DOI: https://doi.org/10.36691/RJA16960

Доминантные споры грибов *Cladosporium* и *Alternaria* в воздухе г. Каракол

В.Н. Кобзарь[1], К.Б. Осмонбаева[2]

[1] Кыргызско-Российский славянский университет имени Б.Н. Ельцина, Бишкек, Кыргызская Республика;
[2] Иссык-Кульский государственный университет имени К. Тыныстанова, Каракол, Кыргызская Республика

Аннотация

Обоснование. В воздушной среде содержание спор грибов часто превышает концентрацию пыльцы в 100–1000 раз и более, достигая 50 тыс. спор грибов/м^3 в зависимости от факторов окружающей среды, таких как осадки, температура и ветер. Пигментированные споры *Cladosporium* и *Alternaria* превалируют в местообитаниях большинства регионов, так как бесцветные споры не выдерживают ультрафиолетовое излучение и не идентифицируются под микроскопом. Аэроспоры иногда считаются недооцененным источником респираторной аллергии в регионе, а информация об их сезонных тенденциях важна для повышения уровня осведомленности населения, а также аллергологам для эффективной диагностики, профилактики и лечения заболеваний грибковой этиологии.

Цель исследования — проанализировать годовой индекс спор, сезонность и пороговые концентрации доминантных спор грибов *Cladosporium* и *Alternaria* в воздухе г. Каракол (Кыргызская Республика).

Материалы и методы. Аэробиологический мониторинг проводили в период с апреля по октябрь 2015–2017 гг. с помощью стандартизированного волюметрического пыльцеуловителя Ланзони в г. Каракол (1716 м над уровнем моря, среднегорье). При микроскопической идентификации спор грибов использовали специально разработанный определитель и атлас.

Результаты. Кривая концентрации доминантных спор грибов *Cladosporium* и *Alternaria* в воздухе г. Каракол носит унимодальный характер с часто перекрывающимися количественными характеристиками. При этом наблюдалась сильная межгодовая изменчивость атмосферных уровней, зависящая от метеорологических параметров, особенно температуры и осадков. Максимальная концентрация аэроспор *Cladosporium* зафиксирована 30 июня 2017 г. — 12 386 спор грибов/м^3; *Alternaria* — 28 июля 2015 г., в чрезвычайно сухой год, — 5376 спор грибов/м^3. Пиковые концентрации спор грибов *Cladosporium* и *Alternaria* многократно превысили определенные Всемирной организацией здравоохранения клинические пороговые значения — 500 спор/м^3 воздуха.

Заключение. Аэроспоры *Cladosporium* и *Alternaria* признаны доминантными таксонами как результат их фитопатогенных и аллергенных свойств в сочетании с преобладающими концентрациями и продолжительным периодом присутствия в атмосфере г. Каракол. Вариации концентрации аэроспор в разные годы положительно коррелировали с температурой воздуха, особенно в 3-й декаде июля 2015 г., когда максимальная концентрация включала 56 % спор *Cladosporium* и 13,5 % *Alternaria* и регистрировалась самая высокая температура воздуха (33,5 °C).

Ключевые слова: споры грибов; *Cladosporium; Alternaria*; изменение климата и системы землепользования; загрязнение окружающей среды; пороговая концентрация.

Как цитировать: Кобзарь В.Н., Осмонбаева К.Б. Доминантные споры грибов *Cladosporium* и *Alternaria* в воздухе г. Каракол // Российский аллергологический журнал. 2025. Т. 22, № 3. С. 267–276. DOI: https://doi.org/10.36691/RJA16960

Рукопись получена: 28.07.2024 **Рукопись одобрена:** 22.06.2025 **Опубликована online:** 27.06.2025

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International

DOI: https://doi.org/10.36691/RJA16960

Dominant *Cladosporium* and *Alternaria* fungal spores in the air of Karakol

Vera N. Kobzar[1], Kymbatkul B. Osmonbaeva[2]

[1] Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyz Republic;
[2] Issyk-Kul State University, Karakol, Kyrgyz Republic

Abstract

BACKGROUND: Concentration of fungal spores in the air often exceeds concentration of pollen 100–1,000 fold, reaching 50,000 fungal spores/m^3, which is affected by a plethora of environmental factors including precipitation, temperature and wind. Pigmented spores of *Cladosporium* and *Alternaria* are prevalent in habitats of the most regions, since colorless spores do not survive ultraviolet radiation. Aerospores are often considered an underestimated source of respiratory allergies, therefore, information on their seasonal trends is significant for both promoting public awareness and assisting medical specialists in effective diagnostics, prevention and treatment of fungal diseases.

AIM: To analyze the annual spore index, seasonality and threshold concentrations of dominant fungal spores *Cladosporium* and *Alternaria* in the air of Karakol.

MATERIALS AND METHODS: Aerobiological monitoring was carried out from April to October 2015–2017 using a standardized volumetric Lanzoni pollen trap in the city of Karakol (1716 m above sea level, mid-mountain). A specially developed identifier and atlas were used for microscopic identification of fungal spores.

RESULTS: The concentration curve of dominant *Cladosporium* and *Alternaria* fungal spores in the air of Karakol is unimodal with often overlapping quantitative characteristics. Simultaneously, strong interannual variability of their atmospheric levels was observed, exhibiting dependance on meteorological parameters, especially temperature and precipitation. The maximum peak of *Cladosporium* aerospores was recorded on June 30, 2017 — 12,386, and *Alternaria* — 5,376 fungal spores/m^3 in an extremely dry year (July 28, 2015). Peak concentrations of *Cladosporium* and *Alternaria* fungal spores drastically exceeded clinical threshold values in the air.

CONCLUSION: *Cladosporium* and *Alternaria* aerospores are recognized as dominant taxa, due to their phytopathogenic and allergenic properties and their predominance in the atmosphere of Karakol for long periods of time. The curve of their spore concentration is unimodal. Variations in the concentration of aerospores in different years positively correlated with air temperature, especially in the 3rd ten-day period of July 2015, when the maximum peak of spores consisted of 56 % *Cladosporium* and 13.5 % *Alternaria* spores and the highest air temperature was recorded (33.5 °C).

Keywords: fungal spores; *Cladosporium; Alternaria*; climate change and land use systems; environmental pollution; threshold concentration.

To cite this article: Kobzar V.N., Osmonbaeva K.B. Dominant *Cladosporium* and *Alternaria* fungal spores in the air of Karakol. *Russian Journal of Allergy*. 2025;22(3):267–276. DOI: https://doi.org/10.36691/RJA16960

Submitted: 28.07.2024 **Accepted:** 22.06.2025 **Published online:** 27.06.2025

Article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License

Обоснование

В городской среде качество воздуха является важной проблемой из-за прямой связи со здоровьем населения. Биомониторинг загрязняющих веществ позволяет указывать на изменения окружающей среды, для этой цели можно отслеживать споры грибов на предмет изменений в атмосферном загрязнении [1].

Атмосферный микробиом — один из наименее изученных на нашей планете, причем наиболее распространенными, разнообразными и влиятельными являются споры грибов. Они могут быть мощными наружными аэроаллергенами и фитопатогенами, несут огромное социально-экономическое бремя для служб здравоохранения и наносят ежегодный ущерб сельскохозяйственному урожаю. Известно, что 80 родов грибов связаны с аллергической сенсибилизацией [2, 3].

По оценкам специалистов, во всем мире сенсибилизация к спорам грибов наблюдается у 3–10 % населения, у 7–20 % больных астмой, у 35–75 % — тяжелой астмой и у 54–91 % — опасной для жизни астмой [4].

В воздушной среде содержание спор грибов часто зависит от факторов окружающей среды, таких как осадки, температура и ветер, и достигает 50 тыс. спор грибов/м^3, превышая концентрацию пыльцы в 100–1000 раз и более. Споры *Cladosporium* являются наиболее распространенным таксоном в большинстве исследований аэромикробиома; иногда в тандеме отмечалось доминирование *Alternaria* [5–9]. Пигментированные споры *Cladosporium* и *Alternaria* превалируют в диагностике местообитаний большинства регионов из-за того, что бесцветные споры не переносят ультрафиолетовое излучение и не визуализируются при микроскопии [9].

Известно, что на концентрацию аэроспор и их фрагментов влияют метеорологические факторы (температура, осадки и относительная влажность), загрязнение и изменения в использовании системы землепользования [10–12]. Поскольку грибы поражают культурные и дикорастущие растения, споры грибов обнаруживаются в широком пространственном масштабе [13, 14]. Они имеют диаметр 2–50 мкм, но у большинства аллергенных спор диаметр составляет 3–10 мкм. Из-за небольшого размера они могут проникать глубоко в нижние дыхательные пути подобно субпыльцевым частицам из разрывающихся пыльцевых зерен, вызывая обострение бронхиальной астмы у сенсибилизированных лиц [2, 15, 16].

Для *Cladosporium* характерны небольшие конидии, которые образуются в разветвленных цепях и могут легко распространяться в огромных количествах на большие расстояния при высоких температурах в сухой сезон. Род *Alternaria* связан более чем с 1100 общими названиями и состоит из 300 видов, имея споры большего размера [17]. Важность обоих таксонов заключается в экономических и медицинских потерях, которые они могут вызывать как известные фитопатогены и аэроаллергены, воздействующие на здоровье людей [18–20].

Споры грибов часто считаются недооцененным источником респираторной аллергии в ряде стран [21]. В то же время информация об их сезонных тенденциях важна для повышения уровня осведомленности населения, а также врачам аллергологам-иммунологам для эффективной диагностики, профилактики и лечения заболеваний грибковой этиологии.

Цель исследования — проанализировать годовой индекс спор, сезонность и пороговые концентрации доминантных спор грибов *Cladosporium* и *Alternaria* в воздухе г. Каракол (Кыргызская Республика).

Материалы и методы

Аэробиологический мониторинг с применением волюметрических ловушек (Буркард, Ланзони) считается золотым стандартом исследования. Изучение спор грибов в воздухе г. Каракол проводили с апреля по октябрь в 3-летний период (2015–2017 гг.) в соответствии с планом НИР Иссык-Кульского государственного университета [22]. Каракол расположен в восточной части Иссык-Кульской котловины на высоте 1716 м над уровнем моря (среднегорье) у северного подножья хребта Терскей Алатау.

Пыльцеуловитель Ланзони был размещен на крыше здания (13 м над уровнем земли), расположенного вдали от парковых зон и промышленных предприятий. В основе его действия лежит принцип столкновения: взвешенные в воздухе частицы движутся вместе с потоками воздуха — естественными (ветер) или искусственно созданными — и осаждаются на поверхности различных типов и ориентации. Флюгер позволяет ловушке разворачиваться по ветру, и взвешенные в воздухе частицы через отверстие попадают на липкую ленту в барабане. Часовой механизм обеспечивает медленное и постоянное вращение барабана: лента перед отверстием перемещается, и частицы попадают на новый участок.

Улавливающая поверхность расположена внутри замкнутой камеры и представляет собой прозрачную ленту Melinex tape, намотанную на барабан. Ленту с двусторонней клейкой поверхностью приклеивали к барабану узкими поперечными полосками в начале каждого суточного деления. Смесь на ленту наносили кисточкой. Барабан пыльцеуловителя и смесь слегка разогревали. После окончания цикла работы ловушки (7 дней) и смены барабана ленту разрезали на участки, каждый из которых соответствовал 1 суткам работы пыльцеуловителя, и в дальнейшем окрашивали фуксином.

Споры грибов, зафиксированные на клейкой ленте пыльцеуловителя Ланзони, подсчитывали и идентифицировали под световым микроскопом (при увеличении ×100–400) на

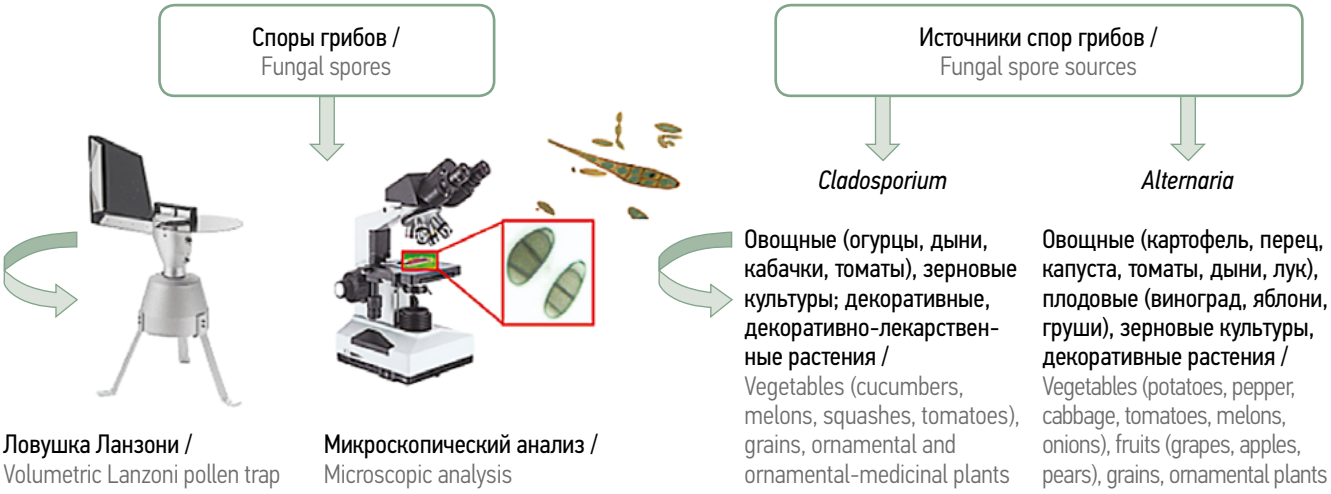

Рис. 1. Алгоритм и дизайн проведенных исследований.
Fig. 1. Algorithm and design of the conducted research.

площади, которая репрезентативна для 1 м^3 воздуха/сут. Результаты исследований базируются на анализе 630 проб. При микроскопической дифференциальной диагностике спор грибов использовали специально разработанный определитель и атлас. Алгоритм и дизайн исследования отражены в графическом резюме (рис. 1).

Для оценки аэромикологического индекса применяли 90 %-й метод, включающий сезонные даты, причем начало сезона определяли как точку, в которой достигнуто 5 % годовых кумулятивных подсчетов таксонов спор грибов, а дату окончания — 95 %.

Статистическую обработку данных и построение графиков проводили на основе пакета программ Microsoft Excel, версия 5.0.

Результаты

По сравнению с пыльцой в морфологии спор грибов можно наблюдать большую степень разнообразия на уровне родов и вариабельность в зависимости от географических особенностей и условий окружающей среды, что затрудняет идентификацию некоторых таксонов под световым микроскопом. Способность спор рассеиваться и сохранять жизнеспособность в атмосфере во многом зависит от их морфологии.

Для понимания процесса воздействия на споры грибов антропогенной триады и их возможной реакции рассмотрим схему (рис. 2).

На концентрацию спор грибов в воздухе сильно влияли метеорологические условия. Вариации концентрации аэроспор в г. Каракол в разные годы положительно коррелировали

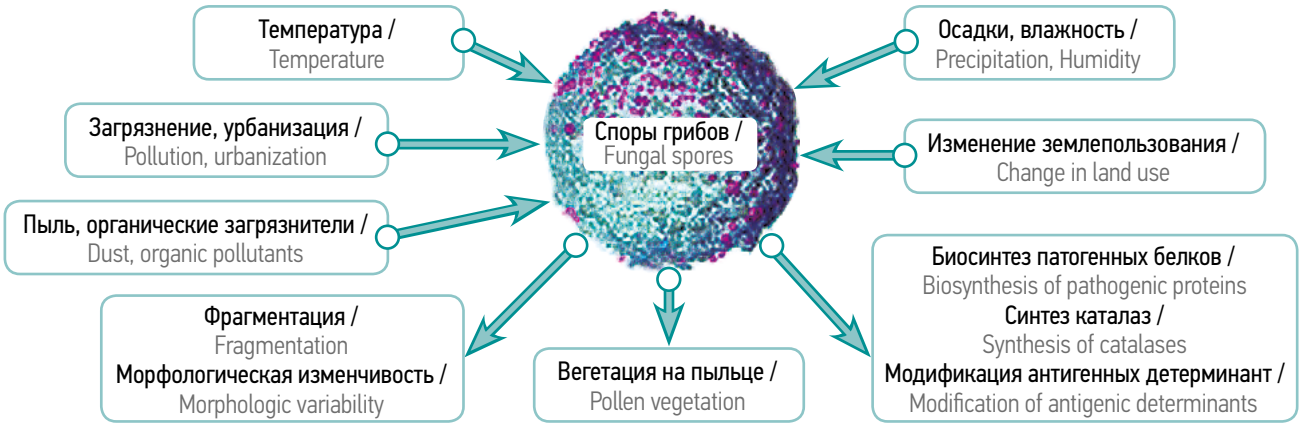

Рис. 2. Схема модификаций спор грибов под воздействием метеорологических факторов (изменение климата), изменения традиционной системы землепользования и загрязнения окружающей среды и урбанизации.
Fig. 2. Scheme of modifications of fungal spores under the influence of meteorological factors (climate change), changes in traditional land use systems, and environmental pollution and urbanization.

с температурой воздуха (r = 0,7–0,9; *p* <0,001), особенно в 3-й декаде июля 2015 г., когда максимальная концентрация спор включала 56 % *Cladosporium* и 13,5 % *Alternaria* и регистрировалась самая высокая температура воздуха (33,5 °C).

Осадки являются одним из ключевых факторов окружающей среды, изменяющих численность и состав аэроспор [23]. Результаты исследований показали, что концентрация воздушных спор грибов значительно менялась до, во время и после выпадения осадков [11, 23]. Так, в воздухе г. Каракол наблюдалась сильная отрицательная корреляционная взаимозависимость концентрации спор грибов и осадков (r = –061; *p* <0,001) в исследуемые годы. В эти периоды возрастало число неопределенных споровых частиц, что, возможно, связано с фрагментацией спор и их разрывом на более мелкие субмикронные фрагменты [10, 11].

Осадки в воздухе Китая значительно повлияли на грибковую аэробиоту в небольших диапазонах размеров (<1,1 мкм; *p* <0,05) и вызвали увеличение фрагментов основных родов грибов в частицах размером <1,1 мкм (*Cladosporium, Aspergillus* и *Penicillium*), которые могут представлять большую угрозу для здоровья человека [16].

По аналогии с исследованием пыльцы мы разработали интегративный индекс вклада спор грибов в аэробиологическую ситуацию: сезон спор, размер спор, обилие видов в регионе и концентрация аэроспор.

Вступление Кыргызской Республики в Евразийский экономический союз в 2015 г. вызвало изменения в традиционной системе землепользования, что отразилось в первую очередь на уровне спор грибов в воздухе. Аэробиота г. Каракол представлена большим разнообразием таксонов спор грибов: 10 (2015 г.), 18 (2016 г.) и 24 (2017 г.); их нарастающий ассортимент обусловлен расширением посевных площадей под культурные растения, расположенных вокруг города, и, соответственно, их поражением фитопатогенами.

Как показали результаты исследования, годовой индекс спор грибов в воздухе г. Каракол варьировал в разные годы и составлял 102 207 спор грибов/м^3 (54,4 % всего количественного состава аллергенов) в 2015 г.; 98 541 спора грибов/м^3 (51,9 %) в 2016 г.; 204 565 спора грибов/м^3 (64,7 %) в 2017 г.

Для сравнения приведем данные годового индекса спор грибов в разных странах. Концентрация аэроспор колеблется в зависимости от климатических условий местности, но характерные годовые показатели составляют от 45 тыс. до 100 тыс. спор грибов/м^3 в умеренном и средиземноморском климате, 11 тыс. в тропическом климате и от 3,5 тыс. до 34 тыс. в сухом засушливом климате [6, 8, 24–29]. Общая годовая концентрация спор, зарегистрированная в 2016 г. в г. Братиславе, составила 836 418 спор грибов/м^3, относящихся к 53 типам [30].

Результаты аэромикрологических исследований в г. Каракол проанализированы по тандему спор грибов: *Cladosporium* и *Alternaria.* Их вегетационный период составил в среднем 164 дня. Они космополиты и обычно связаны с выращиванием сельскохозяйственных культур или продуктами сельского хозяйства: поражают широкий спектр овощных, плодовых, злаковых, декоративных, а также дикорастущих растений.

Доминантный количественный состав в аэромикологическом спектре г. Каракол представляли следующие споры:

1) 2015 г.:
- *Cladosporium:* суточный максимум — 31 248 спор грибов/м^3 (27 июля), всего — 75 538 (74 % от аэромикологического спектра);
- *Alternaria:* суточный максимум — 5376 спор грибов/м^3 (28 июля), всего — 21 307 (20,8 % от аэромикологического спектра);

2) 2016 г.:
- *Cladosporium:* суточный максимум — 4485 спор грибов/м^3 (17 июня), всего — 45 160 (45,8 % от аэромикологического спектра);
- *Alternaria:* суточный максимум — 2376 спор грибов/м^3 (22 июня), всего — 26 476 (26,9 % от аэромикологического спектра);

3) 2017 г.:
- *Cladosporium:* суточный максимум — 12 386 спор грибов/м^3 (30 июня), всего — 132 676 (65 % от аэромикологического спектра);
- *Fusarium:* суточный максимум — 18 036 спор грибов/м^3 (30 июня), всего — 36 501 (17,8 % от аэромикологического спектра);
- *Alternaria:* суточный максимум — 1863 споры грибов/м^3 (9 июля), всего — 22 065 (10,7 % от аэромикологического спектра).

Тревожной тенденцией аэробиологического спектра г. Каракол является рост размаха поражения сельскохозяйственных культур спорами грибов *Fusarium* также космополитического характера. Всемирная организация здравоохранения опубликовала список 19 смертельно опасных грибов, среди них указаны споры *Fusarium* как высокоприоритетного гриба в аспекте заболеваний человека.

Установлено, что кривая концентрации спор грибов *Cladosporium* и *Alternaria* в г. Каракол носит унимодальный характер с часто перекрывающимися количественными характеристиками (рис. 3, 4). При этом наблюдалась сильная межгодовая изменчивость атмосферных уровней, зависимая от метеорологических параметров, особенно температуры и осадков. Максимальная концентрация аэроспор *Cladosporium* зафиксирована 30 июня 2017 г. — 12 386 спор грибов/м^3; а *Alternaria* — 28 июля 2015 г., в чрезвычайно сухой год, — 5376 спор грибов/м^3. Также есть другой, менее значимый пик, обнаруженный во 2-й и 3-й декадах 2015 г. для метеорологических параметров, особенно температуры и осадков: 7830 и 13 821 спора грибов/м^3 для *Cladosporium* и *Alternaria* соответственно.

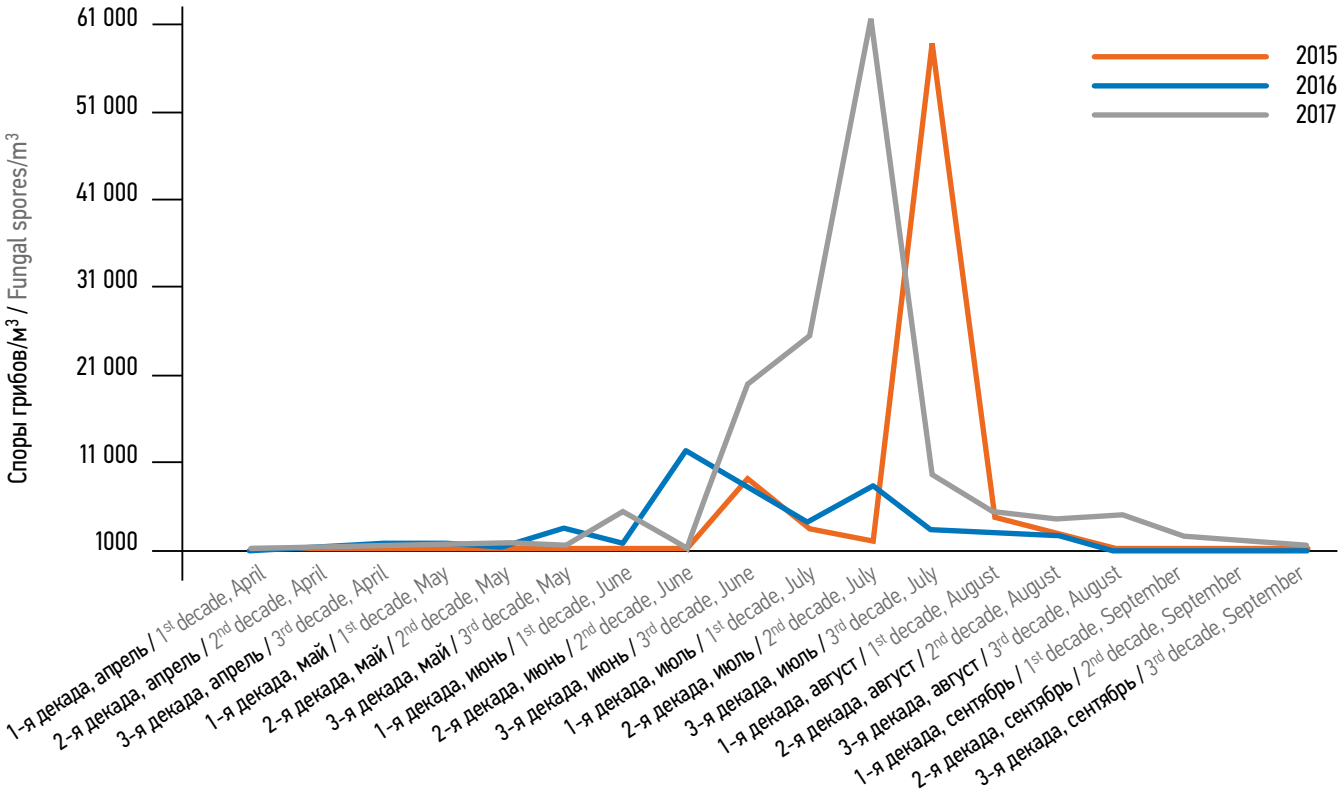

Рис. 3. Концентрация спор *Cladosporium* в воздухе г. Каракол.
Fig. 3. Concentration of *Cladosporium* spores in the air of Karakol.

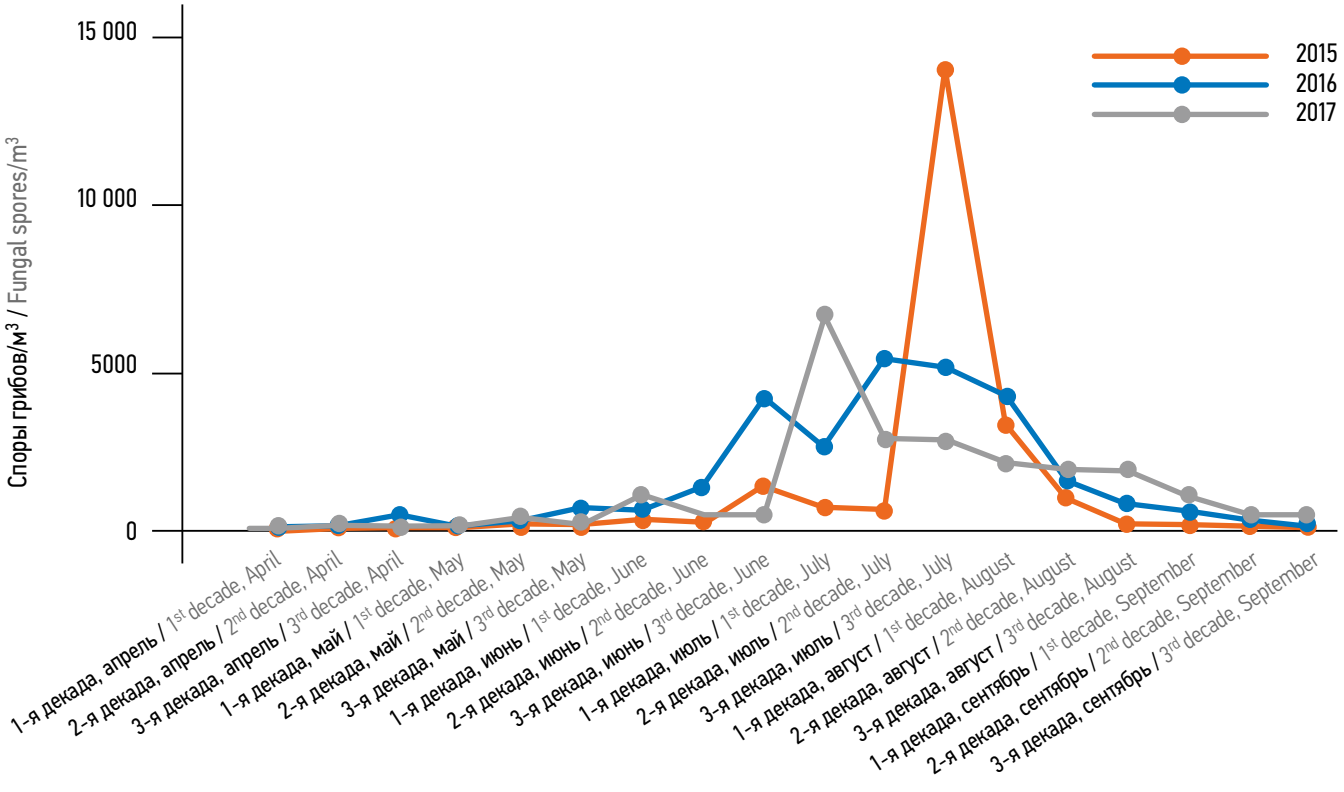

Рис. 4. Концентрация спор *Alternaria* в воздухе г. Каракол.
Fig. 4. Concentration of *Alternaria* spores in the air of Karakol.

В мае наблюдались очень низкие значения для спор *Cladosporium*. Высокий порог (>3000 спор грибов/м^3, среднесуточное значение) достигался в конце июня. В июне максимальные суммарные месячные показатели возрастали до 23 347, в июле — до 93 227, в августе — до 11 824 спор грибов/м^3. Количество спор *Cladosporium* снижалось в середине сентября с редкими днями высокой активности в теплую погоду. Споры *Alternaria* (>50 спор грибов/м^3, среднесуточное значение) регистрировались в июне. В это время максимальные месячные показатели составляли 2625 (предпиковые), в июле — 11 576 (пиковые), в августе — 5813 спор грибов/м^3 (постпиковые). Максимальные ежемесячные показатели возрастали с июня (52 762 споры грибов/м^3), достигая максимума в июле (122 888 спор грибов/м^3); в августе высокие показатели сохранялись, но имели тенденцию к уменьшению (22 277 спор грибов/м^3).

Представленные результаты свидетельствуют о динамично меняющемся уровне аэроспор в г. Каракол в течение года.

Весна. Большинство типов спор находятся на низком уровне, за исключением *Cladosporium*, которые могут начинать спорообразование в условиях сухой и теплой погоды.

Лето — начало осени. С повышением температуры воздуха в середине июня возрастает концентрация спор грибов, достигая пиковых значений в конце июня — начале июля. В это время циркулируют споры сухой погоды *Alternaria* и *Cladosporium*.

Обсуждение

Знания пиковых концентраций аэроспор необходимы для повышения уровня осведомленности о пороговых уровнях и принятия профилактических мер по снижению реакции чувствительных пациентов на их воздействие.

Всплески уровней спор, наблюдаемые для *Cladosporium* и *Alternaria* (июль), и их максимальные дневные пики могут иметь важные последствия для больных с грибковой сенсибилизацией. Информация, представленная в этом исследовании, важна для повышения их информированности об эффективных стратегиях управления процессами.

Роды *Cladosporium* и *Alternaria* относятся к классу *Deuteromycetes*, их споры могут быть узнаваемыми по морфологическим особенностям под световым микроскопом и иметь диаметр 3–20 мкм.

В представленном исследовании споры грибов рода *Cladosporium* (размер 5–8 мкм) были наиболее распространены в воздухе, что является характерной чертой умеренного климата.

Споры *Alternaria* крупнее (2–10 мкм), имеют более высокий аэродинамический диаметр и большую скорость падения, чем *Cladosporium* [31]. По этой причине концентрация *Alternaria* ниже, чем *Cladosporium*, в большинстве исследований аэробиоты, также *Alternaria* предпочтительнее в засушливых зонах за счет ресуспендирования в воздухе [8, 25]. С другой стороны, *Alternaria* встречается как в помещении, так и на открытом воздухе; ее споры распространены в почвах, удобрениях, древесине и пищевых продуктах, и это один из основных патогенов культурных и дикорастущих растений [32–34].

Для спор *Cladosporium* предложено несколько пороговых значений концентрации в диапазоне 2000–4000 спор грибов/м^3, хотя в более поздних исследованиях значения сужены до 500–1500 спор грибов/м^3 [35, 36]. Как правило, пороговые показатели 50–100 спор грибов/м^3 принимаются как высокая суточная концентрация *Alternaria* [37].

Споры *Alternaria* и *Cladosporium* имеют перекрывающиеся сезоны в июле – августе с превышением пороговых значений в атмосфере.

Основной сезон спор в воздухе определен 90 %-м методом и показан в календаре спор грибов [38]. Установлено, что летние месяцы (июнь – август) характеризуются наибольшим разнообразием типов спор грибов в воздухе г. Каракол.

В настоящее время растет понимание влияния спор грибов на здоровье и экономику, появляется все больше доказательств того, что изменение климата повлияет на уровни аэроаллергенов [39]. Показано, что долгосрочный мониторинг аэроаллергенов имеет решающее значение для изучения влияния изменения климата на споры грибов в воздухе и понимания связанных с этим последствий для здоровья [40, 41].

Средняя глобальная температура в мире выросла на 0,8 °C с 1975 г. и, как ожидается, возрастет еще на 2–5 °C к 2070 г., а локальные колебания, как прогнозируется, будут еще более резкими [42–44]. Изменение климата повлияет на сельское хозяйство, включая жизнедеятельность спор грибов, вегетирующих на растениях. Это изменит эпидемиологический ландшафт патогенов, поскольку грибы могут легко адаптироваться к изменяющимся условиям.

Споры грибов считаются более адаптивными и чувствительными к изменениям окружающей среды, чем любые другие микроорганизмы или пыльца растений. В неблагоприятных условиях они демонстрируют морфологические и физиологические изменения в интересах выживания и воспроизводства, что имеет решающее значение для формирования аллергии у чувствительных лиц [45].

Знание максимальной среднесуточной годовой концентрации спор представляет особый интерес, во-первых, для аллергологии. Актуальность этого направления состоит в изучении и анализе распространения основных аэроаллергенов с учетом уровня загрязнения атмосферного воздуха и метеорологических факторов, своевременного информирования населения о пороговых концентрациях в воздухе, создания расширенной сети мониторинга. Кроме

того, существует вероятность подвергнуться одновременно воздействию высоких концентраций аллергенной пыльцы и спор грибов, особенно в июле, когда перекрываются пиковые показатели *Poaceae, Alternaria* и *Cladosporium*. Помимо совместного появления пыльцы и спор грибов, антропогенные загрязнители также могут быть обнаружены в высоких концентрациях в воздухе, влияя на здоровье людей синергетически [46].

Во-вторых, эти сведения актуальны для фитопатологии. Климатические изменения на планете имеют глобальное значение, своевременными являются создание международной сети наблюдений за распространением заболеваний растений и обеспечение постоянного обмена информацией между странами [47]. Установлено, что наиболее значимым метеорологическим фактором, влияющим на циркуляцию спор грибов в воздухе, является температура. Ее повышение может способствовать появлению новых или распространению имеющихся аэроаллергенов и возбудителей болезней растений.

Изменяющаяся среда обитания, вероятно, подвергнет человечество воздействию новых малоизученных грибов из существующих 1,5 млн видов. Поврежденные в результате разных причин (осмотический шок, скашивание травы и сбор урожая) споры, высвобождая фрагменты субмикронного размера, могут увеличивать риски сенсибилизации у предрасположенных субъектов.

Заключение

Наиболее важными закономерностями, наблюдаемыми в аэромикологическом режиме, были более длительные сезоны и высокие пиковые концентрации спор *Alternaria* и *Cladosporium*, связанные с изменением климата и традиционной системы земледелия, приближающиеся к более южным аридным характеристикам. Увеличение сроков присутствия аэроспор приводит к более длительным периодам их воздействия на людей, что потенциально может увеличивать число дней с симптомами аллергии. Снижение концентрации спор полезно только в том случае, если они будут ниже клинических пороговых концентраций.

Для аэромикологического спектра г. Каракол характерны следующие черты:

- доминантными таксонами спор признаны *Cladosporium* и *Alternaria* как результат их фитопатогенных и аэроаллергенных свойств в сочетании с преобладающим обилием и продолжительным периодом присутствия в атмосфере;
- кривая концентрации спор данных грибов носит унимодальный характер с часто перекрывающимися количественными характеристиками. При этом наблюдалась сильная межгодовая изменчивость атмосферных уровней, зависимая от метеорологических параметров, особенно температуры и осадков. Максимальная концентрация аэроспор *Cladosporium* зафиксирована 30 июня 2017 г. — 12 386 спор грибов/м^3; а *Alternaria* — 28 июля 2015 г., в чрезвычайно сухой год, — 5376 спор грибов/м^3;
- концентрация аэроспор в г. Каракол в разные годы положительно коррелировала с температурой воздуха, особенно в 3-й декаде июля 2015 г., когда максимальная концентрация включала 56 % *Cladosporium* и 13,5 % *Alternaria* и регистрировалась самая высокая температура воздуха (33,5 °C);
- осадки являются одним из ключевых факторов окружающей среды, изменяющих численность и состав аэроспор. Так, в воздухе г. Каракол наблюдалась выраженная отрицательная корреляционная взаимозависимость концентрации спор грибов и осадков в сезон спорообразования. В эти периоды возрастало число неопределенных споровых частиц, что, возможно, связано с фрагментацией спор и их разрывом на более мелкие субмикронные фрагменты.

Полученные данные важны в аспекте повышения осведомленности населения о спорах грибов, оптимизации диагностики, лечения и профилактики аллергических заболеваний с учетом совместного присутствия спор грибов в условиях активной палинации растений.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ / ADDITIONAL INFORMATION

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы Управления науки и научно-технической информации Министерства образования и науки Кыргызстана.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. В.Н. Кобзарь — разработка концепции и дизайна исследования, статистическая обработка данных, написание и редактирование текста статьи; К.Б. Осмонбаева — сбор и обработка материала, статистическая обработка данных. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Funding source. The study was carried out within the framework of the state budget research work of the Department of Science

and Scientific and Technical Information of the Ministry of Education and Science of Kyrgyzstan.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. V.N. Kobzar — concept and design development, statistical analysis, writing and editing the article; K.B. Osmonbaeva — material collection and processing, statistical analysis. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Castro E Silva DM, Marcusso RMN, Barbosa CGG, et al. Air pollution and its impact on the concentration of airborne fungi in the megacity of San Paulo, Brazil. *Heliyon*. 2020;6(10):e05065. doi: 10.1016/j.heliyon.2020 EDN: RNLGTS
2. Hughes KM, Price D, Torriero AAJ, et al. Impact of fungal spores on asthma prevalence and hospitalization. *Int J Mol Sci*. 2022;23(8):4313. doi: 10.3390/ijms23084313 EDN: DIAQUP
3. Wardlaw AJ, Rick EM, Pur Ozyigit L, et al. New perspectives in the diagnosis and management of allergic fungal airway disease. *J Asthma Allergy*. 2021;14:557–573. doi: 10.2147/JAA.S251709 EDN: ZKXSCN
4. Anees-Hill S, Douglas P, Pashley CH, et al. A systematic review of outdoor airborne fungal spore seasonality across Europe and the implications for health. *Sci Total Environ*. 2022;818:151716. doi: 10.1016/j.scitotenv
5. Gioulekas D., Damialis A, Papakosta D, et al. Allergenic fungi spore records (15 years) and sensitization in patients with respiratory allergy in Thessaloniki-Greece. *J Investig Allergol Clin Immunol*. 2004;14(3):225–231.
6. Gharbi D, Mobayed HM, Ali RM, et al. First volumetric records of airborne *Cladosporium* and *Alternaria* spores in the atmosphere of Al Khor (northern Qatar): a preliminary survey. *Aerobiologia*. 2022;38:329–342. doi: 10.1007/s10453-022-09746-7 EDN: KVYOZG
7. Patel TY, Buttner M, Rivas D, et al. Variation in airborne fungal spore concentrations among five monitoring locations in a desert urban environment. *Environ Monit Assess*. 2018;190(11):634. doi: 10.1007/s10661-018-7008-5 EDN: RXZMDO
8. Taia WK, Ismael MI, Bassioni E. Study of the airborne fungal spores in Rosetta, Egypt. *Eur Exp Biol*. 2019;9(1):4. doi: 10.21767/2248-9215.100081
9. Segvic Klaric M, Pepeljnjak S. A year-round aeromycological study in Zagreb area, Croatia. *Ann Agric Environ Med*. 2006;13(1):55–64.
10. Grinn-Gofron A, Ceter T, Pinaret NM, et al. Airborne fungal spore load and season timing in the Central and Eastern Black Sea region of Turkey explained by climate conditions and land use. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020;295:108191. doi: 10.1016/j.agrformet.2020.108191 EDN: FECDJG
11. Huffman JA, Prenni AJ, DeMott PJ, et al. High concentrations of biological aerosol particles and ice nuclei during and after rain. *Atmos Chem Phys*. 2013;13(13): 6151–6164. doi: 10.5194/acp-13-6151-2013 EDN: RIGYBN
12. Rathnayake CM, Metwali N, Jayarathne T, et al. Influence of rain on the abundance of bioaerosols in fine and coarse particles. *Atmos Chem Phys*. 2017;17(3):2459–2475. doi: 10.5194/acp-17-2459-2017
13. Nnadi NE, Carter DA. Climate change and the emergence of fungal pathogens. *PLoS Pathog*. 2021;17(4):1–6. doi: 10.1371/journal.ppat.1009503 EDN: GGLLXW
14. Troutt C, Levetin E. Correlation of spring spore concentrations and meteorological conditions in Tulsa, Oklahoma. *Int J Biometeorol*. 2001;45(2):64–74. doi: 10.1007/s004840100087 EDN: ATIFMZ
15. Di Filippo P, Pomata D, Riccardi C, et al. Fungal contribution to size-segregated aerosol measured through biomarkers. *Atmos Environ.* 2013;64:132–140. doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.10.010 EDN: RIGWSX
16. Niu M, Hu W, Cheng B, et al. Influence of rainfall on fungal aerobiota in the urban atmosphere over Tianjin, China: a case study. *Atmos Environ: X*. 2021;12:100137. doi: 10.1016/j.aeaoa.2021.100137 EDN: GRMKMP
17. Woudenberg JH, Seidl MF, Groenewald JZ, et al. Alternaria section. Alternaria: species, formae speciales or pathotypes? *Stud Mycol*. 2015;82:1–21. doi: 10.1016/j.simyco.2015.07.001 EDN: WRBVRL
18. Chaerani R, Voorrips RE. Tomato early blight (*Alternaria Solani*): the pathogen, genetics, and breeding for resistance. *J Gen Plant Pathol*. 2006;72:335–347. doi: 10.1007/s10327-006-0299-3 EDN: XUAPHD
19. Nowicki M, Nowakowska M, Niezgoda A, Kozik E. *Alternaria* black spot of crucifers: symptoms, importance of disease, and perspectives of resistance breeding. *Veg Crop Res Bull*. 2012;76:5–19. doi: 10.2478/v10032-012-0001-6
20. Thomma BP, Van Esse HP, Crous PW, de Wit PJ. *Cladosporium Fulvum* (syn. *Passalora fulva*), a highly specialized plant pathogen as a model for functional studies on plant pathogenic Mycosphaerellaceae. *Mol Plant Pathol* 2005;6(4):379–393. doi: 10.1111/j.1364-3703.2005.00292.x
21. Damialis A, Kaimakamis E, Konoglou M, et al. Estimating the abundance of airborne pollen and fungal spores at variable elevations using an aircraft: how high can they fly? *Sci Rep*. 2017;7:44535. doi: 10.1038/srep44535
22. Osmonbaeva KB, Churyukina EV, Dzhambekova GS, Nazarova EV. Aeroallergen concentrations in urban areas and the effect of air temperature. *Russian Medical Inquiry*. 2024;8(3):124–131. (In Russ.). doi: 10.32364/2587-6821-2024-8-3-2 EDN: JTUMUG
23. Talley SM, Coley PD, Kursar TA. The effects of weather on fungal abundance and richness among 25 communities in the Intermountain West. *BMC Ecol*. 2002;2:7. doi: 10.1186/1472-6785-2-7 EDN: MWIEHF
24. Gonzalez-Parrado Z, Fuertes-Rodriguez CR, De Castro-Alfageme S, et al. Analisis de esporas fungicas alergenicas en la atmosfera de Leon, Miranda de Ebro y Zamora (Espana). *Polen*. 2009;19:31–47. (In Spanish).
25. Gonzalez Minero FJ, Candau P. *Alternaria* y *Cladosporium*: aeroalergenos en la atmosfera de Huelva. *Stvdia Botanica*. 1994;13:83–86. (In Spanish).
26. Nitiu DS, Mallo AC. Variaciones en la estacionalidad de polen y esporas fungicas en la atmosfera de la ciudad de La Plata (Argentina). Bol Soc Argent Bot. 2011;43: 297–304. (In Spanish).
27. Adhikari A, Sen MM, Gupta-Bhattacharya S, Chanda S. Airborne viable, non-viable, and allergenic fungi in a rural agricultural area of India: a 2-year study at five outdoor sampling stations. *Sci Total Environ*. 2004;326(1–3):123–141. doi: 10.1016/j.scitotenv.2003.12.007
28. De la Fuente RA, Tirado-Arias G, Quintero-Nunez M. *Educación ambiental. Una contribución en la solución al problema de la contaminación atmosférica*. AR Impresiones, Mexicali. 2013. P. 37–77. (In Spanish).
29. Rocha-Estrada A, Alvarado-Vazquez MA, Gutierrez-Reyes R, et al. Variacion temporal de esporas de *Alternaria*, *Cladosporium*, *Coprinus*, *Curvularia* y *Venturia* en el aire del area metropolitana de Monterrey, Nuevo Leon Mexico. *Rev Int Contam Ambient*. 2013;29(2):155–165. (In Spanish).
30. Schevkova J, Kovach J. First calendar of fungal spores for the atmosphere of Bratislava, Slovakia. *Aerobiology*. 2019;35(2):343–356. doi: 10.1007/s10453-019-09564-4 EDN: NDUWFU
31. Yamamoto N, Nazaroff WW, Peccia J. Assessing the aerodynamic diameters of taxon-specific fungal bioaerosols by quantitative PCR and next-generation DNA sequencing. *J Aerosol Sci*. 2014;78:1–10. doi: 10.1016/j.jaerosci.2014.08.007
32. Maya-Manzano JM, Fernandez-Rodriguez S, Hernandez-Trejo F, et al. Seasonal mediterranean pattern for airborne spores of *Alternaria*. *Aerobiologia.* 2012;28(4):515–525. doi: 10.1007/s10453-012-9253-3 EDN: EJETTT
33. Maya-Manzano JM, Munoz Trivino M, Fernandez-Rodriguez S, et al. Airborne *Alternaria* conidia in Mediterranean rural environments in SW of Iberian Peninsula and weather parameters that influence their seasonality in relation to climate change. *Aerobiologia*. 2016;32(1):95–108. doi: 10.1007/s10453-016-9424-8 EDN: XQIESP
34. Hollins PD, Kettlewell PS, Atkinson MD, et al. Relationships between airborne fungal spore concentration of cladosporium and the summer climate at two sites in Britain. *Int J Biometeorol*. 2004;48(3):137–141. doi: 10.1007/s00484-003-0188-9 EDN: ETUFKX

35. Targonski PV, Persky VW, Ramekrishnan V. Effect of environmental molds on risk of death from asthma during the pollen season. *J Allergy Clin Immunol*. 1995;95(5 Pt 1): 955–961. doi: 10.1016/s0091-6749(95)70095-1
36. Velez-Pereira AM, De Linares C, Canela MA, Belmonte J. Logistic regression models for predicting daily airborne *Alternaria* and *Cladosporium* concentration levels in Catalonia (NE Spain). *Int J Biometeorol*. 2019;63(12):1541–1553. doi: 10.1007/s00484-019-01767-1 EDN: SJWNXT
37. Gravesen S. Fungi as a cause of allergic disease. *Allergy*. 1979;34(3):135–154. doi: 10.1111/j.1398-9995.1979.tb01562.x
38. Skjoth CA, Damialis A, Belmonte J, et al. *Alternaria* spores in the air across Europe: abundance, seasonality and relationships with climate, meteorology and local environment. *Aerobiologia*. 2016;32(1):3–22. doi: 10.1007/s10453-016-9426-6 EDN: XPQBGN
39. Lam HCY, Anees-Hill S, Satchwell J, et al. Association between ambient temperature and common allergenic pollen and fungal spores: a 52-year analysis in central England, United Kingdom. *Sci Total Environ*. 2024;906:167607. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167607 EDN: OBJBDX
40. Symon FA, Anees-Hill S, Satchwell J, et al. A fungal spore calendar for England: analysis of 13 years of daily concentrations at Leicester, UK. *bioRxiv*. 2023;12(15)571848. doi: 10.1101/2023.12.15.571848
41. Ponce-Caballero C, Gamboa-Marrufo M, Lopez-Pacheco M, et al. Seasonal variation of airborne fungal propagules indoor and outdoor of domestic environments in Merida, Mexico. *Atmosfera*. 2013;26(3):369–377. doi: 10.1016/S0187-6236(13)71083-X
42. Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Global temperature change. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2006;103(39):14288–14293. doi: 10.1073/pnas.0606291103
43. Core Writing Team, Pachauri RK, Allen MR, editors. *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC; 2014. 151 p.
44. Hansen J., Sato M., Kharecha P. et al. Climate change and trace gases. *Phil Trans Roy Soc A*. 2007;365:1925–1954. doi: 10.1098/rsta.2007.2052 EDN: MMBLOT
45. Branco S., Schauster A., Liao H.L., Ruytinx J. Mechanisms of stress tolerance and their effects on the ecology and evolution of mycorrhizal fungi. *New Phytol*. 2022;235(6):2158–2175. doi: 10.1111/nph.18308 EDN: TWLELF
46. Grewling L., Fratczak A., Kostecki L. et al. Biological and chemical air pollutants in urban area of Central Europe: co-exposure assessment. *Aerosol Air Qual Res*. 2019;19(7):1526–1537. doi: 10.4209/aaqr.2018.10.0365
47. Левитин М.М. Микроорганизмы в условиях глобального изменения климата. В кн.: Левитин М.М. *Сельскохозяйственная биология*. 2015;50(5):641–647.

Об авторах / Authors' info

*** Кобзарь Вера Николаевна,** д-р биол. наук, профессор;
*** Vera N. Kobzar,** MD, Dr. Sci. (Biology), Professor;
адрес: Кыргызская Республика, 720001, Бишкек, ул. Киевская, д. 44;
address: 44 Kievskaya st., 720001 Bischkek, Kyrgyz Republic;
ORCID: 0000-0001-9910-0148; eLibrary SPIN: 4669-6355; e-mail: kobzarvn@yandex.ru

Осмонбаева Кымбаткуль Бейшеновна, канд. биол. наук, доцент;
Kymbatkul B. Osmonbaeva, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor;
ORCID: 0000-0001-9606-9392; eLibrary SPIN: 6501-0823; e-mail: kymbat.950307@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку
* Corresponding author