

Л. М. Шевчук¹, Т. Д. Гриценко², С. М. Соколов²,
И. А. Просвирякова², А. Н. Ганькин², А. Е. Пшегрода², И. С. Позняк²

АЭРОПАЛИНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ СОДЕРЖАНИЯ ПЫЛЬЦЕВЫХ И СПОРОВЫХ АЛЛЕРГЕНОВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ

УО «Белорусский государственный медицинский университет»,¹
РУП «Научно-практический центр гигиены»²

В статье представлены данные, характеризующие процессы переноса пыльцы растений и спор грибов в приземном слое атмосферы, и установлены общие закономерности переноса пыльцы и суточная динамика пыления в атмосферном воздухе города Минска. Исследование проведено с помощью стационарной пыльцевой ловушки Буркарда и седиментационных пыльцевых ловушек. Проведена оценка влияния метеорологических условий на перенос пыльцы. Данные мониторинга с помощью седиментационных ловушек пыльцы, расставленных по территории г. Минска, и данные компьютерного моделирования переноса пыльцы показали, что состав и концентрация пыльцы в аэрозолях существенно меняются в разных районах города. Региональная составляющая пыльцы меняется в пределах 20–60 % в составе «пыльцевого дождя» в разных точках города и при разных погодных условиях. Компьютерное моделирование состояния атмосферного воздуха города Минска осуществлялось на карте города с учетом лесопарковых зон, посадок во дворах и вдоль улиц, месторасположения ТЭЦ, основных потоков транспорта. В ходе моделирования состояния атмосферного воздуха были установлены существенные различия в составе и концентрации пыльцы, а также техногенных компонентов для разных точек города.

Ключевые слова: пыльца растений, споры грибов, перенос пыльцы, аэропалинологический прогноз.

**L. M. Shevchuk, T. D. Gritsenko, S. M. Sokolov,
I. A. Prosviryakova, A. N. Gankin, A. E. Pshegroda, I. S. Poznyak**

AEROPALYNOLOGICAL FORECAST OF THE CONTENT OF POLLEN AND SPORAL ALLERGENS IN THE ATMOSPHERIC AIR OF POPULATED AREAS

The article presents data the processes of pollen transfer of plants and fungal spores in the surface layer of the atmosphere, pollen transfer and daily dynamics of dusting in the atmospheric air of the city of Minsk. The study was conducted with the using of the stationary Burkard pollen traps and pollen sedimentation traps. Monitoring data using pollen sedimentation traps and data from computer simulations of pollen transport have shown that the composition and concentration of pollen in aerosols change significantly in different areas of the city. The regional component of pollen varies within 20–60 % in the composition of «pollen rain» in different points of the city and under different weather conditions. Computer modeling of the atmospheric air condition of Minsk taking into account forested areas, landings in courtyards and along streets, the location of the thermal power plant, and the main traffic. Significant differences were found in the composition and concentration of pollen, as well as technogenic components for different points of the city.

Key words: pollen, spores of fungi, the transfer of pollen aeropalynology forecast.

Изучение «пыльцевого дождя» – совокупности пыльцы и спор, циркулирующих в атмосфере, привлекает в последние десятилетия специалистов самого различного профиля. Контроль качественного и количественного состава «пыльцевого дождя», закономерности его формирования, особенности сезонной и суточ-

ной динамики пыления отдельных таксонов, роль пыльцевых зерен в формировании и развитии полинозов – вот далеко не полный перечень вопросов требующих своего решения. Указанное в значительной мере связано с проблемой мониторинга аэропалинологического состояния атмосферы.

Целью настоящих исследований явилось определение закономерности формирования палинологической характеристики атмосферного воздуха и разработки на этой основе аэропалинологического прогноза. Задача указанного прогноза сложна. Среди основных ее составляющих можно выделить глобальный, континентальный, трансграничный, региональный и локальный факторы переноса пыльцы. К региональным источникам относятся в основном лесные и сельскохозяйственные территории районного масштаба, а к локальным – лесопарковые зоны внутри городской черты и пригородной зоны. Влияние локальных источников на формирование аллергенной обстановки в населенных пунктах велико [1].

Результаты и обсуждение

Так, ежедневный мониторинг содержания спор и пыльцы в воздушном бассейне г. Минска, проведенный с использованием волюметрического пыльцеуловителя и стационарной ловушки Буркарда, установленных на станции мониторинга, показал, что пыление древесных пород в первой декаде марта не началось, поскольку образцы не содержат спорово-пыльцевого материала. Первые пыльцевые зерна начали отмечать только 31 марта, это были отдельные пыльцевые зерна ольхи – 1–2 зерна. Начиная с 2 апреля, пыльцевые зерна ольхи и лещины появляются регулярно, а 12–13 апреля отмечены высокие концентрации ольхи (свыше 500 пыльцевых зерен в 1 м³ воздуха за сутки). Средние концентрации лещины отмечены с 13 по 15 апреля. С 18 апреля отмечен рост концентраций пыльцевых зерен тополя (тополь дрожащий или осина) и убывание концентраций ольхи и лещины; пыльца трав еще не отмечена. Максимальные содержания пыльцы тополя в воздухе отмечены с 21 по 23 апреля (21 апреля – более 500 пыльцевых зерен в 1 м³ воздуха). С 23 по 26 апреля наблюдались высокие концентрации пыльцы ивы (более 170 пыльцевых зерен 1 м³). С 23 апреля началось пыление березы, сразу отмечались ее высокие концентрации (от 100 до 1000 пыльцевых зерен в 1 м³), которые достигали максимальных значений 29 апреля, а 4 и 5 мая в образцах отмечено более 10000 пыльцевых зерен в 1 м³. Такие концентрации отмечены нами впервые с 2012 года, когда начались наблюдения. Следует отметить, что практически с 25 апреля по 12 мая пыльца березы присутствовала в воздухе в огромных количествах – «пыльцевой смог». В ходе анализа аэропалиноло-

гической ситуации Международной базы данных European Aeroallergen Network Pollen Database (Европейская аэроаллергенная сеть пыльцевой базы данных) установили, что по всей Европе в это время также отмечены высокие уровни пыльцы березы в воздухе. Сложившуюся ситуацию можно объяснить тем, что в Минске, как и на большей территории Беларуси, при холодных ветрах восточного направления, высоком давлении и ясной погоде сложилась уникальная ситуация, когда пыльца березы не вымывалась дождями, не поднималась с теплыми потоками воздуха в верхние слои атмосферы, а «зависала» в приземном слое воздуха. Оседая на поверхность асфальта, домов и различных промышленных объектах, она снова поднималась в воздух уже с частицами грязи, в этом «пыльцевом смоге» Минск находился около двух недель. После прошедших дождей с 14 мая, пыльца березы в воздухе стала убывать, но еще сохранялись ее высокие концентрации, за счет повторного вовлечения пыльцы в воздушные потоки. Анализ пыльцевой пленки на поверхности дождевых луж показал, что в основном из воздуха вымывается пыльца ели (15 мая) и сосны (21 мая). Пыльца этих древесных пород появилась во второй половине мая. Пыление ели закончилось, а сосны только начинались.

В конце мая отмечен пик пыления сосны. Максимальные содержания ее пыльцы в воздухе отмечены 23 мая и 5 июня, при этом следует отметить, что в конце мая – начале июня шли дожди. Пыление сосны растянулось почти на месяц, фенологические наблюдения показали, что пыление сосны было обильным, но не было одновременным. Дожди быстро вымывали пыльцу из атмосферы, анализ пыльцевой пленки на лужах показал полное преобладание пыльцы сосны. Продолжалось цветение деревьев и кустарников семейства Розоцветных.

Пыльца березы, ели, ольхи отмечалась единично – эти деревья и кустарники закончили свое цветение в мае, но пыльца их попадала повторно в воздушные потоки. С 14 мая отмечено появление растительного пуха, который фиксировался на ловушке ежедневно, несмотря на дождь. В начале июня отмечали появление пыльцы злаков и подорожника. На фоне пуха, который царапает и раздражает слизистую, реакция на аллергенную пыльцу злаков и подорожника у человека может усиливаться. Появляются споры и конидии грибов. В основном это конидии кладоспория,

альтернари, мучнисто-росяных грибов, эциоспоры грибов ржавчины, споры различных семейств сумчатых грибов.

Пух фиксировался на ловушке ежедневно по 7 июля, несмотря на дождь. Пик пыления злаков, подорожника и крапивы отмечен в июле. В больших количествах отмечены споры и конидии грибов, в основном это конидии кладоспория, альтернари, мучнисто-росяных грибов, споры грибов ржавчины, споры различных семейств сумчатых грибов.

В конце июля началось активное пыление трав – пыление полыни, которое продолжалось до августа, включительно. Содержание полыни колебалось от средних (до 100 пыльцевых зерен в м³ воздуха) до высоких уровней (от 101–1000 пыльцевых зерен в м³ воздуха). Продолжается активно начатое пыление крапивы, ее пыльца фиксируется на ловушках на разных уровнях – от средних, до высоких. Единично на ловушках регистрируются пыльцевые зерна лебедеи, злаков и подорожника.

Август – начало сентября характеризуется обилием спор грибов в атмосферном аэрозоле. Отмечаются споры мучнисто-росяных грибов, споры грибов ржавчины, споры различных семейств сумчатых грибов. Встречаются пыльцевые зерна трав, иногда отмечаются переотложенные пыльцевые зерна древесных культур.

Следует отметить, что помимо погодных условий, на количественное содержание в атмосферном воздухе пыльцы растений и спор грибов оказывает время суток. Так, известно, что пыльца ветроопыляемых цветков рассыпается только в благоприятную погоду, обычно относительно сухую, в определенное время суток. Пыльцевая продуктивность на один пыльник составляла 20 000 ± 6000, а на цветок – 160 000 пыльцевых зерен, 99 % этого количества пыльцы переносится воздушным потоком. Растрескивание пыльника, вызывающее высвобождение пыльцы, происходит между 10 и 13 часами, наиболее обычный максимум – между 10.30 и 11.30, утренний дождь вызывает задержку рассеивания пыльцы. Содержание пыльцы в воздухе меняется, подчиняясь циркадным ритмам и зависят от времени вскрывания пыльников. Наибольшая концентрация приходится на время от 10 до 14 часов с пиком в 11–12 часов. При проведении сопоставления полученных графиков пыления изучаемых таксонов с графиками суточной температуры и влажности было установлено, что наибольшее количество спор грибов наблюдается при высоких

среднесуточных температурах и максимальной влажности. В отношении пыльцы трав, деревьев и кустарников установлена другая зависимость – наибольшее количество пыльцы растений наблюдается при высоких среднесуточных температурах и низкой влажности.

Процессы переноса пыльцы. Пыльца растений переносится в приземном слое атмосферы на высоте десятков метров и лишь при большой турбулентности ветрового потока может быть поднята на большие высоты. Поэтому закономерности переноса пыльцы могут быть описаны количественно с помощью уравнений динамики приземного слоя атмосферы [2, 3].

$$Q_{(x,y)} = \Theta_0 \sum_{i=1}^N \frac{1}{(x-x_i)} \exp\left(-\frac{2x_{\max}}{x-x_i} - \frac{(y-y_i)^2}{2\varphi^2(x-x_i)^2}\right), (1)$$

$$\Theta_0 = \frac{M_0}{(1+n)k_1\varphi\sqrt{2\pi}}, \quad X_{\max} = \frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 k_1}, (2)$$

Здесь M_0 – эмиссия пыльцы с единицы площади, φ – дисперсия направления ветра за время наблюдения, u_1 – скорость ветра, k_1 – коэффициент вертикального турбулентного обмена, H – эффективная высота источника, $n = 0, 1, 2...$ Суммирование ведется по всем i ($i = 1 \dots N$) источникам, расположенным на данной площади. Использование обобщенных параметров Θ_0 и X_{\max} по формулам (2) существенно упрощает расчеты формулы (1), определяющей плотность выпадения пыльцевого дождя.

Распространение пыльцы подчиняется определенным закономерностям. На рисунке 1 показана рассчитанная кривая плотности выпадения «пыльцевого дождя» от локального источника при разной скорости ветра (1 и 3 м/сек).

Из рисунка 1 видно, что максимальная плотность пыльцы отмечается не под кроной данного

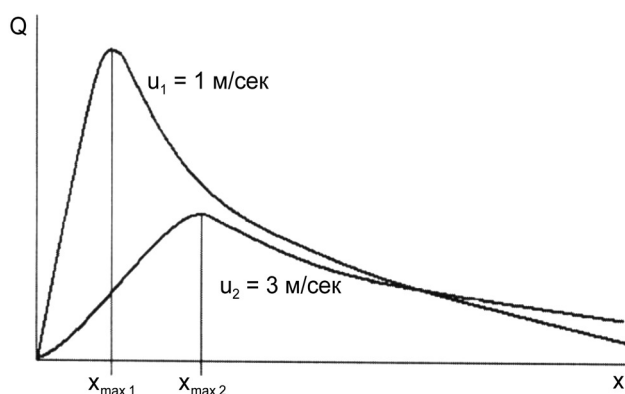


Рисунок 1. Рассчитанная кривая выпадения пыльцы при скорости ветра 1 и 3 м/сек

дерева, а на расстоянии X_{\max} , определяемом по формуле (2). Величина X_{\max} зависит от скорости ветра и эффективной высоты источника пыления (H) и составляет обычно 15–20 Н. Распространение пыльцы растений носит экспоненциальный характер, поэтому расстояние переноса пыльцы может быть количественно описано параметром $x_{0,5}$, которое соответствует расстоянию, при котором плотность пыльцевого дождя составляет половину максимальной плотности.

Установлено, что удаленное расстояние, на котором плотность «пыльцевого дождя» понизится до минимального уровня, составляющего 1 % от относительно максимальной концентрации, будет $x_{0,01} = 6,65 x_{0,5}$.

В связи с разной эффективной высотой (H) деревьев, кустарников и трав, перенос пыльцы осуществляется на разные расстояния. Сравнение экспериментальных и рассчитанных данных показывает [4], что для березы $x_{0,5}$ составляет около 0,5 км, а $x_{0,01}$ – приблизительно 3,5 км. Для прутняка семейства маревых $x_{0,5}$ составляет порядка 15 м, а $x_{0,01}$ – порядка 100 м. Эти оценки дальности переноса пыльцы обосновывают преимущественное влияние локального фактора. Региональный фактор переноса пыльцы также оказывает влияние, так как в районах, прилегающих к городской черте, сосредоточены крупные лесные массивы.

Влияние метеорологических условий на перенос пыльцы. Перенос пыльцы определяется метеорологическими условиями, кроме таких очевидных факторов, как направление и скорость ветра, на перенос пыльцы влияют влажность, наличие осадков, время суток, облачность и другие параметры. Повышенная влажность сокращает расстояние переноса, так как пыльца хорошо поглощает влагу и существенно утяжеляется. Прямые осадки в виде дождя вообще приостанавливают процесс переноса. Облачность и время суток также влияют на концентрацию пыльцы в составе аэрозолей. Результаты наблюдений показывают, что суточная динамика пыления полыни может быть описана уравнение [5]:

$$y = a + b \times \sin(0,27x + 5), \quad (3)$$

где y – концентрация пыльцы, x – время суток, b – коэффициент амплитуды колебаний концентрации пыльцы, a – коэффициент, связанный с b и сдвигающий синусоиду в область положительных значений функции.

Максимум этой синусоидальной функции приходится на 9–11 часов утра, а минимум отмечает с 21 часа до 5 часов утра.

Определение сроков пыления. Прогнозирование начала пыления является наиболее трудной задачей, так как сроки пыления напрямую зависят от климатических, сезонных и метеорологических условий. При резком потеплении в условиях солнечной погоды всплеск пыления может наступить в течение суток. Тем не менее, существуют методы определения сроков начала пыления. В первую очередь, для определения готовности данного вида к пылению применим метод фенологических наблюдений за фазами формирования листы и раскрытия пыльников. Другой подход основан на анализе данных аэропалинологического мониторинга. За сутки или двое до начала интенсивного пыления обычно отмечается некоторое увеличение фоновых концентраций пыльцы данного типа – предвестника основного пика пыления. Основная сложность предсказания сроков пыления состоит в отсутствии точного прогноза погоды, так как на всплеск пыления наиболее существенное влияние оказывают такие особенности как облачность, влажность, суточный рост температуры, скорость и направление ветра. Некоторые из этих параметров в настоящее время предсказываются с низкой точностью.

Основные закономерности формирования аэропалинологической обстановки. Региональная составляющая пыльцевого дождя связана с поступлением пыльцы древесных растений из лесных массивов пригорода. Для Минска, например, характерны крупные лесные массивы в северном, северо-восточном и восточном направлениях. Компьютерное моделирование показывает, что при западных и южных ветрах региональная составляющая пыльцы древесных растений в составе аэрозолей уменьшается в 3–7 раз по сравнению с северными и восточными ветрами. В результате этих вариаций, региональная составляющая пыльцы меняется в пределах 20–60 % в составе «пыльцевого дождя» в разных точках города и при разных погодных условиях. Локальная компонента, связанная с пылением растительности внутри городской черты и ближайших пригородов, оказывает основное влияние на состав и интенсивность «пылевого дождя». Данные мониторинга с помощью седиментационных ловушек пыльцы, расставленных по территории г. Минска и данные компьютерного моделирования пере-

носа пыльцы показали, что состав и концентрация пыльцы в аэрозолях существенно меняются в разных районах города. Обнаруживаются некоторые виды пыльцы, например, пыльца ясеня (*Fraxinus*), клена (*Acer negundo* L.), характерные только для посадок городской территории. Таким образом, аэропалинологическая обстановка города имея общую (региональную) компоненту и значительные локальные вариации, может существенно различать по районам города.

Компьютерное моделирование состояния атмосферного воздуха города Минска. Моделирование осуществлялось на карте города с учетом лесопарковых зон, посадок во дворах и вдоль улиц, месторасположения ТЭЦ, основных потоков транспорта в пределах городской черты. Кроме локальных источников, учитывались лесные массивы области, являющиеся источниками региональной компоненты «пыльцевого дождя». Пространственное и временное моделирование состояния атмосферного воздуха города Минска показало, что состояние атмосферы может быть оценено количественно как по всей территории города в виде карты плотности компонентов аэрозолей, так и по отдельным точкам города в виде почасового графика плотности пыльцы и техногенных аэрозолей для данной точки. В ходе моделирования состояния атмосферного воздуха были установлены существенные различия в составе и концентрации пыльцы, а также техногенных компонентов для разных точек города.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что в ходе моделирования возможно ранжирование районов населенного пункта по качеству атмосферного воздуха. При этом количественное моделирование может служить основой для создания системы аэропа-

линологического прогноза. Для создания такой системы нужна информация о всех механизмах переноса пыльцы разного типа, влияния погодных условий и, особенно, прогнозирование начала пыления. Эти процессы требуют всестороннего изучения и анализа, что в свою очередь обуславливает необходимость ежедневного аэропалинологического мониторинга атмосферного воздуха населенного пункта.

Литература

1. Принципы и методы аэропалинологических исследований // Н. Р. Мейер-Меликян, Е. С. Северова, Г. П. Гапочка и др. – М.: 1999. – 48 с.
2. Лайхтман, Д. Л. Динамическая метеорология, – Л.: Гидрометеоздат. – 1975. – 448 с.
3. Ярославцева, Т. В. Моделирование процессов распространения пыльцы растений // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – № 5–6 (2002). – С. 483–487.
4. Федорова, Р. В. Распространение пыльцы березы воздушным путем // Тр. института географии. – 1959. – Вып. 77. – С. 139–144.
5. Мейер-Меликян, Н. Р., Северова Е. С., Полевова С. В., Миронов В. А. Суточная ритмика пыления *Artemisia* (Compositae) // Аэрозоли. – 1997. – Т. 3в. – С. 6–9.

References

1. Principles and methods of aeropalynological research // N. R. Mejer-Melikjan, E. S. Severova, G. P. Gapochka [et al.]. – M., 1999. – 48 s.
2. Lajhtman, D. L. Dynamic meteorology, – L.: Gidrometeoizdat. – 1975. – 448 s.
3. Jaroslavceva, T. V. Modeling the processes of plant pollen distribution // Optika atmosfery i okeana. – 2015. – № 5–6 (2002). – S. 483–487.
4. Fedorova, R. V. Airborne birch pollen // Tr. instituta geografii. – 1959. – Vol. 77. – S. 139–144.
5. Mejer-Melikjan, N. R., Severova E. S., Polevova S. V., Mironov V. A. The daily rhythm of dusting *Artemisia* (Compositae) // Ajerozoli – 1997. – T. 3v. – S. 6–9.

Поступила 23.07.2020 г.