

УДК 575.224 504.53.054
AGRIS F40

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/106/03>

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ АЛЛЕРГЕННОЙ ПЫЛЬЦЫ КАК БИОИНДИКАТОР

©Кобзарь В. Н., ORCID: 0000-0001-9910-0148, SPIN-код: 4669-6355, д-р биол. наук,
Киргизско-Российский славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан, kobzarvn@yandex.ru

MORPHOLOGICAL CHANGES IN ALLERGENIC POLLEN AS A BIOINDICATOR

©Kobzar V., ORCID: 0000-0001-9910-0148, SPIN-code: 4669-6355, Dr. habil.,
Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan, kobzarvn@yandex.ru

Аннотация. С момента вскрытия пыльника и путешествия пыльцевых зерен в атмосфере они могут контактировать с твердыми и газообразными частицами, а экзина загрязняться разнообразными прилипшими частицами. Пыльца и твердые частицы являются одними из наиболее распространенных триггеров бронхиальной астмы. Повышенная аллергенность пыльцевых зерен будет определяться химическими реакциями между загрязнителями и пыльцой, а также неспецифической модуляцией механизмов синтеза многих белков, липидов и ферментов в ответ на стресс окружающей среды вследствие урбанизации и изменения климата. Указанное положение серьезно затрудняет идентификацию пыльцы до таксона при традиционном мониторинге и в дальнейшем усложняет подсчет и интерпретацию полученных результатов при исследовательском и автоматическом определении. Цель: классифицировать тератоморфную пыльцу из аэриобиологических образцов и объяснить механизм выявленных изменений. Определения мутагенной загрязненности и способ интегральной оценки жизнеспособности и поврежденности пыльцы под световым микроскопом. Пыльца из аэриобиологических образцов изучена под сканирующим электронным микроскопом (Hitachi): метода визуализации с высокой степенью, который использует лучи электронов для создания деталей изображений ультраструктуры пыльцевых зерен. Неидентифицированную, тератоморфную пыльцу из аэриобиологических образцов пунктов с различной степенью загрязненности условно можно классифицировать на 4 типа: 1) бесформенные комочки спорополленина с различными выростами, трещинами и кавернами, возникшие во время онтогенеза пыльцы; 2) нетипичная орнаментация скульптуры, например, крупные бугорки — вздутия с гладкой поверхностью; 3) нетипичная форма, но с частично сохранившейся скульптурой, где местами можно выделить видоспецифичные признаки и определить пыльцу до таксона; 4) конгломераты. Изучение витальности (жизнеспособности) и поврежденности пыльцы ежи сборной под световым микроскопом из пунктов наблюдения с разной антропогенной нагрузкой показали зависимость указанных показателей от уровня загрязнителей: с их увеличением жизнеспособность убывает, хотя и остается довольно высокой. Полученные данные важны для оценки аллергенной пыльцы как биоиндикатора изменений окружающей среды. Интегральная оценка ферментативной активности пыльцы и степени ее поврежденности может применяться для целей биоэкологического мониторинга.

Abstract. Since the anther opens and the pollen grains travel in the atmosphere, they can come into contact with solid and gaseous particles, and the exine can become contaminated with various

adherent particles. Pollen and solid particles are among the most common triggers of bronchial asthma. Increased allergenicity of pollen grains will be determined by chemical reactions between pollutants and pollen, as well as non-specific modulation of the mechanisms of synthesis of many proteins, lipids and enzymes in response to environmental stress due to urbanization and climate change. This situation seriously complicates the identification of pollen to a taxon during traditional monitoring and further complicates the calculation and interpretation of the results obtained during research and automatic determination. To classify tetramorphic pollen from aerobiological samples and explain the mechanism of the identified changes. Determination of mutagenic contamination and a method for integral assessment of pollen viability and damage under a light microscope. Pollen from aerobiological samples was examined under a scanning electron microscope (Hitachi): a high-power imaging technique that uses electron beams to create detailed images of the ultrastructure of pollen grains. Unidentified, tetramorphic pollen from aerobiological samples from sites with varying degrees of contamination can be conditionally classified into 4 types: 1) shapeless lumps of sporopollenin with various outgrowths, cracks and cavities that arose during pollen ontogenesis; 2) atypical ornamentation of sculpture, such as large tubercles - swellings with a smooth surface; 3) atypical form, but with partially preserved sculpture, where in places species-specific features can be identified and pollen can be identified to a taxon; 4) conglomerates. The study of the vitality (viability) and damage of the cocksfoot pollen under a light microscope from observation points with different anthropogenic loads showed the dependence of these indicators on the level of pollutants: with their increase, viability decreases, although it remains quite high. The data obtained are important for assessing allergenic pollen as a bioindicator of environmental changes. An integrated assessment of the enzymatic activity of pollen and the degree of its damage can be used for the purposes of bioecological monitoring.

Ключевые слова: нормальная пыльца растений, тератоморфная пыльца растений, споры грибов, субпыльцевые частицы, экзина, жизнеспособность, биомониторинг, твердые частицы, изменение климата, изменение сельскохозяйственного ландшафта, загрязнение окружающей среды.

Keywords: normal plant pollen, tetramorphic plant pollen, fungal spores, subpollen particles, exine, viability, biomonitoring, particulate matter, climate change, land use change, environmental pollution.

Пыльца и твердые частицы являются одними из наиболее распространенных триггеров астмы. Повышенная аллергенность пыльцевых аллергенов будет определяться химическими реакциями между загрязнителями и пылью, а также неспецифической модуляцией механизмов синтеза многих белков, липидов и ферментов в ответ на стресс окружающей среды, вследствие. Загрязнители воздуха, в основном те, которые связаны с интенсивным движением транспорта, изменяют аллергенность пыльцевых зерен и восприимчивость к ним пациента, что проявляется в увеличении числа страдающих и/или обострении симптомов поллиноза в городах. Газообразные загрязнители, такие как озон, оксид углерода, диоксид азота и диоксид серы, а также твердые частицы (фракции PM_{2,5} и PM₁₀) могут изменять морфологическую структуру экзины или усугублять их аллергенность, увеличивая экспрессию или вызывая секрецию новых типов аллергенных белков [8].

Загрязняющие вещества, прилипшие к пыльце, могут повреждать её поверхность и вызвать усиленное высвобождение аллергенов или образовать комплексы пыльца-частица из-за процесса адсорбции. Загрязнители воздуха влияют на морфологические и физические

свойства поверхности пыльцы (деформация, перфорация, разрыв оболочки пыльцы), что приводит к повышению биодоступности аллергена или субпыльцевых частиц, содержащих аллергены, высвобождаемых в окружающую среду.

Цель настоящей статьи: классифицировать тератоморфную пыльцу из аэриобиологических образцов и объяснить механизм выявленных изменений.

Материал и методы

Материал — пыльца из аэриобиологических образцов и нормально развитая пыльца из районов наблюдения с разной антропогенной нагрузкой. Палиноморфологический блок включал световую микроскопию:

1) способ определения мутагенной загрязненности окружающей среды: пыльцу окрашивали по Грамму. Окраска пыльцы зависела от состава крахмала: нормальная пыльца, содержащая крахмал, состоящий из амилазы и амилопектина, окрашивалась в светло-голубой цвет. В случае возникновения мутаций пыльца содержала крахмал – амилопектин и окрашивалась в красноватый цвет. Мутации возникали в рецессивном аллеле *waxu*. Фертильная пыльца была окрашена в черный цвет, а стерильная оставалась бесцветной. Нормально развитой считается пыльца с окрашенной в розовый цвет, хорошо структурированной цитоплазмой, содержащая ядро с генеративной и вегетативной клетками. Тератоморфная пыльца — неокрашенная, сморщенная, пустая и с другими видимыми повреждениями. Все методы предполагают качественную оценку пыльцевых зёрен в репрезентативной выборке (100), где трех (пяти)кратно изучались видимые морфологические повреждения и мутагенность и затем высчитывались их средние значения под световым микроскопом.

2) способ интегральной оценки жизнеспособности и поврежденности пыльцы. Жизнеспособность определяли методом В.С. Шардакова. Витальная пыльца, содержащая пероксидазу, окрашивалась в ярко-розовый или темно-красный цвет. Погибшая пыльца была бесцветной. Пыльца из аэриобиологических образцов изучена под сканирующим электронным микроскопом (Hitachi): метода визуализации с высокой степенью, который использует лучи электронов для создания деталей изображений ультраструктуры пыльцы (Рисунок 1).



Рисунок 1. Создание деталей изображений ультраструктуры пыльцы

Результаты и их обсуждение

Пыльца злаковых и сорных трав является наиболее распространенной причиной пыльцевой аллергии в Европе. Однако все больше данных свидетельствуют о том, что загрязнение воздуха и изменение климата могут способствовать росту числа случаев аллергии и утяжелению симптомов [1].

Дифференциальный подсчет пыльцы растений из аэриобиологических образцов под световым микроскопом показал её поврежденность и загрязненность разными мелкодисперсными частичками в результате — стали образовываться конгломераты. Указанное положение серьезно затрудняет идентификацию пыльцы до таксона при традиционном аэриобиологическом мониторинге и в дальнейшем усложняет подсчет и интерпретацию полученных результатов при исследовательском и автоматическом определении.

Выделяемая из пыльников пыльца подвергается прессингу многих факторов, включая метеорологические (температура, осадки и относительная влажность), новые фитопатогены (изменение системы землепользования) и антропогенные загрязнители (урбанизация). Установлено, что:

- 1) наиболее выраженные трансформации идут в период онтогенеза в полости пыльника;
- 2) в воздушной среде, где все уже возникшие повреждения в недоразвитой и зрелой пыльце усугубляются или возникают новые и появляются аллергенные свойства.

Итак, повреждение на любом из этих этапов ведет к появлению аномальной, тератоморфной пыльцы, что напрямую зависит от стадии её развития. В условиях антропогенной загрязненности воздуха, урбанизации и изменения климата формируется пыльца с редуцированными признаками, которую трудно определить даже с помощью сканирующей электронной микроскопии. У неё изолированно или в комплексе изменяются характерные таксономические признаки: размер, форма, орнаментация скульптуры, структура и тип апертур.

С целью повышения точности определения и количественной оценке пыльцевых зерен в аэриобиологических образцах, мы изучили их под СЭМ. Ультрамикроскопические изображения можно использовать для улучшения эффективности идентификации пыльцы, поскольку высокое разрешение СЭМ открывает потенциал для предоставления экспертам очевидной дифференциальной диагностики пыльцевых зерен.

Рассмотрим подробно схему по блокам. Благодаря орнаментации скульптуры поверхности и липофильности экзины различные типы загрязняющих веществ, включая газообразные соединения и фракции твердых частиц, могут прилипнуть к поверхности пыльцы [2].

В проведенных исследованиях аэроспоры *Penicillium* колонизировали пыльцу злаков и маревых, прогрессивный рост концентрации спор грибов во многом связан с изменением климата и традиционной системой землепользования, и ростом фитопатогенов (Рисунок 3). В аэриобиологических образцах, собранных в Ньиредьхазе, Венгрия, споры грибов были обнаружены на пыльцевых зернах амброзии полыннолистной. Её концентрация коррелировала с метеорологическими факторами (отрицательно с температурой и положительно со скоростью ветра), PM_{10} , $PM_{2.5}$ и уровнем спор. Пыльца чаще всего поражалась спорами *Cladosporium*, менее — *Alternaria*, *Aspergillus*, *Penicillium* [3].



Рисунок 2. Схема модификаций в пыльцевых зернах высокоаллергенных злаков (ежа сборная), полыни, амброзии и амарантовых, происходящих под воздействием метеорологических факторов (изменение климата), изменения традиционной системы землепользования и загрязнения окружающей среды и урбанизации



Рисунок 3. Световая микроскопия: на поверхности эскины деформированных пыльцевых зерен *Roaseae* видны споры грибов. Ультрамикроскопическая картина: (2) на скульптуре эскины измененной пыльцы ежи сборной идентифицированы споры грибов пеницилла и (3) выросты эскины и прилипшие к поверхности разнообразные частицы

Атмосферные загрязнители антропогенного происхождения (PM_x, NO₂, SO₂ и CO) прямым образом воздействуют на физическо-химические свойства пыльцевых зерен, изменяя характеристики поверхности эскины, её аллергенный потенциал, высвобождение аллергенов/белков из пыльцы и молекулярную структуру белков [4–8].

Для этой цели очень важен палиноморфологический анализ. Авторы продемонстрировали изменения в морфологической структуре клеточной стенки эскины (внешней): истончение, разрыв, расширение стенок интины (внутренней) и в спорополнении, придающем устойчивость пыльцевым зернам к загрязнению окружающей среды [9–11].

Известно, что пыльца таксонов с более тонкой эскиной, таких как злаки и конопля (1 мкм), высоко чувствительных к действию загрязняющих веществ, чаще деформируются, фрагментируются и разрушаются. Эскина загрязненных пыльцевых зерен становится хрупкой, в ней происходят трещины и разрывы [12], что приводит к увеличению цитоплазматических гранул пыльцы (PCG), также называемых субпыльцевыми частицами (SPP), содержащих аллергены, выделяемые в окружающую среду [13].

Повышенное высвобождение SPP уже наблюдалось в пыльце *Phleum pratense*, собранной в загрязненной среде [14].

Как показали настоящие ультрамикроскопические исследования, в условиях загрязненности окружающей среды пыльца становится чрезвычайно хрупкой, с нее легко снимается покровный слой, способствуя увеличению аллергенности поврежденного пыльцевого зерна (Рисунок 4).



Рисунок 4. Скальпирование экзины пыльцевых зерен в результате хрупкости

Размер твердых частиц существенно влияет на способность частиц глубоко проникать в легкие [15].

Фрагменты маленького размера (~2,5 микрона или меньше) могут легко вдыхаться, а затем проникать глубже в нижние дыхательные пути, способствуя проникновению фрагментов пыльцы сначала в бронхи [16, 17].

Сверхтонкие частицы (PM < 0,1 мм) могут достигать уже альвеолярной области, что приводит к более агрессивным и опасным эффектам, чем другие вдыхаемые фракции большего размера, как на респираторном уровне, так и на молекулярном уровне, вызывая обострение симптомов пыльцевой бронхиальной астмы (Рисунок 5).

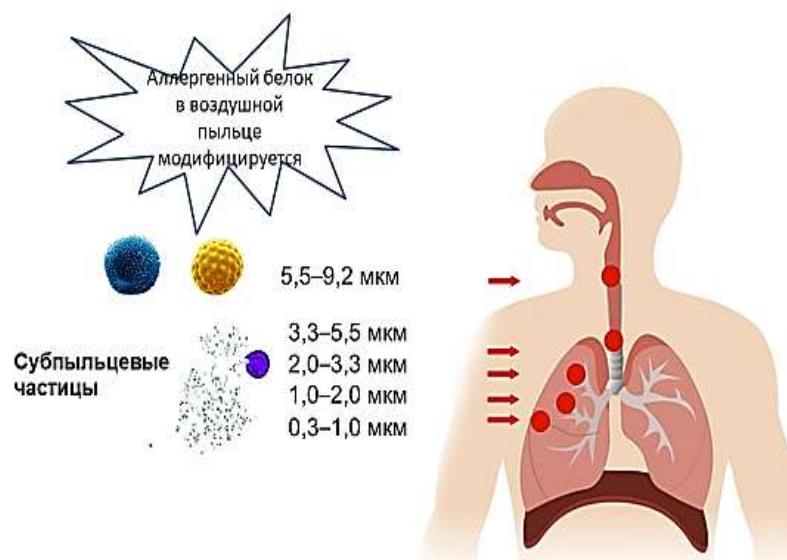


Рисунок 5. Эффект размера фрагмента пыльцы 5,5–9,2 мкм: нос и горло; 3,3–5,5 мкм: основные дыхательные пути; 2,0–3,3 мкм: бронхи; 1,0–2,0 мкм: бронхиолы; 0,3–1,0 мкм: альвеолы. Твердые частицы PM10 относятся к частицам размер, которых меньше 10 мкм

Установлено, что твердые частицы могут выступать в качестве переносчиков аллергенов и связываться с фрагментами воздушной пыли, изменяя её содержание и состав аллергенов [2].

В некоторых исследованиях показаны различия в морфологических характеристиках пыли, произрастающей в загрязненной промышленной зоне, по сравнению с контрольной [10].

Исследования под световым и сканирующим электронным микроскопом показали, что пылевые зерна экологически чистого района имели нормальный размер, форму и скульптуру. У пыли из загрязненной зоны наблюдалось уменьшение размеров, истончение экзины, выступы и агломерированные частицы на поверхности пыли. Другими авторами не было продемонстрировано значимых различий между загрязненной и незагрязненной пылью, что может быть связано с разной чувствительностью таксонов к воздействию уровней загрязнителей [17, 18].

Химическая модификация, вызванная загрязнением воздуха, может влиять на биохимический состав и содержание пыли [19, 20] и способствовать изменениям в структуре белков оболочки пыли (окисление аминокислот, конформационные изменения, сшивание, олигомеризация, деградация белка), влияя на стабильность, профиль, гидрофобность и кислотность участков связывания белка [21, 22].

Во многих исследованиях была обнаружена общая тенденция к снижению содержания белка в пыли березы, подвергшейся воздействию O_3 , SO_2 [21, 23], а пыльца, собранная в загрязненной местности, содержала меньше растворимых белков [24]. Напротив, по мнению других авторов [25], атмосферные загрязнители могут увеличивать общее содержание белка в пыли в условиях стресса как механизм защитной системы растения [26].

Установлено, что содержание белка было ниже в образцах пыли клена, подвергшейся воздействию SO_2 , и немного выше после экспериментальной обработки NO_2 , по сравнению с контролем [25]. Следовательно, один и тот же загрязнитель, взаимодействуя с конкретным аллергеном, может вызывать разнообразные эффекты из-за различий в загрязняющих веществах (NO_2 и O_3) и чувствительности таксона пыли к воздействию [27–30].

Проведенное нами изучение витальности (жизнеспособности) и поврежденности пыли ежи сборной под световым микроскопом из пунктов наблюдения с разной антропогенной нагрузкой выявили закономерность. Она заключается в зависимости указанных показателей от уровня загрязнителей: с их увеличением жизнеспособность убывает, хотя и остается довольно высокой. При этом одновременная оценка ферментативной активности и степени поврежденности пыли может применяться для целей биоэкологического мониторинга.

Многие атмосферные загрязнители (CO , CO_2 , O_3 и SO_2) при взаимодействии с пылью воздействуют на её жизнеспособность, скорость прорастания и фертильность [17, 31, 33].

Жизнеспособность пыли и скорость прорастания являются критическими факторами, напрямую влияющими на репродуктивную функцию растений. Это простейшие и наиболее широко используемые для доказательства влияния загрязнителей воздуха на пыльцу биологические параметры [17].

Для этого исследователи оценили жизнеспособность пыли после воздействия загрязнителей *in vivo* или *in vitro* [34–36]. Так, пыльца березы после эффекта действия повышенных уровней некоторых загрязняющих веществ (CO , O_3 , SO_2) показала значительное снижение жизнеспособности (14%) и скорости прорастания (36%) [34].

Таким образом, толерантность пыльцы к загрязняющим веществам, по-видимому, выше, когда она подвергается воздействию *in vivo*, по сравнению с экспериментальными условиями *in vitro*, что связано с защитной ролью пыльника во время её формирования [34–36].

Мы изучили число мутагенных пыльцевых зёрен ежи сборной в районах с различной степенью загрязнённости. Из результатов следует, что наибольшее число мутагенной пыльцы обнаружено в районе ТЭЦ (87), Ошского рынка г. Бишкек (62).

Много мутагенной пыльцы выявлено в зоне автовокзалов гг. Чолпон-Ата и Каракол (33 и 51 соответственно). В связи с этим мы изучили мутагенность пыльцы ежи сборной из района экологически чистого района биостанции г. Чолпон-Ата после её экспериментальной обработки бенз(а)пиреном. Установлено, что в результате этого более чем в 2 раза увеличилось число мутагенно активных пыльцевых зёрен. На клеточном уровне загрязнители воздуха из-за своих окислительных свойств могут повреждать и разъединять органеллы с высвобождением цитоплазматических гранул пыльцы, а также вмешиваться в клеточные механизмы, последовательность и экспрессию генов [45–48]. В этой связи более высокая частота дискретных и точечных мутаций в пыльцевых зёрнах, собранных в городских загрязнённых районах, вызывала изменения в экспрессии последовательностей генов, влияя на функцию белков, их содержание и потенциал аллергенов [8, 49]. Окислительные свойства загрязнителей воздуха могут повреждать биомолекулы, (белки, липиды и нуклеиновые кислоты), которые составляют основной материальный резервуар пыльцы, влияя на прорастание и удлинение пыльцевой трубки [51]. Загрязнители воздуха могут косвенно взаимодействовать с эпителиальными поверхностями, вызывая воспаления и увеличивая проницаемость эпителия, а также могут действовать напрямую как адъюванты, способствуя выработке некоторых цитокинов в эпителиальных клетках дыхательных путей больных и проаллергическим иммунным реакциям (IgE-опосредованные ответы), усиливая экспрессию аллергенных белков в пыльце [22, 52, 53].

Таким образом, окислительная деградация белка и образование амидных и карбонильных групп снижают распознавание аллергенных белков; в противном случае другие химические модификации, такие как нитрация или сшивание, могут усилить аллергенный потенциал молекул, как было показано при нитрации аллергена Bet v1 пыльцы березы [30, 31]. Эти посттрансляционные модификации аллергенов могут неблагоприятно воздействовать на их стабильность, влияя на иммунные реакции в нескольких процессах [22]. Некоторые из упомянутых механизмов, включая повышенное отложение аллергена в дыхательных путях из-за загрязнителей воздуха, могут усиливать сенсибилизацию к аллергенам, что у генетически предрасположенного человека вызывают и усугубляют клинические проявления бронхиальной астмы [53].

Неидентифицированную, тератоморфную пыльцу из аэробιологических образцов пунктов с различной степенью загрязнённости условно можно классифицировать на 4 типа:

- 1) бесформенные комочки спорополленина с различными выростами, трещинами и кавернами, возникшие во время онтогенеза пыльцы (Рисунок б);
- 2) пыльца с нетипичной орнаментацией скульптуры, например крупными бугорками — вздутиями с гладкой поверхностью;
- 3) пыльца с нетипичной формой, но с частично сохранившейся орнаментацией скульптуры, где местами можно выделить видоспецифичные признаки и определить пыльцу до таксона. Так, по сохранившейся скульптуре на микрофотографии можно идентифицировать пыльцу маревых, но форма трансформирована. На поверхности пыльцы

эскины злаков и полыни с типичной формой также выявлены более мелкие, плотно расположенные бугорки;

4) конгломераты. В результате онтогенетических повреждений встречаются нераспадающиеся и распадающиеся конгломераты (после ацетолиза), часто состоящие из двух пылинок, одна из которых, как правило, нормально развитая, структура других сильно редуцирована и лишена видоспецифических признаков и не определяется.



а



б



в



г



д



е



ж



з

Рисунок 6. Тератоморфное пыльцевое зерно из аэриобиологических образцов: г. Каракол и г. Айдаркен (2000–3000) а-б; г. Айдаркен (2000–3000); в-г. г. Айдаркен (3000–10000). ж, з. Конгломерат пыльцевых зёрен полыни и ассоциация из нормально развитой и недоразвитой пылинок астровых из аэриобиологических образцов г. Айдаркен (2000–3000)

Образование тяжелых конгломератов приводит к тому, что под действием гравитации они быстрее осаждаются из воздуха. Если в конгломераты (агломерированные скопления) собрана нормально развитая пыльца, то она теряется с точки зрения опыления. Загрязнители атмосферы, осаждаясь на поверхности пыльцы, меняли характер её скульптурных элементов, что приводило к образованию легко распадающихся скоплений. У нормально развитой пыльцы под прессингом загрязняющих веществ в воздухе происходили следующие изменения:

- 1) более выраженная степень деформации, чем у пыльцы, исследованной непосредственно с растений;
- 2) частичная или полная степень перфорации: отверстия и каверны;
- 3) трещины, иногда переходящим в разрыв;
- 4) изменения орнаментации скульптуры экзины: наплывы спорополленина, бугорки различной формы, расположенные локально или по всей поверхности зерна с налипшими кусочками тапетальной мембраны;
- 5) модификации формы в результате возникших вмятин, отверстий, каверн и выростов.

Следовательно, в большей степени модифицировались пыльцевые зёрна с нежной и тонкой оболочкой (менее 1 мкм), округлой, эллипсоидальной формы (мятликовые и коноплевые), чувствительных к эффекту действию загрязнителей. Для них был описан процесс высвобождения субпыльцевых аллергенов через разрыв стенки пыльцы (из-за высокой влажности) и скальпирования экзины. Для пыльцы полыни, имеющей толстую оболочку, зафиксирована иная стратегия, в основном аккумуляция загрязнителей.

В условиях повышенной радиации г. Каракол и высокой концентрации ртути (легальная добыча красной ртути) в окружающей среде г. Айдаркен наблюдалось исключение из правил: повреждалась пыльца полыни, в целом толерантная к воздействию антропогенных факторов. Необходимо подчеркнуть, что среди всех изученных аэриобиологических образцов больше всего тератоморфной пыльцы было в г. Айдаркен. После высвобождения из пыльника изменился биохимический состав пыльцы: (1) полисахариды преобразовались в моносахариды; (2) концентрация белка и/или уровень нитрации/окисления изменились; (3) липиды модифицировались и/или снизились в уровне [53]. Перед опылением пыльца может быть загрязнена непосредственно на растениях в полости пыльника при его раскрытии. Во время опыления взвешенные в воздухе пыльцевые зерна и твердые частицы могут сталкиваться, вызывая их прилипание к поверхности пыльцы. При повышенной влажности споры грибов колонизировали пыльцу мятликовых, амарантовых, астровых (полынь и амброзию), независимо от толщины оболочки.

Оболочка пыльцы содержит липиды и сахара, которые являются идеальным источником питательных веществ для микроорганизмов, таких как бактерии или споры грибов, и действительно, пыльца обычно несет несколько микроорганизмов на своей липкой оболочке. Они, по-видимому, влияют на аллергенность пыльцы. Внутренняя часть матрицы (клеточная структура и организация, включая архитектонику, форму и орнаментацию пыльцы) состоит из соединений, присущих пыльце, а внешняя фракция включает в себя значимый микробиом, удерживающий на экзине разнообразные штаммы бактерий, вирусы и споры грибов. Основными иммуностимуляторами могут быть белки, включая аллергены с внутренней адьювантной активностью, неаллергенные протеазы, а также липиды и метаболиты, такие как аденозин и флавоноиды. Кроме того, климат и воздействие загрязняющих веществ в воздухе формируют состав матрицы пыльцы или разрывает её на субпыльцевые фрагменты (Рисунок 7).

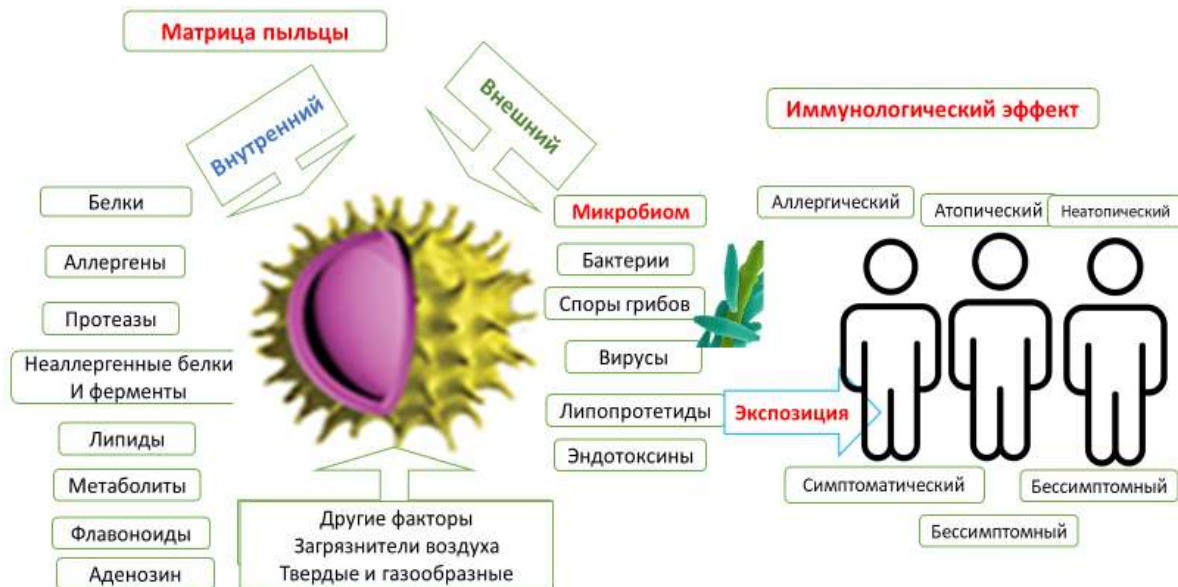


Рисунок 7. Состав матрицы пыльцы, влияющий на сенсibiliзирующий потенциал аллергенных источников для человека

Окислительные свойства загрязняющих воздух веществ могут изменять состав и химические свойства макромолекул (белки, липиды и нуклеиновые кислоты), влияя на прорастание и удлинение пыльцевой трубки, а также на модуляцию иммунного ответа во многих клеточных и молекулярных процессах [40].

Все эффекты воздействия на пыльцу зависят от факторов окружающей среды, таких как изменение климата, метеорологические условия и урбанизация, а также индивидуальных факторов: сенсibilизация к аллергенам в зависимости от условий воздействия, пыльцы и типов загрязняющих веществ [10].

Изменение климата и погодные факторы существенно влияют на выработку, концентрацию, диффузию, биодоступность аллергенов и сезонность пыльцы, определяя распространенность сенсibilизации к аэроаллергенам и респираторные заболевания. Более того, в этом контексте необходимо учитывать влияние урбанизации.

Следует признать, что существует разница между палиноморфологией пыльцы, собранной непосредственно с полноценно цветущих растений и воздушной пылью из аэриобиологических образцов районов с высокой степенью загрязненности окружающей среды. В ней выявлена выраженная степень изменчивости широкого спектра действия: от деформации до полной редукции диагностически значимых признаков в период онтогенеза. В биоаэрозолях обнаружены разнообразные морфологические структуры [59, 60].

Указанное происходило в основном за счет того, что на пыльцу негативно воздействовали не отдельные загрязняющие вещества, а их миксты и вторичные загрязнители, образующиеся за счет химических процессов, протекающих в атмосферном воздухе с участием первичных загрязнителей (Таблица).

В настоящее время к идентификации пыльцы растений и спор грибов в аэриобиологических исследованиях привлекают искусственный интеллект. Обоснованием является тот факт, что традиционные методы обнаружения аэроаллергенов трудоемки, требуют много времени и специальных знаний. Данные по отбору проб воздуха с помощью современных методов предоставляют ценную информацию о воздействии аэроаллергенов.

Автоматизированные устройства, которые используются и находятся в стадии разработки, демонстрируют большой потенциал, но не готовы заменить существующие сети аэроаллергенов.

Таблица

МЕХАНИЗМЫ, ВЛИЯЮЩИХ НА МОРФОЛОГИЮ И СТРУКТУРУ СПОРОДЕРМЫ
ПЫЛЬЦЕВОГО ЗЕРНА В РЕЗУЛЬТАТЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

<i>Механизм действия</i>	<i>Авторы</i>
Прикрепление частиц загрязняющих веществ на поверхности пыльцевых зерен	45
Абсорбция атмосферных загрязняющих веществ на поверхности пыльцы	54
Подкисление поверхности пыльцы, усиливающая раздражение слизистой оболочки дыхательных путей	54
Повреждение оболочки, нарушение целостности пыльцы и большее высвобождение аллергенов в виде фрагментов пыльцевых зерен (субпыльцевые частицы, SPP)	13, 14, 16
Повреждение мембран стимулирует синтез факторов, связанных с восстановлением мембран, имеющих высокий аллергенный потенциал	16, 48,55
Изменения морфологии пыльцы	55
Изменения оболочки, приводящие к нарушению функции пыльцы	57, 52
Орбикуллы (тельца Убиша) переносят специфические пыльцевые антигены, ответственные за наличие аллергенной активности в атмосфере	58

Выводы

1. Выявлена существенная разница в палиморфологических характеристиках пыльцы, собранной непосредственно с растений и пыльцой из аэриобиологических образцов. Неидентифицированную, тератоморфную пыльцу из аэриобиологических образцов пунктов с различной степенью загрязненности классифицировали на 4 типа: 1) бесформенные комочки спорополленина с различными выростами, трещинами и кавернами, возникшие во время онтогенеза пыльцы; 2) нетипичная орнаментация скульптуры, например, крупные бугорки – вздутия с гладкой поверхностью; 3) нетипичная форма, но с частично сохранившейся скульптурой, где можно выделить видоспецифичные признаки и определить пыльцу до таксономического уровня; 4) конгломераты.

2. Изучение витальности (жизнеспособности) и поврежденности пыльцы ежи сборной под световым микроскопом из пунктов наблюдения с разной антропогенной нагрузкой показали зависимость указанных показателей от уровня загрязнителей: с их увеличением жизнеспособность убывает, хотя и остается довольно высокой. Интегральная оценка ферментативной активности пыльцы и степени ее поврежденности может применяться для целей биоэкологического мониторинга.

3. Загрязнители воздуха, изменение климата и системы земледелия (антропогенные факторы) влияют на морфологические и физические свойства поверхности пыльцы (агломерация частиц, деформация, перфорация, разрыв и скальпирование оболочки), в результате образуются субпыльцевые частицы и повышается биодоступность аллергенов, высвобождаемых в окружающую среду. При повышении относительной влажности аллергенную пыльцу также поражают и биологические агенты: бактерии и споры грибов, не зависимо от толщины оболочки.

Список литературы:

1. Prodić I., Minić R., Stojadinović M. The influence of environmental pollution on the allergenic potential of grass pollen // *Aerobiologia*. 2024. P. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10453-024-09829-7>

2. Sabo N. Č., Popović A., Đorđević D. Air pollution by pollen grains of anemophilous species: Influence of chemical and meteorological parameters // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2015. V. 226. P. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2549-5>
3. Magyar D., Krasznai B., Tóth M. D. Microscopic fungi and other contaminants on airborne pollen grains of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) // *Aerobiologia*. 2022. V. 38. №2. P. 217-231. <https://doi.org/10.1007/s10453-022-09743-w>
4. Oduber F., Calvo A. I., Blanco-Alegre C. D., Castro A., Vega-Maray A. M., Valencia-Barrera R. M., Fraile R. Links between recent trends in airborne pollen concentration, meteorological parameters and air pollutants // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. V. 264. P. 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.023>
5. Chehregani A., Majde A., Moin M., Gholami M., Shariatzadeh M. A., Nassiri H. Increasing allergy potency of Zinnia pollen grains in polluted areas // *Ecotoxicology and environmental safety*. 2004. V. 58. №2. P. 267-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2003.12.004>
6. Lu S., Ren J., Hao X., Liu D., Zhang R., Wu M., Wang Q. Characterization of protein expression of Platanus pollen following exposure to gaseous pollutants and vehicle exhaust particles // *Aerobiologia*. 2014. V. 30. P. 281-291. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9327-5>
7. Mousavi F., Shahali Y., Pourpak Z., Majd A., Ghahremaninejad F. Year-to-year variation of the elemental and allergenic contents of Ailanthus altissima pollen grains: an allergomic study // *Environmental monitoring and assessment*. 2019. V. 191. P. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7458-4>
8. Visez N., Ivanovsky A., Roose A., Gosselin S., Sénéchal H., Poncet P., Choël M. Atmospheric particulate matter adhesion onto pollen: a review // *Aerobiologia*. 2020. V. 36. P. 49-62. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09616-9>
9. Rezanejad F. A., Majd A., Shariatzadeh S. M. A., Moein M., Aminzadeh M., Mirzaeian M. Effect of air pollution on soluble proteins, structure and cellular material release in pollen of *Lagerstroemia indica* L.(Lytraceae) // *Acta Biologica Cracoviensia Botanica*. 2003. V. 45. №1. P. 129-132.
10. Azzazy M. Environmental impacts of industrial pollution on pollen morphology of *Eucalyptus globulus* Labill.(Myrtaceae) // *Journal of Applied Biology & Biotechnology*. 2016. V. 4. №05. P. 057-062. <https://doi.org/10.7324/JABB.2016.40509>
11. Galveias A., Costa A. R., Bortoli D., Alpizar-Jara R., Salgado R., Costa M. J., Antunes C. M. Cupressaceae pollen in the city of Évora, South of Portugal: Disruption of the pollen during air transport facilitates allergen exposure // *Forests*. 2021. V. 12. №1. P. 64. <https://doi.org/10.3390/f12010064>
12. Shahali Y., Pourpak Z., Moin M., Mari A., Majd A. Instability of the structure and allergenic protein content in Arizona cypress pollen // *Allergy*. 2009. V. 64. №12. P. 1773-1779. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2009.02064.x>
13. Motta A. C., Marliere M., Peltre G., Sterenberg P. A., Lacroix G. Traffic-related air pollutants induce the release of allergen-containing cytoplasmic granules from grass pollen // *International archives of allergy and immunology*. 2006. V. 139. №4. P. 294-298. <https://doi.org/10.1159/000091600>
14. Smiljanic K., Prodic I., Apostolovic D., Cvetkovic A., Veljovic D., Mutic J., Velickovic T. C. In-depth quantitative profiling of post-translational modifications of Timothy grass pollen allergome in relation to environmental oxidative stress // *Environment International*. 2019. V. 126. P. 644-658. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.001>

15. Baldacci S., Maio S., Cerrai S., Sarno G., Baiz N., Simoni M., Study H. E. Allergy and asthma: effects of the exposure to particulate matter and biological allergens // *Respiratory medicine*. 2015. V. 109. №9. P. 1089-1104. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2015.05.017>
16. Zhou S., Wang X., Lu S., Yao C., Zhang L., Rao L., Wang Q. Characterization of allergenicity of *Platanus* pollen allergen a 3 (Pla a 3) after exposure to NO₂ and O₃ // *Environmental Pollution*. 2021. V. 278. P. 116913. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116913>
17. Sénéchal H., Visez N., Charpin D., Shahali Y., Peltre G., Biolley J. P., Sutra J. P. A review of the effects of major atmospheric pollutants on pollen grains, pollen content, and allergenicity // *The Scientific World Journal*. 2015. V. 2015. №1. P. 940243. <https://doi.org/10.1155/2015/940243>
18. Kanter U., Heller W., Durner J., Winkler J. B., Engel M., Behrendt H., Ernst D. Molecular and immunological characterization of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen after exposure of the plants to elevated ozone over a whole growing season // *PLoS One*. 2013. V. 8. №4. P. e61518. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061518>
19. Depciuch J., Kasprzyk I., Roga E., Parlinska-Wojtan M. Analysis of morphological and molecular composition changes in allergenic *Artemisia vulgaris* L. pollen under traffic pollution using SEM and FTIR spectroscopy // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. V. 23. P. 23203-23214. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7554-8>
20. Pereira S., Fernández-González M., Guedes A., Abreu I., Ribeiro H. The strong and the stronger: The effects of increasing ozone and nitrogen dioxide concentrations in pollen of different forest species // *Forests*. 2021. V. 12. №1. P. 88. <https://doi.org/10.3390/f12010088>
21. Cuinica L. G., Abreu I., Gomes C. R., Esteves da Silva J. C. G. Exposure of *Betula pendula* Roth pollen to atmospheric pollutants CO, O₃ and SO₂ // *Grana*. 2013. V. 52. №4. P. 299-304. <https://doi.org/10.1080/00173134.2013.830145>
22. Reinmuth-Selzle K., Kampf C. J., Lucas K., LangYona, N., Fröhlich-Nowoisky J., Shiraiwa M., Pöschl, U. Air pollution and climate change effects on allergies in the anthropocene: abundance, interaction, and modification of allergens and adjuvants // *Environmental science & technology*. 2017. V. 51. №8. P. 4119-4141. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04908>
23. Franze T., Weller M. G., Niessner R., Pöschl U. Protein nitration by polluted air // *Environmental science & technology*. 2005. V. 39. №6. P. 1673-1678. <https://doi.org/10.1021/es0488737>
24. Zhu C., Farah J., Choël M., Gosselin S., Baroudi M., Petitprez D., Visez N. Uptake of ozone and modification of lipids in *Betula Pendula* pollen // *Environmental Pollution*. 2018. V. 242. P. 880-886. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.025>
25. Pukacki P. M., Chalupka W. Environmental pollution changes in membrane lipids, antioxidants and vitality of Scots pine [*Pinus sylvestris* L.] pollen // *Acta societatis botanicorum Poloniae*. 2003. V. 72. №2.
26. Sousa R., Duque L., Duarte A. J., Gomes C. R., Ribeiro H., Cruz A., Abreu I. In vitro exposure of *Acer negundo* pollen to atmospheric levels of SO₂ and NO₂: effects on allergenicity and germination // *Environmental science & technology*. 2012. V. 46. №4. P. 2406-2412. <https://doi.org/10.1021/es2034685>
27. Sinha M., Singh R. P., Kushwaha G. S., Iqbal N., Singh A., Kaushik S., Singh T. P. Current overview of allergens of plant pathogenesis related protein families // *The Scientific World Journal*. 2014. V. 2014. №1. P. 543195. <https://doi.org/10.1155/2014/543195>
28. Ribeiro H., Costa C., Abreu I., da Silva J. C. E. Effect of O₃ and NO₂ atmospheric pollutants on *Platanus x acerifolia* pollen: Immunochemical and spectroscopic analysis // *Science of the Total Environment*. 2017. V. 599. P. 291-297. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.206>

29. Alscher R. G., Donahue J. L., Cramer C. L. Reactive oxygen species and antioxidants: relationships in green cells // *Physiologia plantarum*. 1997. V. 100. №2. P. 224-233. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb04778.x>
30. Ackaert C., Kofler S., Horejs-Hoeck J., Zulehner N., Asam C., von Grafenstein S., Duschl A. The impact of nitration on the structure and immunogenicity of the major birch pollen allergen Bet v 1.0101 // *PloS one*. 2014. V. 9. №8. P. e104520. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104520>
31. Karle A. C., Oostingh G. J., Mutschlechner S., Ferreira F., Lackner P., Bohle B., Duschl A. Nitration of the pollen allergen bet v 1.0101 enhances the presentation of bet v 1-derived peptides by HLA-DR on human dendritic cells // *PLoS One*. 2012. V. 7. №2. P. e31483. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0031483>
32. Cuinica L. G., Abreu I., Gomes C. R., Esteves da Silva J. C. G. Exposure of *Betula pendula* Roth pollen to atmospheric pollutants CO, O₃ and SO₂ // *Grana*. 2013. V. 52. №4. P. 299-304. <https://doi.org/10.1080/00173134.2013.830145>
33. Depciuch J., Kasprzyk I., Roga E., Parlinska-Wojtan M. Analysis of morphological and molecular composition changes in allergenic *Artemisia vulgaris* L. pollen under traffic pollution using SEM and FTIR spectroscopy // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. V. 23. P. 23203-23214. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7554-8>
34. Grewling L., Fraczak A., Kostecki L., Nowak M., Szymanska A., Bogawski P. Biological and chemical air pollutants in an urban area of central Europe: Co-exposure assessment // *Aerosol and Air Quality Research*. 2019. V. 19. №7. P. 1526-1537. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.10.0365>
35. Reinmuth-Selzle K., Kampf C. J., Lucas K., Lang-Yona N., Fröhlich-Nowoisky J., Shiraiwa M., Pöschl U. Air pollution and climate change effects on allergies in the anthropocene: Abundance, interaction, and modification of allergens and adjuvants. *Environ. Sci. Technol*. 2017. 51. 4119–4141. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04908>
36. Majd A., Chehregani A., Moin M., Gholami M., Kohno S., Nabe T., Shariatzade M. A. The effects of air pollution on structures, proteins and allergenicity of pollen grains // *Aerobiologia*. 2004. V. 20. P. 111-118. <https://doi.org/10.1023/B:AERO.0000032950.12169.38>
37. Plaza M. P., Alcázar P., Oteros J., Galán C. Atmospheric pollutants and their association with olive and grass aeroallergen concentrations in Córdoba (Spain) // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. V. 27. P. 45447-45459. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10422-x>
38. Elagöz V., Manning W. J. Responses of sensitive and tolerant bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to ozone in open-top chambers are influenced by phenotypic differences, morphological characteristics, and the chamber environment // *Environmental Pollution*. 2005. V. 136. №3. P. 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.021>
39. Chichiriccò G., Picozzi P. Reversible inhibition of the pollen germination and the stigma penetration in *Crocus vernus* ssp. *vernus* (Iridaceae) following fumigations with NO₂, CO, and O₃ gases // *Plant Biology*. 2007. V. 9. №06. P. 730-735. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965246>
40. Darbah J. N., Kubiske M. E., Nelson N., Oksanen E., Vaapavuori E., Karnosky D. F. Impacts of elevated atmospheric CO₂ and O₃ on paper birch (*Betula papyrifera*): reproductive fitness // *The Scientific World Journal*. 2007. V. 7. №1. P. 240-246. <https://doi.org/10.1100/tsw.2007.42>
41. Wolters J. H. B., Martens M. J. M. Effects of air pollutants on pollen // *The Botanical Review*. 1987. V. 53. P. 372-414. <https://doi.org/10.1007/BF02858322>
42. Pasqualini S. et al. Ozone affects pollen viability and NAD (P) H oxidase release from *Ambrosia artemisiifolia* pollen // *Environmental Pollution*. – 2011. – T. 159. – №. 10. – C. 2823-2830. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.003>

43. Leghari S. K., Saeed S., Asrar M., Ahmed A., Tariq I., Marri A. A., Shawani N. A. Response of sweet cherry (*Prunus avium* L.) pollen grains to vehicular exhaust pollution at Quetta, Balochistan, Pakistan // *Applied Ecology & Environmental Research*. 2018. V. 16. №4.
44. Ziemianin M., Waga J., Czarnobilska E., Myszkowska D. Changes in qualitative and quantitative traits of birch (*Betula pendula*) pollen allergenic proteins in relation to the pollution contamination // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. V. 28. №29. P. 39952-39965. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13483-8>
45. Ouyang Y., Xu Z., Fan E., Li Y., Zhang L. Effect of nitrogen dioxide and sulfur dioxide on viability and morphology of oak pollen // *International forum of allergy & rhinology*. 2016. V. 6. №1. P. 95-100. <https://doi.org/10.1002/alr.21632>
46. Tashpulatov A. S., Clement P., Akimcheva S. A., Belogradova K. A., Barinova I., Rakhmawaty F. D., Touraev A. A model system to study the environment-dependent expression of the *Bet v 1a* gene encoding the major birch pollen allergen // *International archives of allergy and immunology*. 2004. V. 134. №1. P. 1-9. <https://doi.org/10.1159/000077527>
47. Overmyer K., Brosché M., Pellinen R., Kuitinen T., Tuominen H., Ahlfors R., Kangasjärvi J. Ozone-induced programmed cell death in the *Arabidopsis* radical-induced cell death1 mutant // *Plant Physiology*. 2005. V. 137. №3. P. 1092-1104. <https://doi.org/10.1104/pp.104.055681>
48. Bryce M., Drews O., Schenk M. F., Menzel A., Estrella N., Weichenmeier I., Traidl-Hoffmann C. Impact of urbanization on the proteome of birch pollen and its chemotactic activity on human granulocytes // *International archives of allergy and immunology*. 2009. V. 151. №1. P. 46-55. <https://doi.org/10.1159/000232570>
49. Chichiriccò G. Viability-germinability of *Crocus* (Iridaceae) pollen in relation to cyto- and ecophysiological factors // *Flora*. 2000. V. 195. №3. P. 193-199. [https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)30973-8](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)30973-8)
50. Roshchina V. V., Mel'nikova E. V. Pollen chemosensitivity to ozone and peroxides // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2001. V. 48. P. 74-83. <https://doi.org/10.1023/A:1009054732411>
51. Tiotiu A. I., Novakova P., Nedeva D., Chong-Neto H. J., Novakova S., Steiropoulos P., Kowal K. Impact of air pollution on asthma outcomes // *International journal of environmental research and public health*. 2020. V. 17. №17. P. 6212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176212>
52. Sedghy F., Varasteh A. R., Sankian M., Moghadam M. Interaction between air pollutants and pollen grains: the role on the rising trend in allergy // *Reports of biochemistry & molecular biology*. 2018. V. 6. №2. P. 219.
53. Guarnieri M., Balmes J. R. Outdoor air pollution and asthma // *The Lancet*. 2014. V. 383. №9928. P. 1581-1592. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60617-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60617-6)
54. Okuyama Y., Matsumoto K., Okochi H., Igawa M. Adsorption of air pollutants on the grain surface of Japanese cedar pollen // *Atmospheric Environment*. 2007. V. 41. №2. P. 253-260. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.009>
55. Wang Q., Gong X., Nakamura S., Kurihara K., Suzuki M., Sakamoto K., Lu S. Air pollutant deposition effect and morphological change of *Cryptomeria japonica* pollen during its transport in urban and mountainous areas of Japan // *Environmental Health Risk V, Biomedicine and Health*. 2009. V. 14. P. 77-89.
56. Wang W. J., He H. S., Thompson III F. R., Spetich M. A., Fraser J. S. Effects of species biological traits and environmental heterogeneity on simulated tree species distribution shifts under climate change // *Science of the Total Environment*. 2018. V. 634. P. 1214-1221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.353>

57. Lu S., Yao C., Zhou S., Lin Y., Zhang L., Zeng J., Wang Q. Studies on relationships between air pollutants and allergenicity of *Humulus Scandens* pollen collected from different areas of Shanghai // *Journal of Environmental Sciences*. 2020. V. 95. P. 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.037>
58. D'Amato G., Murrieta-Aguttes M., D'Amato M., Ansotegui I. J. Pollen respiratory allergy: Is it really seasonal? // *World Allergy Organization Journal*. 2023. V. 16. №7. P. 100799. <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2023.100799>
59. De Weger L. A., Verbeek C., Markey E., O'Connor D. J., Gosling W. D. Greater difference between airborne and flower pollen chemistry, than between pollen collected across a pollution gradient in the Netherlands // *Science of The Total Environment*. 2024. V. 934. P. 172963.
60. Romero-Guzmán E. T., Reyes-Gutiérrez L. R., Romero-Guzmán L., Hernández-Mendoza H., Uría-Gómez L. C., Gutiérrez-Reyes J. An overview of bioaerosols suspended in the atmosphere of Metropolitan Zone of Toluca Valley // *Journal of the Mexican Chemical Society*. 2021. V. 65. №2. P. 214-224.

References:

1. Prodić, I., Minić, R., & Stojadinović, M. (2024). The influence of environmental pollution on the allergenic potential of grass pollen. *Aerobiologia*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10453-024-09829-7>
2. Sabo, N. Č., Popović, A., & Đorđević, D. (2015). Air pollution by pollen grains of anemophilous species: Influence of chemical and meteorological parameters. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2549-5>
3. Magyar, D., Krasznai, B., & Tóth, M. D. (2022). Microscopic fungi and other contaminants on airborne pollen grains of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.). *Aerobiologia*, 38(2), 217-231. <https://doi.org/10.1007/s10453-022-09743-w>
4. Oduber, F., Calvo, A. I., Blanco-Alegre, C. D., Castro, A., Vega-Maray, A. M., Valencia-Barrera, R. M., ... & Fraile, R. (2019). Links between recent trends in airborne pollen concentration, meteorological parameters and air pollutants. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264, 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.023>
5. Chehregani, A., Majde, A., Moin, M., Gholami, M., Shariatzadeh, M. A., & Nassiri, H. (2004). Increasing allergy potency of *Zinnia* pollen grains in polluted areas. *Ecotoxicology and environmental safety*, 58(2), 267-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2003.12.004>
6. Lu, S., Ren, J., Hao, X., Liu, D., Zhang, R., Wu, M., ... & Wang, Q. (2014). Characterization of protein expression of *Platanus* pollen following exposure to gaseous pollutants and vehicle exhaust particles. *Aerobiologia*, 30, 281-291. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9327-5>
7. Mousavi, F., Shahali, Y., Pourpak, Z., Majd, A., & Ghahremaninejad, F. (2019). Year-to-year variation of the elemental and allergenic contents of *Ailanthus altissima* pollen grains: an allergomic study. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7458-4>
8. Visez, N., Ivanovsky, A., Roose, A., Gosselin, S., Sénéchal, H., Poncet, P., & Choël, M. (2020). Atmospheric particulate matter adhesion onto pollen: a review. *Aerobiologia*, 36, 49-62. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09616-9>
9. Rezanejad, F. A., Majd, A., Shariatzadeh, S. M. A., Moein, M., Aminzadeh, M., & Mirzaeian, M. (2003). Effect of air pollution on soluble proteins, structure and cellular material release in pollen of *Lagerstroemia indica* L.(Lytraceae). *Acta Biologica Cracoviensia Botanica*, 45(1), 129-132.

10. Azzazy, M. (2016). Environmental impacts of industrial pollution on pollen morphology of *Eucalyptus globulus* Labill.(Myrtaceae). *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 4(05), 057-062. <https://doi.org/10.7324/JABB.2016.40509>
11. Galveias, A., Costa, A. R., Bortoli, D., Alpizar-Jara, R., Salgado, R., Costa, M. J., & Antunes, C. M. (2021). Cupressaceae pollen in the city of Évora, South of Portugal: Disruption of the pollen during air transport facilitates allergen exposure. *Forests*, 12(1), 64. <https://doi.org/10.3390/f12010064>
12. Shahali, Y., Pourpak, Z., Moin, M., Mari, A., & Majd, A. (2009). Instability of the structure and allergenic protein content in Arizona cypress pollen. *Allergy*, 64(12), 1773-1779. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2009.02064.x>
13. Motta, A. C., Marliere, M., Peltre, G., Sterenberg, P. A., & Lacroix, G. (2006). Traffic-related air pollutants induce the release of allergen-containing cytoplasmic granules from grass pollen. *International archives of allergy and immunology*, 139(4), 294-298. <https://doi.org/10.1159/000091600>
14. Smiljanic, K., Prodic, I., Apostolovic, D., Cvetkovic, A., Veljovic, D., Mutic, J., ... & Velickovic, T. C. (2019). In-depth quantitative profiling of post-translational modifications of Timothy grass pollen allergome in relation to environmental oxidative stress. *Environment International*, 126, 644-658. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.001>
15. Baldacci, S., Maio, S., Cerrai, S., Sarno, G., Baiz, N., Simoni, M., ... & Study, H. E. (2015). Allergy and asthma: effects of the exposure to particulate matter and biological allergens. *Respiratory medicine*, 109(9), 1089-1104. <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2015.05.017>
16. Zhou, S., Wang, X., Lu, S., Yao, C., Zhang, L., Rao, L., ... & Wang, Q. (2021). Characterization of allergenicity of *Platanus* pollen allergen a 3 (Pla a 3) after exposure to NO₂ and O₃. *Environmental Pollution*, 278, 116913. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116913>
17. Sénéchal, H., Visez, N., Charpin, D., Shahali, Y., Peltre, G., Biolley, J. P., ... & Sutra, J. P. (2015). A review of the effects of major atmospheric pollutants on pollen grains, pollen content, and allergenicity. *The Scientific World Journal*, 2015(1), 940243. <https://doi.org/10.1155/2015/940243>
18. Kanter, U., Heller, W., Durner, J., Winkler, J. B., Engel, M., Behrendt, H., ... & Ernst, D. (2013). Molecular and immunological characterization of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen after exposure of the plants to elevated ozone over a whole growing season. *PLoS One*, 8(4), e61518. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0061518>
19. Depciuch, J., Kasprzyk, I., Roga, E., & Parlinska-Wojtan, M. (2016). Analysis of morphological and molecular composition changes in allergenic *Artemisia vulgaris* L. pollen under traffic pollution using SEM and FTIR spectroscopy. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 23203-23214. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7554-8>
20. Pereira, S., Fernández-González, M., Guedes, A., Abreu, I., & Ribeiro, H. (2021). The strong and the stronger: The effects of increasing ozone and nitrogen dioxide concentrations in pollen of different forest species. *Forests*, 12(1), 88. <https://doi.org/10.3390/f12010088>
21. Cuinica, L. G., Abreu, I., Gomes, C. R., & Esteves da Silva, J. C. G. (2013). Exposure of *Betula pendula* Roth pollen to atmospheric pollutants CO, O₃ and SO₂. *Grana*, 52(4), 299-304. <https://doi.org/10.1080/00173134.2013.830145>
22. Reinmuth-Selzle, K., Kampf, C. J., Lucas, K., Lang-Yona, N., Fröhlich-Nowoisky, J., Shiraiwa, M., ... & Pöschl, U. (2017). Air pollution and climate change effects on allergies in the anthropocene: abundance, interaction, and modification of allergens and adjuvants. *Environmental science & technology*, 51(8), 4119-4141. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04908>
23. Franze, T., Weller, M. G., Niessner, R., & Pöschl, U. (2005). Protein nitration by polluted air. *Environmental science & technology*, 39(6), 1673-1678. <https://doi.org/10.1021/es0488737>

24. Zhu, C., Farah, J., Choël, M., Gosselin, S., Baroudi, M., Petitprez, D., & Visez, N. (2018). Uptake of ozone and modification of lipids in *Betula Pendula* pollen. *Environmental Pollution*, 242, 880-886. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.025>
25. Pukacki, P. M., & Chalupka, W. (2003). Environmental pollution changes in membrane lipids, antioxidants and vitality of Scots pine [*Pinus sylvestris* L.] pollen. *Acta societatis botanicorum Poloniae*, 72(2).
26. Sousa, R., Duque, L., Duarte, A. J., Gomes, C. R., Ribeiro, H., Cruz, A., ... & Abreu, I. (2012). In vitro exposure of *Acer negundo* pollen to atmospheric levels of SO₂ and NO₂: effects on allergenicity and germination. *Environmental science & technology*, 46(4), 2406-2412. <https://doi.org/10.1021/es2034685>
27. Sinha, M., Singh, R. P., Kushwaha, G. S., Iqbal, N., Singh, A., Kaushik, S., ... & Singh, T. P. (2014). Current overview of allergens of plant pathogenesis related protein families. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 543195. <https://doi.org/10.1155/2014/543195>
28. Ribeiro, H., Costa, C., Abreu, I., & da Silva, J. C. E. (2017). Effect of O₃ and NO₂ atmospheric pollutants on *Platanus x acerifolia* pollen: Immunochemical and spectroscopic analysis. *Science of the Total Environment*, 599, 291-297. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.206>
29. Alscher, R. G., Donahue, J. L., & Cramer, C. L. (1997). Reactive oxygen species and antioxidants: relationships in green cells. *Physiologia plantarum*, 100(2), 224-233. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb04778.x>
30. Ackaert, C., Kofler, S., Horejs-Hoek, J., Zulehner, N., Asam, C., von Grafenstein, S., ... & Duschl, A. (2014). The impact of nitration on the structure and immunogenicity of the major birch pollen allergen Bet v 1.0101. *PloS one*, 9(8), e104520. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104520>
31. Karle, A. C., Oostingh, G. J., Mutschlechner, S., Ferreira, F., Lackner, P., Bohle, B., ... & Duschl, A. (2012). Nitration of the pollen allergen bet v 1.0101 enhances the presentation of bet v 1-derived peptides by HLA-DR on human dendritic cells. *PLoS One*, 7(2), e31483. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0031483>
32. Cuinica, L. G., Abreu, I., Gomes, C. R., & Esteves da Silva, J. C. G. (2013). Exposure of *Betula pendula* Roth pollen to atmospheric pollutants CO, O₃ and SO₂. *Grana*, 52(4), 299-304. <https://doi.org/10.1080/00173134.2013.830145>
33. Depciuch, J., Kasprzyk, I., Roga, E., & Parlinska-Wojtan, M. (2016). Analysis of morphological and molecular composition changes in allergenic *Artemisia vulgaris* L. pollen under traffic pollution using SEM and FTIR spectroscopy. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 23203-23214. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7554-8>
34. Grewling, L., Fraczak, A., Kostecki, L., Nowak, M., Szymanska, A., & Bogawski, P. (2019). Biological and chemical air pollutants in an urban area of central Europe: Co-exposure assessment. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(7), 1526-1537. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.10.0365>
35. Reinmuth-Selzle, K., Kampf, C. J., Lucas, K., Lang-Yona, N., Fröhlich-Nowoisky, J., Shiraiwa, M., ... & Pöschl, U. (2017). Air pollution and climate change effects on allergies in the anthropocene: abundance, interaction, and modification of allergens and adjuvants. *Environmental science & technology*, 51(8), 4119-4141. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04908>
36. Majd, A., Chehregani, A., Moin, M., Gholami, M., Kohno, S., Nabe, T., & Shariatzade, M. A. (2004). The effects of air pollution on structures, proteins and allergenicity of pollen grains. *Aerobiologia*, 20, 111-118. <https://doi.org/10.1023/B:AERO.0000032950.12169.38>

37. Plaza, M. P., Alcázar, P., Oteros, J., & Galán, C. (2020). Atmospheric pollutants and their association with olive and grass aeroallergen concentrations in Córdoba (Spain). *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 45447-45459. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10422-x>
38. Elagöz, V., & Manning, W. J. (2005). Responses of sensitive and tolerant bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to ozone in open-top chambers are influenced by phenotypic differences, morphological characteristics, and the chamber environment. *Environmental Pollution*, 136(3), 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.021>
39. Chichiriccò, G., & Picozzi, P. (2007). Reversible inhibition of the pollen germination and the stigma penetration in *Crocus vernus* ssp. *vernus* (Iridaceae) following fumigations with NO₂, CO, and O₃ gases. *Plant Biology*, 9(06), 730-735. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965246>
40. Darbah, J. N., Kubiske, M. E., Nelson, N., Oksanen, E., Vaapavuori, E., & Karnosky, D. F. (2007). Impacts of elevated atmospheric CO₂ and O₃ on paper birch (*Betula papyrifera*): reproductive fitness. *The Scientific World Journal*, 7(1), 240-246. <https://doi.org/10.1100/tsw.2007.42>
41. Wolters, J. H. B., & Martens, M. J. M. (1987). Effects of air pollutants on pollen. *The Botanical Review*, 53, 372-414. <https://doi.org/10.1007/BF02858322>
42. Pasqualini, S., Tedeschini, E., Frenguelli, G., Wopfner, N., Ferreira, F., D'Amato, G., & Ederli, L. (2011). Ozone affects pollen viability and NAD (P) H oxidase release from *Ambrosia artemisiifolia* pollen. *Environmental Pollution*, 159(10), 2823-2830. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.003>
43. Leghari, S. K., Saeed, S., Asrar, M., Ahmed, A., Tariq, I., Marri, A. A., ... & Shawani, N. A. (2018). Response of sweet cherry (*Prunus avium* L.) pollen grains to vehicular exhaust pollution at Quetta, Balochistan, Pakistan. *Applied Ecology & Environmental Research*, 16(4).
44. Ziemianin, M., Waga, J., Czarnobilska, E., & Myszkowska, D. (2021). Changes in qualitative and quantitative traits of birch (*Betula pendula*) pollen allergenic proteins in relation to the pollution contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(29), 39952-39965. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13483-8>
45. Ouyang, Y., Xu, Z., Fan, E., Li, Y., & Zhang, L. (2016, January). Effect of nitrogen dioxide and sulfur dioxide on viability and morphology of oak pollen. In *International forum of allergy & rhinology* (Vol. 6, No. 1, pp. 95-100). <https://doi.org/10.1002/alr.21632>
46. Tashpulatov, A. S., Clement, P., Akimcheva, S. A., Belogradova, K. A., Barinova, I., Rakhmawaty, F. D., ... & Touraev, A. (2004). A model system to study the environment-dependent expression of the *Bet v 1a* gene encoding the major birch pollen allergen. *International archives of allergy and immunology*, 134(1), 1-9. <https://doi.org/10.1159/000077527>
47. Overmyer, K., Brosché, M., Pellinen, R., Kuittinen, T., Tuominen, H., Ahlfors, R., ... & Kangasjärvi, J. (2005). Ozone-induced programmed cell death in the *Arabidopsis* radical-induced cell death1 mutant. *Plant Physiology*, 137(3), 1092-1104. <https://doi.org/10.1104/pp.104.055681>
48. Bryce, M., Drews, O., Schenk, M. F., Menzel, A., Estrella, N., Weichenmeier, I., ... & Traidl-Hoffmann, C. (2009). Impact of urbanization on the proteome of birch pollen and its chemotactic activity on human granulocytes. *International archives of allergy and immunology*, 151(1), 46-55. <https://doi.org/10.1159/000232570>
49. Chichiriccò, G. (2000). Viability-germinability of *Crocus* (Iridaceae) pollen in relation to cyto-and ecophysiological factors. *Flora*, 195(3), 193-199. [https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)30973-8](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)30973-8)
50. Roshchina, V. V., & Mel'nikova, E. V. (2001). Pollen chemosensitivity to ozone and peroxides. *Russian Journal of Plant Physiology*, 48, 74-83. <https://doi.org/10.1023/A:1009054732411>

51. Tiotiu, A. I., Novakova, P., Nedeva, D., Chong-Neto, H. J., Novakova, S., Steiropoulos, P., & Kowal, K. (2020). Impact of air pollution on asthma outcomes. *International journal of environmental research and public health*, 17(17), 6212. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176212>
52. Sedghy, F., Varasteh, A. R., Sankian, M., & Moghadam, M. (2018). Interaction between air pollutants and pollen grains: the role on the rising trend in allergy. *Reports of biochemistry & molecular biology*, 6(2), 219.
53. Guarnieri, M., & Balmes, J. R. (2014). Outdoor air pollution and asthma. *The Lancet*, 383(9928), 1581-1592. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60617-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60617-6)
54. Okuyama, Y., Matsumoto, K., Okochi, H., & Igawa, M. (2007). Adsorption of air pollutants on the grain surface of Japanese cedar pollen. *Atmospheric Environment*, 41(2), 253-260. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.009>
55. Wang, Q., Gong, X., Nakamura, S., Kurihara, K., Suzuki, M., Sakamoto, K., ... & Lu, S. (2009). Air pollutant deposition effect and morphological change of *Cryptomeria japonica* pollen during its transport in urban and mountainous areas of Japan. *Environmental Health Risk V, Biomedicine and Health*, 14, 77-89.
56. Wang, W. J., He, H. S., Thompson III, F. R., Spetich, M. A., & Fraser, J. S. (2018). Effects of species biological traits and environmental heterogeneity on simulated tree species distribution shifts under climate change. *Science of the Total Environment*, 634, 1214-1221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.353>
57. Lu, S., Yao, C., Zhou, S., Lin, Y., Zhang, L., Zeng, J., ... & Wang, Q. (2020). Studies on relationships between air pollutants and allergenicity of *Humulus Scandens* pollen collected from different areas of Shanghai. *Journal of Environmental Sciences*, 95, 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.037>
58. D'Amato, G., Murrieta-Aguttes, M., D'Amato, M., & Ansotegui, I. J. (2023). Pollen respiratory allergy: Is it really seasonal?. *World Allergy Organization Journal*, 16(7), 100799. <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2023.100799>
59. De Weger, L. A., Verbeek, C., Markey, E., O'Connor, D. J., & Gosling, W. D. (2024). Greater difference between airborne and flower pollen chemistry, than between pollen collected across a pollution gradient in the Netherlands. *Science of The Total Environment*, 934, 172963.
60. Romero-Guzmán, E. T., Reyes-Gutiérrez, L. R., Romero-Guzmán, L., Hernández-Mendoza, H., Uría-Gómez, L. C., & Gutiérrez-Reyes, J. (2021). An overview of bioaerosols suspended in the atmosphere of Metropolitan Zone of Toluca Valley. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 65(2), 214-224.

Работа поступила
в редакцию 07.08.2024 г.

Принята к публикации
14.08.2024 г.

Ссылка для цитирования:

Кобзарь В. Н. Морфологические изменения аллергенной пыльцы как биоиндикатор // Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10. №9. С. 23-43. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/106/03>

Cite as (APA):

Kobzar, V. (2024). Morphological Changes in Allergenic Pollen as a Bioindicator. *Bulletin of Science and Practice*, 10(9), 23-43. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/106/03>