

Научная статья

УДК 630\*165.51

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-24-37

## Жизнеспособность пыльцы природных популяций *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba Горного Крыма

**В.П. Коба<sup>1</sup>**, д-р биол. наук, проф., зав. лаб.; *ResearcherID*: [АНН-4819-2022](https://orcid.org/0000-0002-2144-0836),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-2144-0836>

**О.О. Коренькова<sup>2</sup>**, канд. биол. наук, доц.; *ResearcherID*: [АНН-3052-2022](https://orcid.org/0000-0001-6482-7312),

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-6482-7312>

**Н.А. Макаров<sup>1</sup>**, аспирант; *ResearcherID*: [HZH-5696-2023](https://orcid.org/0009-0009-0536-4747),

*ORCID*: <https://orcid.org/0009-0009-0536-4747>

<sup>1</sup>Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, спуск Никитский, д. 52, г. Ялта, Республика Крым, Россия, 298648; kobavp@mail.ru, makarov.crimea@yandex.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337; o.o.korenkova@mail.ru✉

Поступила в редакцию 21.04.23 / Одобрена после рецензирования 27.07.23 / Принята к печати 29.07.23

**Аннотация.** Показатели качества пыльцы являются важнейшими характеристиками развития мужских генеративных структур. Для видов рода *Pinus* L. большое значение имеет количественная оценка результативности развития мужской генеративной сферы, т. к. первые, наиболее важные, этапы формирования семян имеют прямую связь с объемом продуцируемой насаждениями пыльцы и уровнем ее жизнеспособности. Исследование проводили в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма. Для сбора образцов пыльцы и изучения ее качества были заложены пробные площади по 4 гипсометрическим профилям в западной части южного макросклона главной гряды Крымских гор на мысе Айя, в урочищах Аязьма, Батилиман и в восточной – на г. Караул-Оба и в урочище Новый Свет. На пробных площадях с 10 модельных деревьев собирали пыльцу в период ее свободного вылета. Установлено, что пыльца *P. brutia* var. *pityusa*, произрастающей в западной части горного Крыма, имеет более высокое качество в сравнении с пыльцой деревьев восточных территорий. В восточной части также наблюдается увеличение количества аномалий размера и формы пыльцевого зерна, что связано с ухудшением температурного режима в период микроспорогенеза. Изучение свойств пыльцы с использованием метода проращивания на искусственной питательной среде выявило снижение уровня жизнеспособности пыльцы по сравнению с результатами ацетокарминового тестирования, различия составили 4–9 %. При этом наиболее высокий уровень прорастания пыльцы отмечен для насаждений верхней части массива – среднее значение составило 89,9±2,5 %, для центральной и нижней частей оно равнялось 88,1±2,7 и 87,9±3,5 % соответственно. Совместное применение 2 способов оценки жизнеспособности пыльцы позволило предложить новый показатель ее качества – индекс реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцы. При помощи данного подхода установлено, что наиболее низкий индекс свойств насаждениям центральной части лесного массива урочища Аязьма – 0,911.

**Ключевые слова:** *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba, природные популяции, пыльца, жизнеспособность, пыльцевые трубки, аномалии формы, аномалии размера

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-24-20128 «Научные основы формирования системы охраны и мониторинга природных популяций *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba Горного Крыма».

**Для цитирования:** Коба В.П., Коренькова О.О., Макаров Н.А. Жизнеспособность пыльцы природных популяций *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba Горного Крыма // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 24–37. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-24-37>

Original article

## The Viability of Pollen from Natural Populations of *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba in the Mountainous Crimea

**Vladimir P. Koba**<sup>1</sup>, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [AHH-4819-2022](https://orcid.org/0000-0002-2144-0836),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2144-0836>

**Olesya O. Korenkova**<sup>2</sup>, Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AHH-3052-2022](https://orcid.org/0000-0001-6482-7312),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6482-7312>

**Nikitia A. Makarov**<sup>1</sup>, Postgraduate Student, ResearcherID: [HZH-5696-2022](https://orcid.org/0009-0009-0536-4747),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0536-4747>

<sup>1</sup>Nikitsky Botanical Gardens – National Scientific Centre of RAS, Nikitsky Spusk, 52, Yalta, Republic of Crimea, 298648, Russian Federation; kobavp@mail.ru, makarov.crimea@yandex.ru

<sup>2</sup>National Research University Moscow State University of Civil Engineering, sh. Yaroslavskoye, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; o.o.korenkova@mail.ru

Received on April 21, 2023 / Approved after reviewing on July 27, 2023 / Accepted on July 29, 2023

**Abstract.** Pollen quality indicators are the most important characteristics of the development of male generative structures. For species of the genus *Pinus* L., a quantitative assessment of the effectiveness of the development of the male generative sphere is of great importance, since the first, most important stages of seed formation are directly related to the volume of pollen produced by plantings and the level of its viability. The research has been carried out in natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* of the Mountainous Crimea. To collect pollen samples and study its quality, test plots have been laid for 4 hypsometric profiles in the western part of the southern macroslope of the main ridge of the Crimean Mountains on Cape Aya, in the Ayazma and Batiliman Mountain Areas and in the eastern part – on Karaul-Oba Mount and in the Novyj Svet Mountain Area. Pollen has been collected from 10 model trees in the test plots during its free flight period. It has been established that the pollen of *P. brutia* var. *pityusa*, which grows in the western part of the mountainous Crimea, has a higher quality compared to the pollen of trees in the eastern territories. In the eastern part, there is also an increase in the number of anomalies in the size and shape of pollen grains, which is associated with deterioration in the temperature regime during the period of microsporogenesis. The study of pollen properties using the germination method on an artificial nutrient medium has revealed a decrease in the level of viability of pollen compared to the results of acetocarmine testing; the differences have been 4–9 %. Meanwhile, the highest level of pollen germination has been observed in the plantations of the upper part of the tract – the average value has been  $89.9 \pm 2.5$  %, for the central and lower parts it has been  $88.1 \pm 2.7$  and  $87.9 \pm 3.5$  %, respectively. The combined use of 2 methods to assess the viability of pollen made it possible to propose a new indicator of its quality – the index of realization of the male gametophyte at the stage of pollen germination. This approach has allowed us to establish that the lowest index is characteristic of the plantations of the central part of the forest tract of the Ayazma Mountain Area – 0.911.

**Keywords:** *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba, natural populations, pollen, viability, pollen tubes, shape anomalies, size anomalies

**Acknowledgements:** The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant no. 22-24-20128 “Scientific Foundations of the Formation of a System for the Protection and Monitoring of Natural Populations of *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba of the Mountainous Crimea”.

**For citation:** Koba V.P., Korenkova O.O., Makarov N.A. The Viability of Pollen from Natural Populations of *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba in the Mountainous Crimea. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 24–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-24-37>

### Введение

В число важных задач охраны и воспроизводства редких и исчезающих видов растений входят изучение процессов их репродукции, оценка влияния факторов внешней среды на состояние и уровень развития генеративной сферы [26, 28]. Решение данных вопросов обеспечит возможность формирования методологических подходов и практических рекомендаций в области совершенствования системы поддержания биоэкологического потенциала и сохранения численности видов растений, которые в настоящее время характеризуются критическим снижением семенного возобновления, сокращением территории естественного произрастания.

Природные насаждения *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) распространены в восточной и западной частях Горного Крыма. *P. brutia* var. *pityusa* занесена в Красную книгу Российской Федерации и Республики Крым как реликтовый вид, крымско-новороссийский эндемик, находящийся под угрозой исчезновения [5]. В настоящее время проблемы охраны *P. brutia* var. *pityusa* в значительной степени усугубляются глубокой трансформацией условий произрастания в местах ее естественного распространения в связи с постоянно возрастающим уровнем неорганизованной рекреации.

Показатели качества пыльцы являются важнейшими характеристиками развития мужских генеративных структур. Для видов рода *Pinus* L. большое значение имеет количественная оценка результативности развития мужской генеративной сферы, т. к. первые, наиболее важные, этапы формирования семян напрямую связаны с объемом продуцируемой насаждениями пыльцы и уровнем ее жизнеспособности [3, 7, 19, 25]. Успешность формирования и развитие пыльцы обуславливают уровень ее жизнеспособности и динамику роста пыльцевых трубок, что, в свою очередь, позволяет анализировать результативность развития мужских репродуктивных структур в связи с видовыми отличиями и спецификой условий произрастания [21, 29]. Большинство исследований, посвященных изучению жизнеспособности пыльцы хвойных растений *in vitro*, проведено по *Pinus sylvestris* L. *P. brutia* var. *pityusa* изучена в меньшей степени, немногочисленны работы по оценке изменчивости жизнеспособности ее пыльцы в зависимости от динамики условий произрастания [2, 11, 23, 24].

Целью исследования стали характеристика качества пыльцы природных популяций *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма, анализ влияния условий произрастания на уровень жизнеспособности, длину пыльцевых трубок и количество нарушений морфогенеза пыльцевого зерна.

## Объекты и методы исследования

Исследование проводили в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма. Для сбора образцов пыльцы и изучения ее качества с использованием методов лесной таксации [1] по 4 гипсометрическим профилям были заложены пробные площади. Объекты располагались в западной части южного макросклона главной гряды Крымских гор: на мысе Айя, в урочищах Аязьма и Батилиман; в восточной: на г. Караул-Оба и в урочище Новый Свет (рис. 1). В урочище Аязьма высота пробных площадей над уровнем моря составляет 50, 180, и 290 м, в Батилимане – 50 и 120 м, на г. Караул-Оба – 40, 70 и 120 м, в урочище Новый Свет – 50 и 100 м. Все пробные площади имели юго-восточную экспозицию с крутизной склонов  $10^{\circ}$ – $15^{\circ}$ .



Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма

Fig. 1. The schematic map of the location of test plots in natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* in the Mountainous Crimea

На каждой пробной площади выбрано 10 модельных деревьев. В конце апреля 2022 г. в период вылета пыльцы ее собирали с модельных деревьев посредством стряхивания микростробиллов в простерилизованные бюксы. Во время проведения лабораторных исследований пыльцу хранили в эксикаторе над хлористым кальцием при температуре  $5^{\circ}\text{C}$  [14]. Жизнеспособность пыльцы определяли по З.П. Паушевой путем окрашивания образцов ацетокармином. Окрашенные пыльцевые зерна подсчитывали в 10 полях зрения при помощи цифрового микроскопа Bresser LCD Micro 5mp. Потенциально жизнеспособные пыльцевые зерна интенсивно окрашиваются ацетокармином. Стерильная пыльца не окрашивается. На проращивание пыльцу ставили через 5–6 дней после сбора в висячей капле питательной среды – 5%-й раствор сахарозы [14]. Для каждого образца на 6-й день проращивания определяли качество пыльцы [4, 14]. Жизнеспособными считали пыльцевые зерна, образующие трубки, длина которых превышала высоту тела пыльцевого зерна. С каждого модельного дерева у 30 пыльцевых зерен измеряли длину пыльцевых трубок с точностью до 1 мкм. Микроизмерения проводили с использованием компьютерной программы AmScor, которая позволяет масштабировать изучаемые объекты с высоким разрешением и фиксировать цифровые снимки в отдельных файлах. При

оценке влияния климатических факторов на развитие мужских репродуктивных структур *P. brutia* var. *pityusa* применяли данные метеостанций г. Севастополь и г. Судак. Количественные результаты наблюдений обрабатывали методами вариационной статистики [9].

### Результаты исследования и их обсуждение

Для определения жизнеспособности пыльцы чаще всего используют окрашивание ацетокармином и ее прорастивание в лабораторных условиях на искусственной питательной среде. Считается, что точнее второй способ, который дает возможность анализировать рост пыльцевых трубок и последующие этапы развития мужского гаметофита [6, 17, 20]. Однако метод окрашивания позволяет с меньшими затратами времени и труда оценивать качество пыльцы. Окрашивание ацетокармином пыльцы *P. brutia* var. *pityusa* насаждений урочища Аязьма показало наибольшую для центральной части массива лесов на высоте 180 м над ур. м. жизнеспособность – среднее количество прокрашенных пыльцевых зерен составило  $96,7 \pm 1,5$  %. В нижнем и среднем поясе она была примерно одинакова. Прорастивание на искусственной питательной среде выявило некоторое снижение жизнеспособности пыльцы по сравнению с результатами ацетокарминового тестирования, различия составили 4–9 %. При этом лучшее прорастание пыльцы наблюдалось у насаждений верхней части массива лесов *P. brutia* var. *pityusa*, среднее значение для них составило  $89,9 \pm 2,5$  %, для центральной и нижней частей показатель был  $88,1 \pm 2,7$  и  $87,9 \pm 3,5$  % соответственно (см. таблицу).

### Показатели качества пыльцы природных популяций *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма The pollen quality indicators of natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* in the Mountainous Crimea

| Высота над уровнем моря, м | Окрашенная пыльца, % |      | Проросшая пыльца, % |      | Длина пыльцевой трубки, мкм |      |
|----------------------------|----------------------|------|---------------------|------|-----------------------------|------|
|                            | M±m                  | CV   | M±m                 | CV   | M±m                         | CV   |
| <i>Аязьма</i>              |                      |      |                     |      |                             |      |
| 50                         | 94,0±2,2             | 6,8  | 87,9±3,5            | 10,7 | 148,0±13,9                  | 19,2 |
| 180                        | 96,7±1,5             | 4,7  | 88,1±2,7            | 10,6 | 143,1±8,2                   | 13,4 |
| 290                        | 94,1±2,2             | 7,2  | 89,9±2,5            | 7,8  | 129,2±7,8                   | 15,0 |
| <i>Батилиман</i>           |                      |      |                     |      |                             |      |
| 50                         | 96,2±1,6             | 5,3  | 92,2±1,9            | 5,6  | 160,3±13,2                  | 21,3 |
| 120                        | 97,9±1,1             | 3,4  | 93,3±2,1            | 5,8  | 139,5±13,9                  | 22,7 |
| <i>Караул-Оба</i>          |                      |      |                     |      |                             |      |
| 40                         | 81,2±5,9             | 15,5 | 70,4±4,2            | 13,1 | 118,4±11,8                  | 23,1 |
| 70                         | 80,1±3,2             | 12,8 | 73,9±3,9            | 12,4 | 89,3±9,8                    | 25,2 |
| 120                        | 81,3±5,9             | 22,9 | 69,9±4,7            | 14,9 | 124,2±12,1                  | 26,8 |
| <i>Новый Свет</i>          |                      |      |                     |      |                             |      |
| 50                         | 87,5±2,6             | 8,8  | 65,8±4,8            | 14,5 | 84,3±5,6                    | 24,0 |
| 100                        | 86,7±4,1             | 14,8 | 73,6±4,3            | 13,8 | 96,5±6,4                    | 26,7 |

Окрашивание ацетокармином позволяет оценить пыльцевые зерна по текущему состоянию развития мужского гаметофита. При прорастивании

не все из них реализуют свой жизненный потенциал. Результаты характеристики пыльцы рассматриваемыми способами дают возможность установить уровень реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцевого зерна. В данном случае жизнеспособность пыльцы, определенная окрашиванием, является показателем количества пыльцевых зерен, проявляющих функциональность на уровне биохимических процессов жизнедеятельности. Доля проросшей пыльцы отражает эффективность последующего этапа репродуктивного цикла, когда в процессе прорастания реализуется лишь часть потенциально жизнеспособной пыльцы. Степень реализации мужского гаметофита на данной стадии можно определить, используя следующую формулу:

$$I_r = W/V,$$

где  $I_r$  – индекс реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцы;  $W$ ,  $V$  – жизнеспособность пыльцы по данным проращивания и окрашивания соответственно.

Если все прокрашенные пыльцевые зерна проявляют жизнеспособность при проращивании на питательной среде, индекс равен 1, т. е. наблюдается максимальное прорастание потенциально жизнеспособной пыльцы. В случае снижения числа проросших зерен в сравнении с прокрашенными пыльцевыми зернами индекс уменьшается, характеризуя уровень реализации мужских гаметофитов на этапе начала формирования пыльцевых трубок.

С использованием данного подхода выявлено, что наиболее низкий уровень реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцы свойствен насаждениям *P. brutia* var. *pityusa* центральной части лесного массива урочища Аязьма, для которых индекс составил 0,911 (рис. 2).

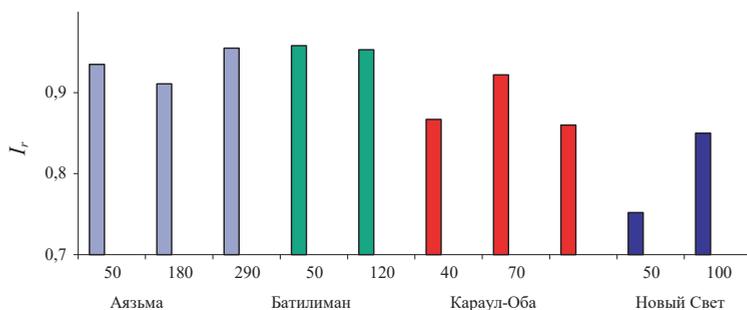


Рис. 2. Уровень реализации мужского гаметофита в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* на стадии прорастания пыльцы для территории Горного Крыма

Fig. 2. The level of realization of the male gametophyte in natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* at the stage of pollen germination for the territory of the Mountainous Crimea

Можно сделать предположение о формировании в среднем поясе урочища Аязьма в весенние месяцы наиболее стабильных погодных условий. Здесь в меньшей степени сказывается действие холодных морских туманов, поступающих с поверхности остывшего за зиму моря, также сравнительно невысок перепад дневных и ночных температур. Это в целом снижает степень негативного внешнего воздействия погодных условий на развитие мужского гаметофита и увеличивает вероятность получения функционально жизнеспособной пыльцы,

что и характеризуется высоким показателем ее окрашивания ацетокармином. В благоприятных условиях при уменьшении давления естественного отбора часть прокрашенных пыльцевых зерен имеет низкий жизненный потенциал, они не способны участвовать в последующих этапах репродуктивного цикла. Поэтому ацетокарминовый тест качества пыльцы лишь частично отражает ее жизненные свойства. Параллельное проращивание пыльцы на питательной среде позволяет оценивать уровень элиминации мужского гаметофита на стадии прорастания.

В верхнем поясе, несмотря на снижение, по данным окрашивания ацетокармином, жизнеспособности пыльцы, уровень ее прорастания на питательной среде был выше в сравнении с насаждениями центральной части массива лесов *P. brutia* var. *pityusa* урочища Аязьма. Очевидно, здесь в большей степени проявляется действие погодных условий, связанных с градиентом дневных и ночных температур, который в горной местности увеличивается с подъемом над уровнем моря. Ухудшение условий по температурному режиму повышает действие естественного отбора на первых этапах развития мужского гаметофита и вероятность формирования функционально полноценной пыльцы, которая способна успешно прорасти на питательной среде, что отражается индексом  $I_r$ , в верхнем поясе насаждений *P. brutia* var. *pityusa* урочища Аязьма он увеличился, составив в среднем 0,955.

В нижнем поясе наблюдалось снижение жизнеспособности пыльцы, как по данным окрашивания, так и по данным проращивания, что связано с ухудшением общего состояния древостоев *P. brutia* var. *pityusa* прибрежной зоны в результате негативного воздействия интенсивной неорганизованной рекреации [15]. При этом индекс  $I_r$  пыльцы древостоев на данных территориях был сравнительно высоким, это характеризует определенные возможности реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцевого зерна. *P. brutia* var. *pityusa* является теплолюбивым представителем автохтонной флоры Крыма. Прибрежная зона по климатическим факторам благоприятна для произрастания данного вида в условиях южного берега Крыма. Поэтому отрицательное внешнее влияние на спорофит, связанное с рекреационной деятельностью: нарушение почвенного покрова, усиление эрозионных процессов, физическое повреждение растений – пока еще не снижает возможности развития мужских репродуктивных структур. В нижнем поясе пыльца *P. brutia* var. *pityusa* формирует наиболее длинные пыльцевые трубки в древостоях урочища Аязьма – в среднем 148,0 мкм. С увеличением высоты над уровнем моря показатель снижается, коэффициент корреляции  $r = -0,951$ . Вероятно, это связано с изменением климатических условий. Для южного берега Крыма с подъемом по высоте на 110 м над ур. м. среднегодовая температура уменьшается на 1 °C [8]. Между нижними и верхними участками массива лесов *P. brutia* var. *pityusa* урочища Аязьма градиент среднегодовой температуры составляет 2–3 °C. Это отражается на развитии мужского гаметофита, с ухудшением климатических условий возрастают функциональные затраты на преадаптацию, что снижает энергетические возможности пыльцы при формировании пыльцевых трубок [13, 22].

Урочище Батилиман по климатическим условиям является наиболее благоприятным местом для произрастания *P. brutia* var. *pityusa*. Большая высота скального массива – до 630 м над ур. м., закрывающего территорию с

севера, определяет повышение температурного фона и сглаживание его сезонной динамики. В урочище совместно с *P. brutia* var. *pityusa* произрастает *Arbutus andrachne* L. – теплолюбивое вечнозеленое растение, представитель средиземноморской флоры, который в других насаждениях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма не встречается. Повышение температурного фона также связано с преобладанием в структуре ландшафта урочища Батилиман склонов южной экспозиции – 92 %, только 8 % имеют юго-восточную ориентацию. Весной 2022 г. наиболее ранний вылет пыльцы отмечался на данном объекте исследования. Более теплый климат начала вегетационного периода обусловил повышение качества пыльцы *P. brutia* var. *pityusa*. Наблюдалось увеличение показателей ее окрашивания и прорастания на питательной среде. Средние значения индекса  $I_r$  на высоте 50 и 120 м над ур. м. были 0,958 и 0,953 соответственно, что говорит о росте реализации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцы. Средняя длина пыльцевых трубок в нижнем поясе насаждений *P. brutia* var. *pityusa* урочища составила 160,3 мкм – на 8,3 % больше в сравнении с аналогичным показателем урочища Аязьма, что также отражает положительное влияние повышения средней температуры на формирование и развитие мужского гаметофита *P. brutia* var. *pityusa* в условиях южного берега Крыма.

В восточной части территории произрастания *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму качество пыльцы заметно снижается. Ее средняя жизнеспособность *P. brutia* var. *pityusa* на г. Караул-Оба, определенная окрашиванием, не превышала 82 %, среднее количество проросшей пыльцы изменялось в пределах 70–74 %. Индексы  $I_r$  и длина пыльцевых трубок также уменьшились, что свидетельствует об ухудшении потенциала реализации мужского гаметофита *P. brutia* var. *pityusa* на стадии прорастания и формирования пыльцевых трубок.

В урочище Новый Свет при некотором увеличении доли окрашенной пыльцы наблюдалось снижение активности ее прорастания на искусственной питательной среде. Индексы  $I_r$  и длина пыльцевых трубок были самыми низкими в сравнении с другими территориями произрастания *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму. Значительное снижение уровня прорастания пыльцы и уменьшение длины пыльцевых трубок для нижней части насаждений *P. brutia* var. *pityusa* урочища Новый Свет может быть связано с негативным воздействием поллютантов, поступающих сюда с восходящими воздушными потоками от автомобильной трассы Судак – Новый Свет, расположенной в непосредственной близости от лесного массива. Аэрозоли автомобильных выхлопов, содержащие тяжелые металлы и другие техногенные загрязнители, оказывают ингибирующее действие на прорастание пыльцы и формирование пыльцевых трубок *P. brutia* var. *pityusa*, что отмечается в некоторых исследованиях, связанных с изучением воздействия поллютантов на процессы репродукции лесных насаждений [20, 22].

Одним из факторов снижения качества пыльцы *P. brutia* var. *pityusa* в восточном районе произрастания является ухудшение условий по тепловому режиму в период ее формирования. По мнению некоторых исследователей, формирование микроспор с предмейотического развития спорогенной ткани, включая мейоз и интерфазу микроспор, до первого проталлиального деления наиболее уязвимо к действию низких температур [12, 13, 16, 18, 27]. Резкие

температурные колебания по степени отрицательного воздействия на развитие мужских генеративных структур сопоставимы с влиянием серосодержащих поллютантов, количество нарушений в мейозе в результате негативного действия температурного фактора может достигать 30 % [10]. Микроспорогенез в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма проходит в 1-й половине весны. Значительный перепад температур в это время, их снижение до отрицательных, оказывают активное воздействие на качество пыльцы. В районе исследования в начале весны 2022 г. наблюдалось 2 резких похолодания (рис. 3).

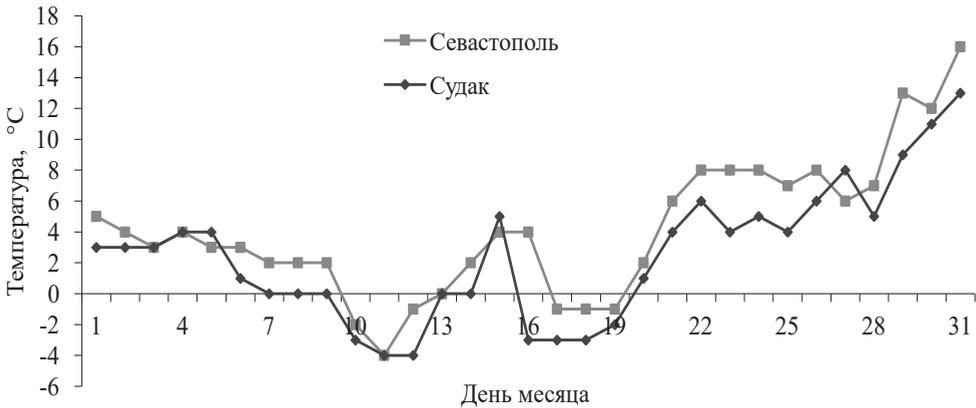


Рис. 3. Среднесуточные температуры в марте 2022 г. в районе проведения исследования

Fig. 3. The average daily temperatures in March 2022 in the study area

Во время 1-го похолодания среднесуточные температуры в Севастопольском районе снизились с 2 °С 9 марта до -4 °С 11 марта и достигли положительных значений 14 марта. В Судакском районе похолодание началось на 2 дня раньше, чем в Севастополе, и продолжалось до 15 марта, при этом действие низких температур (-4 °С) было более длительным. Второе снижение температур началось через день после завершения 1-го. Отрицательные значения наблюдались в течение 3 суток, в восточном районе они оказались на 2 °С ниже. Столь значительные изменения погодных условий заметно повлияли на жизнеспособность пыльцы и длину пыльцевых трубок *P. brutia* var. *pityusa*, также определив увеличение отклонений от нормы размера и формы пыльцевого зерна. Нарушения микроспорогенеза проявлялись в виде формирования очень мелких и крупных пыльцевых зерен, аномального количества летательных мешков: их полной редукции или образования 1, 3 и 4 (рис. 4).

Статистическая оценка аномалий развития пыльцы выявила, что в западной части произрастания *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму их заметно меньше в сравнении с восточной (рис. 5). Суммарная средняя доля аномальной пыльцы для западных территорий составила 2,9 %, для восточных - 4,6 %. Скорее всего, это определяется различием климатических условий в период формирования пыльцы, в восточном районе они менее благоприятные [2]. Наблюдается также некоторая тенденция снижения количества отклонений в развитии пыльцы с подъемом по высоте над уровнем моря, что связано с адаптацией микроспорогенеза в верхней части насаждений к более жестким климатическим условиям произрастания и резким перепадам температуры.

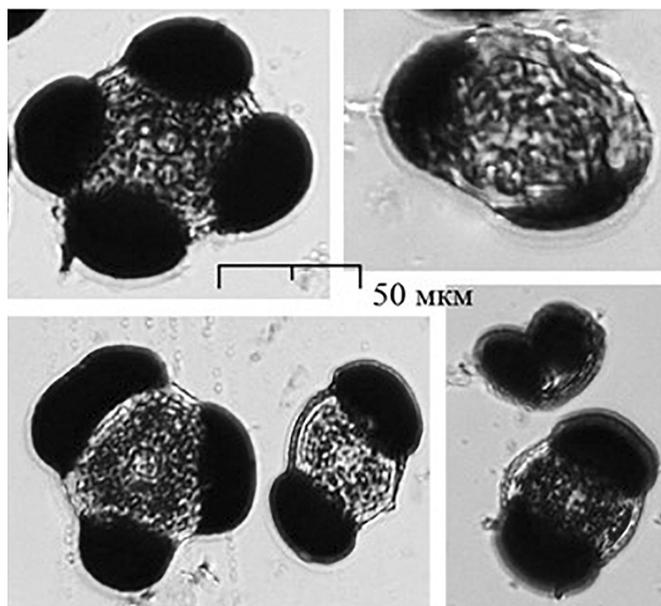


Рис. 4. Нарушения формирования пыльцы в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма

Fig. 4. The violations of pollen formation in natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* in the Mountainous Crimea

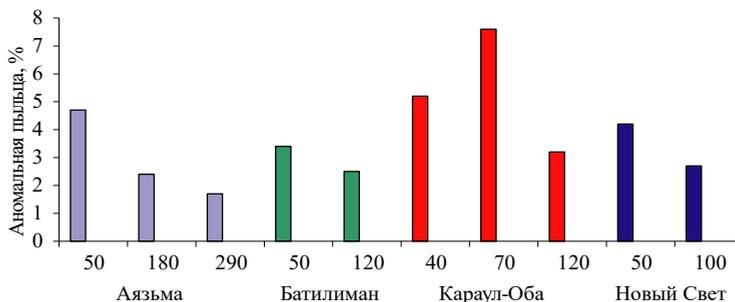


Рис. 5. Доля аномальной пыльцы в природных популяциях *P. brutia* var. *pityusa* Горного Крыма

Fig. 5. The proportion of abnormal pollen in natural populations of *P. brutia* var. *pityusa* in the Mountainous Crimea

Лимитирующее действие температурного режима на формирование пыльцы *P. brutia* var. *pityusa* также проявляется в том, что на открытых мысовых территориях, где повышается контраст погодных условий, количество аномалий развития пыльцевого зерна увеличивается. В наибольшей степени данная специфика географического положения проявляется в насаждениях г. Караул-Оба, в их средней части (на высоте 70 м над ур. м.) доля нарушений размера и формы пыльцевого зерна *P. brutia* var. *pityusa* составила 7,6 %. На высоте 40 и 120 м над ур. м. данный показатель был соответственно 5,2 и 3,2 %.

#### Заключение

В западной части произрастания *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму качество пыльцы более высокое в сравнении с пыльцой деревьев восточных

территорий. В насаждениях *P. brutia* var. *pityusa* урочища Батилиман жизнеспособность пыльцы варьировала в пределах 92–98 %, длина пыльцевых трубок – 140–160 мкм. На г. Караул-Оба средняя жизнеспособность пыльцы не превышала 82 %, средняя длина пыльцевых трубок – 125 мкм. В урочище Новый Свет при некотором увеличении доли окрашенной пыльцы наблюдалось снижение активности ее прорастания на искусственной питательной среде.

Изучение свойств пыльцы методом проращивания на искусственной питательной среде выявило некоторое уменьшение уровня ее жизнеспособности по сравнению с результатами ацетокарминового тестирования, различия составили 4–9 %. Использование 2 способов анализа жизнеспособности пыльцы: окрашивание ацетокармином и проращивание на искусственной питательной среде – позволяет оценивать уровень элиминации мужского гаметофита на стадии прорастания пыльцевого зерна.

Статистическая оценка аномалий развития пыльцы выявила, что в западной части произрастания *P. brutia* var. *pityusa* в Горном Крыму их заметно меньше в сравнении с восточной. Суммарный средний показатель аномальной пыльцы для западных территорий составил 2,9 %, для восточных – 4,6 %, что связано с различием климатических условий в период формирования пыльцы, в восточном районе они менее благоприятные. Лимитирующее действие температурного режима на формирование и развитие пыльцы *P. brutia* var. *pityusa* усиливается на открытых мысовых территориях, где повышается контраст погодных условий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анучин Н.П. Лесная таксация. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 512 с.  
Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, Lesnays promyshlennost' Publ., 1982. 512 p. (In Russ.).
2. Бастаева Г.Т., Лявданская О.А., Малахов С.В., Гордеев Д.С. Аномалии пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Платовской лесной даче Оренбургской области // Аграр. наука – 2022: материалы Всерос. конф. молодых исследователей. М.: Рос. гос. аграр. ун-т – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. С. 253–255.  
Bastaeva G.T., Lyavdanskaya O.A., Malakhov S.V., Gordeev D.S. Pollen Anomalies of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Platovskaya forest dacha, the Orenburg Region. *Agrarian Science – 2022: Proceedings of the All-Russian Conference of Young Researchers*. Moscow, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2022, pp. 253–255. (In Russ.).
3. Велисевич С.Н. Качество пыльцы высокогорных популяций *Pinus sibirica* Du Tour (*Pinaceae*) в аридных и гумидных районах Алтая // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер.: Биология. 2017. Т. 10, № 3. С. 301–311.  
Velisevich S.N. Pollen Quality of *Pinus sibirica* Du Tour (*Pinaceae*) Mountain Populations in Arid and Humid Regions of Altai. *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya* = Journal of Siberian Federal University. Series: Biology, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 301–311. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0014>
4. Голубинский И.Н. Биология прорастания пыльцы. Киев: Нукова думка, 1974. 368 с.  
Golubinskij I.N. *Biology of Pollen Germination*. Kyiv, Nukova dumka Publ., 1974. 368 p. (In Russ.).
5. Камелин П.В. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2008. 885 с.

Kamelin R.V. *Red Data Book of the Russian Federation (Plants and Fungi)*. Moscow, KMK Publ. House, 2008. 885 p. (In Russ.).

6. Коба В.П. Исследование некоторых особенностей морфогенеза и прорастания пыльцы *Pinus pallasiana* D. Don // Цитология и генетика. 2004. Т. 38, № 3. С. 38–45.

Koba V.P. Study of Some Characters of Morphogenesis and Germination of *Pinus pallasiana* D. Don Pollen. *Tsitologiya i genetika* = Cytology and Genetics, 2004, vol. 38, no. 3, pp. 38–45. (In Russ.).

7. Коршиков И.И., Лантева Е.В., Литвиненко Ю.С. Морфологические изменения пыльцы сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don) в интродукционных насаждениях техногенно загрязненных территорий // Пром. ботаника. 2014. Т. 14. С. 61–68.

Korshikov I.I., Lapteva Ye.V., Litvinenko Yu.S. Pollen Morphology Changes in *Pinus pallasiana* D. Don Introduced Stands from Technogenic Polluted Areas. *Promyshlennaya Botanika* = Industrial Botany, 2014, vol. 14, pp. 61–68. (In Russ.).

8. Кочкин М.А. Почвы, леса и климат горного Крыма и пути их рационального использования. М.: Колос, 1967. 366 с.

Kochkin M.A. *Soils, Forests and Climate of Mountainous Crimea and Ways of Their Rational Use*. Moscow, Kolos Publ., 1967. 366 p. (In Russ.).

9. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 350 с.

Lakin G.F. *Biometrics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 350 p. (In Russ.).

10. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. 200 с.

*Forest Ecosystems and Atmospheric Pollution*. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 200 p. (In Russ.).

11. Махнева С.Г., Менищиков С.Л. Качество пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне действия выбросов АО «Карабашмедь» // Лесн. вестн. Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 1. С. 32–44.

Makhneva S.G., Menshchikov S.L. Common Pine (*Pinus sylvestris* L.) Pollen Quality in JSC “Karabashmed” Emission Zone. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 32–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-1-32-44>

12. Некрасова Т.П. Влияние температуры воздуха на формирование пыльцы хвойных древесных пород // Лесоведение. 1976. № 6. С. 975–978.

Nekrasova T.P. The Influence of Air Temperature on the Formation of Coniferous Tree Pollen. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 1976, no. 6, pp. 975–978. (In Russ.).

13. Некрасова Т.П. Пыльца и пыльцевой режим хвойных Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 169 с.

Nekrasova T.P. *Pollen and Pollen Regime of Siberian Conifers*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 169 p. (In Russ.).

14. Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. М.: Агропромиздат, 1988, 271 с.

Pausheva Z.P. *Practical Training in Plant Cytology*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 271 p. (In Russ.).

15. Плугатарь Ю.В., Коба В.П., Панельбу В.В., Новицкий М.А., Макаров Н.А. Некоторые свойства почв и типологическая структура насаждений *Pinus pityusa* (Pinaceae) Горного Крыма // Земледелие. 2021. № 7. С. 15–21.

Pluhatar Yu.V., Koba V.P., Papelbon V.V., Nowicki M.A., Makarov N.A. Some Soil Properties and Typological Structure of *Pinus pityusa* (Pinaceae) Plantings in Mountain Crimea. *Zemledelie*, 2021, no. 7, pp. 15–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2021-7-15-21>

16. Подгорный Ю.К., Ругузов И.А. Особенности микроспорогенеза и развития мужского гаметофита сосны крымской в связи с семеношением и жизнеспособностью популяций // Бюл. Никит. ботан. сада. 1979. Т. 38. С. 21–25.

Podgorny Yu.K., Ruguzov I.A. Features of Microsporogenesis and Development of Male Gametophyte of Crimean Pine in Connection with Seed Production and Viability of Populations. *Bulliten' gosudarstvennogo Nikitskogo Botanicheskogo sada* = Bulletin of the State Nikitsky Botanical Gardens, 1979, vol. 38, pp. 21–25. (In Russ.).

17. Сурсо М.В., Чухчин Д.Г. Рост и развитие пыльцевой трубки можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis*): роль ядра клетки трубки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 20–34.

Surso M.V., Chukhchin D.G. Growth and Development of Pollen Tubes in Common Juniper (*Juniperus communis*): the Role of the Tube Cell Nucleus. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 2, pp. 20–34. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-20-34>

18. Третьякова И.Н., Носкова Н.Е. Пыльца сосны обыкновенной в условиях экологического стресса // Экология. 2004. Т. 1. С. 26–33.

Tretyakova I.N., Noskova N.E. Scotch Pine Pollen under Conditions of Environmental Stress. *Ecologiya* = Russian Journal of Ecology, 2004, vol. 35, pp. 20–26.

<https://doi.org/10.1023/B:RUSE.0000011105.90297.07>

19. Эрдынеева С.А., Ширеторова В.Г., Раднаева Л.Д. Фармакогностическое исследование пыльцы *Pinus sylvestris* L. и *Pinus pumila* (Pall) Regel // Вопр. биол., мед. и фармацевтич. химии. 2021. Т. 24, № 2. С. 29–34.

Erdyneeva S.A., Shiretorova V.G., Radnaeva L.D. Pharmacognostic Study of the Pollen of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus pumila* (Pall) Regel. *Voprosy biologicheskoy, meditsinskoj i farmatsevticheskoy khimii* = Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry, 2021, vol. 24, no. 2, pp. 29–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.29296/25877313-2021-02-05>

20. Коба В.П. Вміст важких металів у пилку сосни кримської у зв'язку з висотною поясністю зростання // Физиология и биохимия культурных растений. 2004. Т. 36, № 5. С. 410–418.

Koba V.P. Heavy Metal Content in Crimean Pine Pollen in Relation to Altitudinal Zonality of Growth. *Fiziologiya i biokhimiya kul'turnykh rastenij* = Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants, 2004, vol. 36, no. 5, pp. 410–418. (In Ukr.).

21. Christophoulou A., Sazeides C.I., Fyllas N.M. Size-Mediated Effects of Climate on Tree Growth and Mortality in Mediterranean Brutia Pine Forests. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 812, art. no. 151463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151463>

22. Jaconis S.Y., Culley T.M., Meier A.M. Does Particulate Matter along Roadsides Interfere with Plant Reproduction? A Comparison of Effects of Different Road Types on *Cichorium intybus* Pollen Deposition and Germination. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 222, pp. 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.047>

23. Kukarskih V.V., Devi N.M., Surkov A.Y., Bubnov M.O., Gorlanova L.A., Ekba Y.A., Hantemirov R.M. Climatic Responses of *Pinus brutia* along the Black Sea Coast of Crimea and the Caucasus. *Dendrochronologia*, 2020, vol. 64, pp. 125763. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125763>

24. Liu S., Li Z., Wu S., Wan X. The Essential Roles of Sugar Metabolism for Pollen Development and Male Fertility in Plants. *The Crop Journal*, 2021, vol. 9, iss. 6, pp. 1223–1236. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.08.003>

25. López-Sáez J.A., Camarero J.J., Abel-Schaad D., Luelmo-Lautenschlaeger R., Pérez-Díaz S., Alba-Sánchez F., Carrión J.S. Don't Lose Sight of the Forest for the Trees! Discerning Iberian Pine Communities by Means of Pollen-Vegetation Relationships. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2020, vol. 281, art. no. 104285. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2020.104285>

26. McCulloch R.D., Mathiasen P., Premoli A.C. Palaeoecological Evidence of Pollen Morphological Changes: a Climate Change Adaptation Strategy? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, vol. 601, art. no. 111157. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111157>

27. Mog B., Veena G.L., Adiga J.D., Hebbar K.B., Shamsudheen M., Manjesh G.N., Eradasappa E., Mohana G.S., Thandaiman V., Vanitha K., Yadav A.K. Pollen Morphological Study and Temperature Effect on the Pollen Germination of Cashew (*Anacardium occidentale* L.) Varieties. *Scientia Horticulturae*, 2023, vol. 314, art. no. 11957.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111957>

28. Tadoumant S., Bouimetarhan I., Baqloul A., Hssaisoune M., Reddad H., Bouchaou L. Modern Pollen Distribution and its Relationship with Environmental Gradient in Southern Morocco. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2022, vol. 298, art. no. 104595.

<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2021.104595>

29. Williams J.H., Reese J.B. Chapter Twelve – Evolution of Development of Pollen Performance. *Current Topics in Developmental Biology*, 2019, vol. 131, pp. 299–336.

<https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2018.11.012>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest