65(11):1591–1600. (In Russ.)
13. Шауло Д.Н., Драчев Н.С., Кузьмин И.В. Интрогрессивная гибридизация в роде *Sorbus* (*Rosaceae*) таежной зоны Тюменской области. *Вестник Тюменского государственного университета*. 2009;3:209–215.  
Shaulo D.N., Drachev N.S., Kuzmin I.V. Introgressive hybridization in the genus *Sorbus* (*Rosaceae*) of the taiga zone of the Tyumen region. *Tyumen State University Herald*. 2009;3:209–215. (In Russ.)
14. Заиконникова Т.И. Рябина – *Sorbus* L. *Флора Восточной Европы*. СПб. 2001;X:535–543.  
Zaikonnikova T.I. Rowan – *Sorbus* L. *Flora of Eastern Europe*. Saint Petersburg. 2001;X:535–543. (In Russ.)
15. Черепанов С.К. *Сосудистые растения России и сопредельных государств*. СПб.: Мир и семья-95; 1995. 990 с.  
Czerepanov S.K. *Vascular Plants of the Russia and Neighboring States*. Saint Petersburg: Mir i semya-95; 1995. 990 p. (In Russ.)
16. Гонтарь О.Б., Святковская Е.А., Тростенюк Н.Н., Коробейникова Н.М., Шлапак Е.П., Носатенко О.Ю. Мониторинг состояния древесных насаждений на некоторых объектах озеленения в центральной части

города Мурманска. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2013;15(3):621–625.

Gontar O.B., Svyatkovskaya E.A., Trostenyuk N.N., Korobeynikova N.M., Shlapak E.P., Nosatenko O.Yu. Monitoring of the state of woody plants at some objects of gardening in central part of the city of Murmansk. *Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Science*. 2013;15(3):621–625. (In Russ.)

17. Паушева З.П. *Практикум по цитологии растений*. М.: Агропромиздат; 1988. 271 с.

Pausheva Z.P. *Workshop on Plant Cytology*. Moscow: Agropromizdat; 1988. 271 p. (In Russ.)

18. Teng Y.S., Zhang Ni C., Wang J., Lin X., Huang Y. Environmental geochemistry, and ecological risk of vanadium pollution in Panzhihua mining and smelting area, Sichuan, China. *Chinese Journal of Geochemistry*. 2006; 25:379–385. <https://doi.org/10.1007/s11631-006-0378-3>

19. Старостина И.В., Пендюрин Е.А., Смоленская Л.М. Оценка токсикологических свойств шламовых отходов феррованадиевого производства. *Современные проблемы науки и образования*. 2012;6. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7979>

Starostina I.V., Pendyrin E.A., Smolenskaya L.M. Toxicological properties of sludge waste production ferrovanadium. *Modern Problems of Science and Education*. 2012;6. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7979>. (In Russ.)

20. Калашник Н.А. Оценка чувствительности цитогенетических методов при мониторинговых исследованиях состояния хвойных насаждений. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011;13(5):179–183.

Kalashnik N.A. Asses of the sensitivity of cytogenetic methods in monitoring research of condition of coniferous forests. *Izvestia of Samara Scientific Center of*

*the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(5):179–183. (In Russ.)

21. Yousefi N., Chehregani A., Malayeri B.E., Lorestani B., Cheraghi M. Investigating the effect of heavy metals on developmental stages of anther and pollen in *Chenopodium botrys* L. (Chenopodiaceae). *Biological Trace Element Research*. 2011;140:368–376. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8701-6>

22. Wang X., Gong S., Nakamura S., Kurihara K., Suzuki M., Sakamoto K., Miwa M., Lu S. Air pollutant deposition effect and morphological change of *Cryptomeria japonica* pollen during its transport in urban and mountainous areas of Japan. *WIT Trans. Biomed. Health*. 2009;11:77–89.

23. Козубов Г.М. *Биология плодоношения хвойных на Севере*. Л.: Наука; 1974. 136 с.

Kozubov G.M. *Biology of Fruiting of Conifers in the North*. Leningrad: Nauka; 1974. 136 p. (In Russ.)

24. Махнева С.Г., Меншиков С.Л. Качество пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне действия выбросов АО «Карабашмедь». *Лесной вестник*. 2021; 25:32–44.

Makhneva S.G., Menshchikov S.L. Quality of pollen of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the impact zone of the “Karabashmed”. *Forestry Bulletin*. 2021;25:32–44. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-1-32-44>. (In Russ.)

25. Бессонова В.П. Состояние пыльцы как показатель загрязнения среды тяжелыми металлами. *Экология*. 1992;4:45–50.

Bessonova V.N. The state of pollen as an indicator of environmental pollution by heavy metals. *Russian Journal of Ecology*. 1992;4:45–50. (In Russ.)

#### Об авторах

ВАСИЛЕВСКАЯ Наталья Владимировна, доктор биологических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-6926-9353>, Scopus AuthorID: 15926526000, РИНЦ AuthorID: 141850, e-mail: n.v.vasilevskaya@gmail.com

СИКАЛЮК Анна Игоревна, магистр биологии, e-mail: <https://orcid.org/0000-0001-8317-1814>, e-mail: anna.sikalyuk@yandex.ru

#### About the authors

VASILEVSKAYA, Natalia Vladimirovna, Dr. Sci. (Biol.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6926-9353>, Scopus AuthorID: 15926526000, RISC AuthorID: 141850, e-mail: n.v.vasilevskaya@gmail.com

SIKALYUK, Anna Igorevna, M. Biol., <https://orcid.org/0000-0001-8317-1814>, e-mail: anna.sikalyuk@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 18.04.2023

Поступила после рецензирования / Revised 17.07.2023

Принята к публикации / Accepted 25.07.2023