

МОНИТОРИНГ ПЫЛЕНИЯ ЗЛАКОВ В ГОРОДЕ РЯЗАНИ

© 2025 г. В. С. Карасева^{1, *}, Ю. М. Селезнева^{1, **}, Е. Э. Северова^{2, 3, ***}

¹Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина
ул. Свободы, 46, Рязань, 390000, Россия

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Ленинские Горы, 1, стр. 12, Москва, 119234, Россия

³Shenzhen MSU-BIT University
Shenzhen, 518172, China

*e-mail: v.karaseva94@mail.ru

**e-mail: posevina_julia@mail.ru

***e-mail: elena.severova@mail.ru

Поступила в редакцию 22.07.2024 г.

Получена после доработки 17.12.2024 г.

Принята к публикации 14.01.2025 г.

Пыльца злаков (Poaceae) — одна из причин аллергических заболеваний — поллинозов. Пыльца всех злаков относится к единому палиноморфологическому типу и при рутинном пыльцевом анализе диагностируется только до уровня семейства. Периоды пыления разных видов злаков существенно перекрываются, при этом аллергенные свойства пыльцы разных видов могут различаться. В настоящей работе предпринята попытка на основе фенологических наблюдений детализировать кривую пыления злаков, полученную в ходе аэробиологического мониторинга. За основу был взят метод расчета фенологического индекса, представляющего собой комбинацию данных о фенологическом состоянии вида, его пыльцевой продукции и встречаемости. Исследования проводились в г. Рязани на протяжении трех лет, с 2020 по 2022 г. Было показано, что использование фенологического индекса для детализации кривой пыления имеет целый ряд ограничений, проанализированы причины несоответствия фенологических и аэробиологических данных. Расхождения определяются в первую очередь разницей в методике проведения исследований: фенологический индекс отражает цветение на конкретных площадках, а пыльцевые ловушки, установленные на крышах зданий, дают представление о региональном пыльцевом спектре на большой территории. Фенологический индекс может быть использован для оценки вклада разных видов в состав аэробиологического спектра и определения последовательности их пыления. Для Рязани наиболее опасными с аллергологической точки зрения следует считать *Festuca pratensis*, *Dactylis glomerata* и *Phleum pratense*.

Ключевые слова: Poaceae, злаки, аэробиология, фенологический индекс, аллергенность

DOI: 10.31857/S0006813625020053, **EDN:** DNACQM

Злаки (Poaceae) — одно из крупнейших семейств покрытосеменных растений, включающее более 12 000 видов (García-Mozo, 2017), отмеченных на всех континентах в составе разных типов растительности. На территории Рязанской области произрастает 135 видов злаков (Kazakova, Shcherbakov, 2017), которые встречаются в составе лесных и луговых сообществ, а также являются компонентом городских экосистем. Подавляющее большинство видов — ветроопыляемые растения с высокой пыльцевой продукцией (Severova et al., 2022). Пыльца злаков циркулирует в воздухе длительное время (Volkova, Severova, 2019), способна переноситься на десятки километров (Skjøth et al., 2013; Frisk et al., 2022) и является одной из основных причин поллинозов (D'Amato et al., 2007a), которые, как правило, характеризуются острыми воспалительными изменениями слизистых оболочек дыхательных путей и глаз (Torshkoeva et al., 2014). К аллергенам пыльцы злаков восприимчиво около 20% населения и около 40% от числа лиц, сенсibilizиро-

ванных ранее к другим аллергенам (Andersson, Lidholm, 2003; García-Mozo, 2017). Пороговый уровень концентрации пыльцы злаков, способный вызвать возникновение первых симптомов поллиноза у наиболее чувствительных пациентов, составляет от 12–14 до 52 пыльцевых зерен/м³ (пз/м³) (Hoffmann-Sommrgruber et al., 1996; Lipiec et al., 2005; Rapiejko et al., 2007; Becker et al., 2021). С пылью злаков связывают также явление грозовой астмы: во время грозы при контакте пыльцевых зерен с водой происходит очень быстрое высвобождение цитоплазматических гранул, несущих аллергены (Suphioglu, 1998). Небольшие размеры гранул позволяют им проникать в дистальные отделы легких, что может вызвать астматический приступ (Suphioglu, 1998; D'Amato et al., 2007b; Cecchi et al., 2021). Такое поведение пыльцы злаков связано с особенностями пыльцевого зерна в момент эмиссии. У злаков пыльца высвобождается из пыльников в гидратированном состоянии, что приводит к стремительному выбросу содержимого при контакте с водой (Neri et al., 2001), в том числе и при контакте со слизистыми оболочками. За развитие аллергических реакций на пыльцу злаков отвечают 11 групп аллергенов, из которых наибольший вклад в развитие заболевания вносят аллергены 1-й и 5-й групп (β -экспансины и рибонуклеазы соответственно), вызывающих сенсibilизацию у 90% и 65–85% пациентов с аллергией соответственно (Behrendt et al., 1999; Hrabina et al., 2008). Аллергенные свойства разных видов злаков изучены очень слабо, однако существуют данные, что аллергенность разных видов различна (Weber, 2003; Rowney et al., 2021).

Палиноморфологически семейство Poaceae очень единообразно (Driessen et al., 1989) – пыльца злаков дистально однопоровая, пора имеет хорошо выраженный ободок и оперкулум. Большинство видов различаются по размерам пыльцевых зерен, однако диапазон изменчивости этого признака очень широк. При анализе пыльцевых спектров злаки, как правило, анализируются только до уровня семейства. При этом выделяется лишь группа культурных злаков, пыльца которых отличается более крупными размерами (Driessen et al., 1989). Перекрывающиеся периоды пыления отдельных видов, морфологическое сходство их пыльцевых зерен и предположительно разная аллергенная активность делают задачу детализации кривой пыления, получаемой в хо-

де стандартного аэриобиологического мониторинга, чрезвычайно актуальной. Такая детализация может быть проведена на основе фенологических наблюдений или с использованием молекулярных методов (меташтрихкодирование). Меташтрихкодирование позволяет проводить идентификацию до уровня рода и даже вида (Alonso et al., 2014; Wang et al., 2017; Brennan et al., 2019; Campbell et al., 2020; Krinitsina et al., 2023), однако этот метод пока непригоден как метод рутинного мониторинга из-за дороговизны и длительности исследования.

Детализация кривых пыления на основе фенологических наблюдений проводится достаточно редко из-за сложности и высокой трудозатратности подобного рода исследований. Алгоритм сопоставления качественных фенологических наблюдений и количественных аэриобиологических данных был предложен S. Ghitarrini с соавторами (2017). Метод основан на расчете фенологического индекса, который представляет собой комбинацию трех параметров: фенологическое состояние (бальная оценка), обилие вида и пыльцевая продуктивность.

Целью наших исследований была детализация кривой пыления злаков в Рязани на основе фенологических наблюдений. Такой подход позволяет выявить последовательность пыления и определить виды, вносящие максимальный вклад в состав аэриобиологического спектра в летний период.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Аэриобиологические исследования

Аэриобиологические наблюдения проводились по стандартной международной методике (Galan et al., 2014) с использованием волюметрического пыльцеуловителя Хирст-типа Lanzoni VPPS 2000 в период с начала мая до конца сентября на протяжении трех лет, с 2020 по 2022 г. Пыльцевая ловушка была установлена на крыше астрономической обсерватории федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина” (РГУ им. С.А. Есенина) на высоте 18.54 м над поверхностью земли. Пыльцевые зерна в препаратах подсчитывались двенадцатью вертикальными транссектами, перпендикулярными

продольной оси препарата. Анализ проводился на световом микроскопе Микмед-6 (ЛЮМО) при увеличении $\times 400$.

Динамика пыления Poaceae за три года наблюдений была проанализирована по следующим параметрам: дата первого появления пыльцевых зерен (пз) в воздухе, дата максимальной концентрации (пик пыления), максимальная суточная концентрация пыльцы в атмосфере ($\text{пз}/\text{м}^3$), суммарное содержание пыльцы за сезон, дата последнего появления пыльцы в воздухе, даты начала и окончания основного периода пыления (ОПП), его продолжительность (в днях). ОПП рассчитывался как временной интервал, в течение которого содержание пыльцевых зерен в атмосфере составляло 90% от суммарного количества пыльцы за сезон (Nilsson, Persson, 1981).

Фенологические исследования

Для фенологических наблюдений и расчета фенологического индекса мы использовали метод, предложенный S. Ghitarrini с соавторами (2017), модифицированный нами.

Фенологические исследования проводились в течение 2.5 месяцев (конец мая – конец июля) через каждые семь дней (в пик пыления – через каждые 2–3 дня) на пробных площадках, заложенных на расстоянии 1 и 10 км от места установки пыльцевой ловушки. В 2020 г. исследования проводили на трех площадках, расположенных на расстоянии 1 км, в 2021 и 2022 гг. число площадок увеличили до 5 (дополнительные площадки были заложены на расстоянии 10 км от места установки ловушки). Такое расстояние было выбрано с учетом возможной дальности переноса пыльцы злаков (Skjøth et al., 2013; Frisk et al., 2022). Для каждой площадки был составлен список видов злаков и определено их проективное покрытие по шкале Браун-Бланке. Фенологические наблюдения проводили за 25 экземплярами каждого вида злаков. Всего на площадках было зарегистрировано 10 видов: *Bromus inermis* Leys., *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Dactylis glomerata* L., *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Festuca pratensis* Huds., *Lolium perenne* L., *Phleum pratense* L., *Poa pratensis* L., *Poa annua* L., *Poa trivialis* L.

Фенофазы определялись в соответствии со шкалой ВВСН (Meier, 1997), согласно которой каждой фенофазе присваивали коэффициент от 0 до 2 (Karaseva et al., 2021).

Среди изученных видов злаков почти все относились к многолетним (за исключением малолетнего вида *Poa annua*), поэтому вместо бальной оценки пыльцевой продуктивности, предложенной S. Ghitarrini с соавторами (2017) для многолетних и однолетних видов, мы использовали прямые расчеты, которые были опубликованы ранее (Karaseva et al., 2021; Severova et al., 2022).

Для сопоставления фенологических и аэробιологических данных были рассчитаны фенологические индексы каждого вида в каждый день наблюдений и суммарный фенологический индекс. Еженедельные показатели суммировались по всем пробным площадкам для оценки вклада каждого вида в общую пыльцевую нагрузку. Сравнение фенологических и аэробιологических данных было проведено с помощью корреляционного анализа в программе Excel (Microsoft Office 365).

Параллельно с аэробιологическими и фенологическими наблюдениями был отобран материал для метагеномного анализа. Для этого на крыше была установлена вторая волюметрическая пыльцевая ловушка, расстояние между ловушками составляло 2 м. Для анализа были выбраны фрагменты лент, соответствующие дням с наибольшей концентрацией пыльцы злаков в атмосфере (не менее $50 \text{ пз}/\text{м}^3$ по результатам аэробιологических наблюдений), каждый фрагмент соответствовал одним суткам работы пыльцевой ловушки. Всего за три года наблюдений были отобраны 84 фрагмента. Методика смыва пыльцы с лент, выделения ДНК и проведения метагеномного анализа изложена в работе A. Krinitsina с соавторами (2023).

Для анализа динамики пыления злаков были использованы метеорологические данные, представленные на сайте http://rp5.in/Архив_погоды_в_Рязани (Weather, 2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Аэробιологические исследования

Временные и количественные особенности сезона пыления злаков в 2020–2022 гг. представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Первые пыльцевые зерна злаков во все годы наблюдений были зарегистрированы в атмосфере Рязани во второй половине мая. Основной период пыления злаков начинался в мае–июне и про-

Таблица 1. Особенности пыления злаков в Рязани в 2020–2022 гг.**Table 1.** Peculiarities of grasses' pollination in Ryazan', 2020–2022

Год Year	Первое появление пыльцы в воздухе (дата) First appearance of pollen in the air (date)	ОПП (основной период пыления) PPDP (principal pollen dispersion period)		Дата максимальной концентрации пыльцы Date of maximum pollen concentration	Максимальное суточное содержание (пз/м ³) Maximum daily concentration (pg/m ³)	Сумма за сезон (пз) Total sum per season (pg)	Последнее появление пыльцы в воздухе (дата) The last appearance of pollen in the air (date)
		Даты начала и окончания Start and end dates	Продолжительность (в днях) Duration (days)				
2020	24.05	07.06–07.08	62	11.06	144	3625	20.09
				24.06	170		
				27.06	149		
				07.07	189		
2021	17.05	28.05–08.08	73	12.07	194	1930	29.09
				07.07	156		
				12.07	134		
2022	31.05	11.06–12.08	63	07.07	168	2888	29.09
				11.07	143		

Примечание. пз – пыльцевые зерна.

Note. pg – pollen grain.

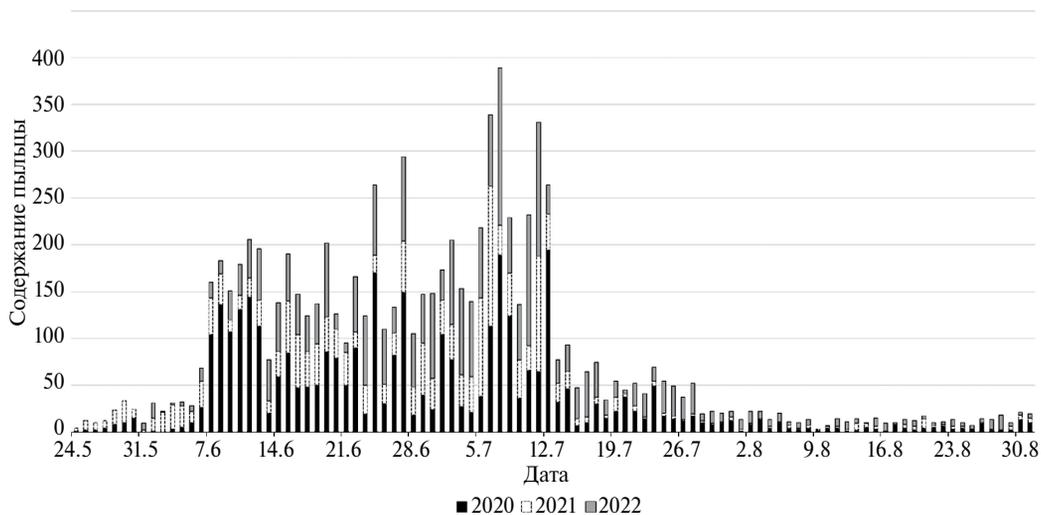


Рис. 1. Динамика пыления злаков, 2020–2022 гг., диаграмма с накоплением. По горизонтали – дата (день и месяц), по вертикали – содержание пыльцы (пз/м³).

Fig. 1. Dynamics of grass pollination, 2020–2022, cumulative diagram. Horizontally – date (day and month), vertically – pollen concentration (pg/m³).

должался до начала августа, продолжительность ОПП составляла 62–73 дня, однако единичные пыльцевые зерна циркулировали в атмосфере до конца сентября.

В течение 2020 г. наблюдалось несколько пиков пыления, среди которых наиболее мощные были

зафиксированы 11.06.2020 (144 пз/м³), 24.06.2020 (170 пз/м³), 27.06.2020 (149 пз/м³), 07.07.2020 (189 пз/м³) и 12.07.2020 (194 пз/м³). В 2021 г. высокая концентрация пыльцы отмечалась 7 и 12 июля (156 и 134 пз/м³ соответственно); в 2022 г. – 7 и 11 июля (168 и 143 пз/м³ соответственно).

Интенсивность пыления значительно различалась в разные сезоны наблюдений. Максимальное суммарное содержание пыльцы было зафиксировано в 2020 г. (3625 пз), минимальное — в 2021 г. (1930 пз).

Сопоставление аэриобиологических и фенологических наблюдений

Суммарный фенологический индекс и кривая пыления злаков значимо коррелировали между собой в 2020 и 2022 гг. ($r = 0.79, p = 0.0007$ и $r = 0.66, p = 0.007$ соответственно). В 2021 г.

корреляция между фенологическими и аэриобиологическими данными отсутствовала ($r = 0.37, p = 0.32$) (рис. 2).

Дешифровка аэропалинологических кривых на основе фенологических наблюдений показала, что существенный вклад в формирование пыльцевого спектра в начале сезона пыления вносит *Poa pratensis*. Вклад малолетнего вида *Poa annua* в общую кривую динамики фенологического индекса очень незначительный. Пик пыления середины июня связан в основном с цветением *Dactylis glomerata* и *Festuca pratensis* (рис. 3). Помимо ежи сборной и овсяницы луговой, су-

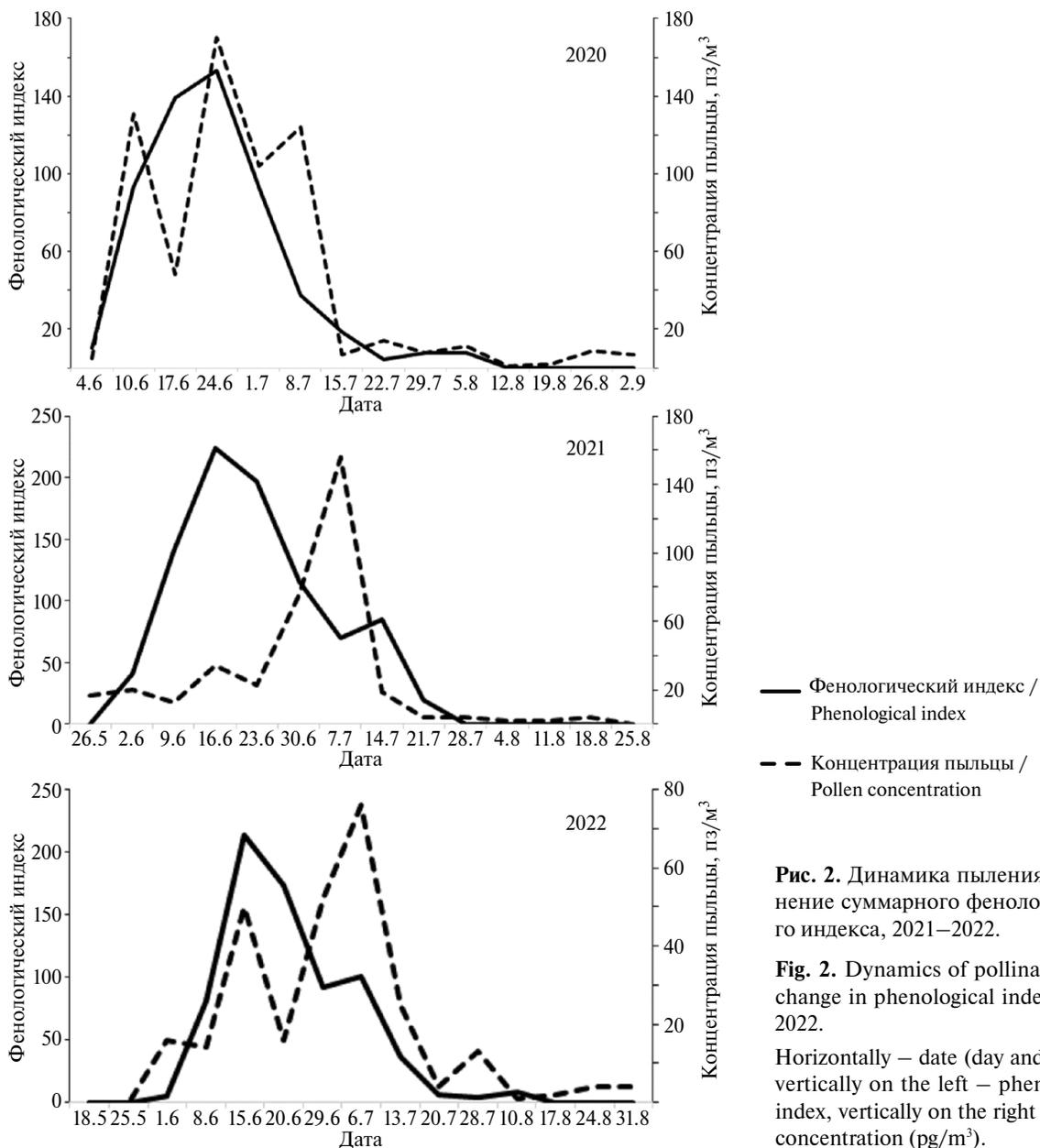


Рис. 2. Динамика пыления и изменение суммарного фенологического индекса, 2021–2022.

Fig. 2. Dynamics of pollination and change in phenological index, 2020–2022.

Horizontally – date (day and month), vertically on the left – phenological index, vertically on the right – pollen concentration (pg/m³).

щественный вклад в формирование пыльцевого спектра в это время вносят также *Poa pratensis* и *Phleum pratense*.

Доминанты аэробιологического спектра в июле – пыльца *Phleum pratense* и *Dactylis glomerata*, во второй половине месяца активно цветет *Cal-*

amagrostis epigeios. Для *Dactylis glomerata*, *Bromus inermis*, *Lolium perenne*, *Festuca pratensis* во второй половине июня и начале августа отмечено вторичное цветение, вклад которого в общую динамику изменения фенологического индекса незначителен.

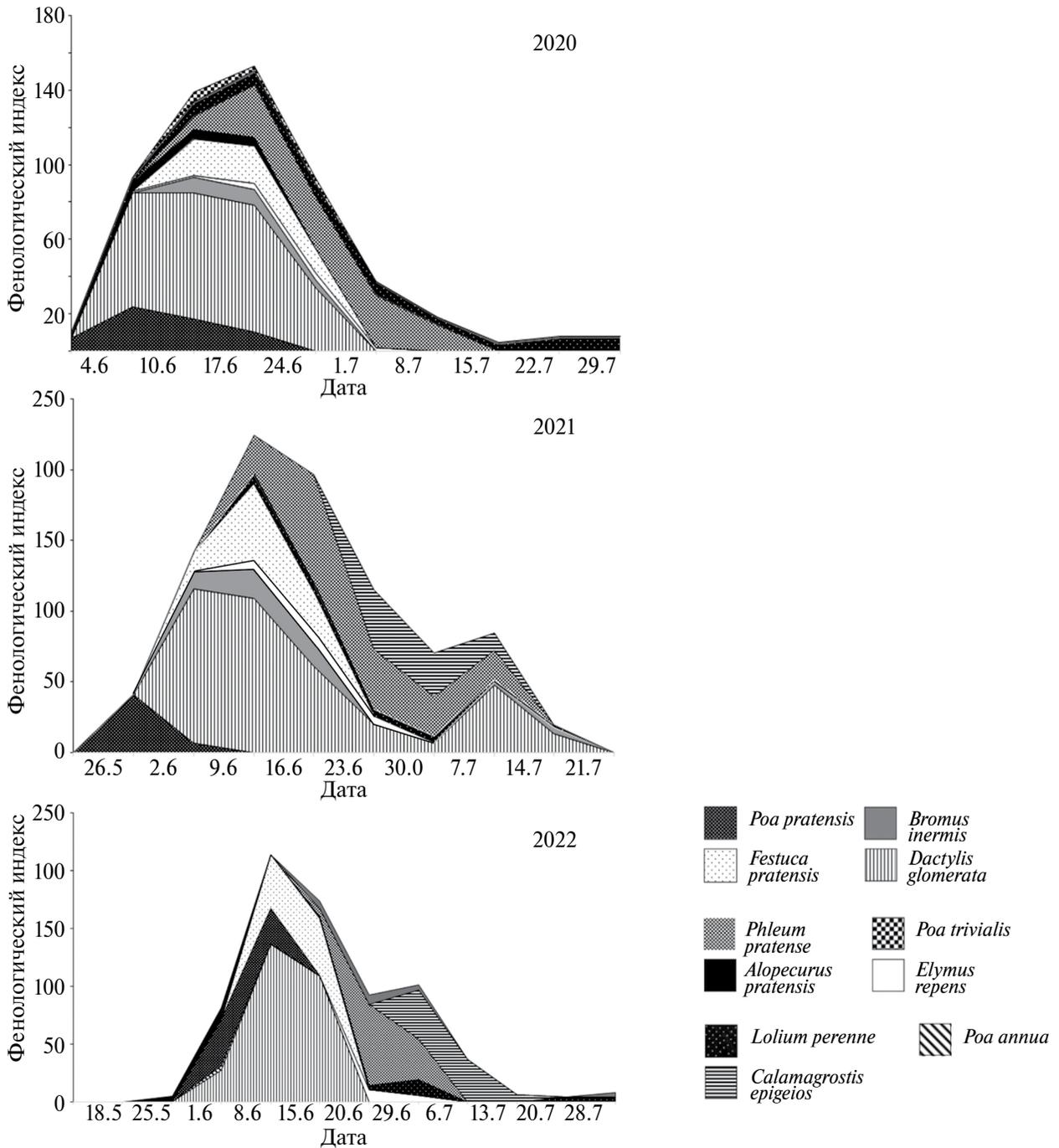


Рис. 3. Детализация кривых изменения фенологического индекса, 2020–2022 гг.

Fig. 3. Detalization of phenological index curves, 2020–2022.

Horizontally – date, vertically – phenological index.

ОБСУЖДЕНИЕ

Первое появление пыльцы злаков за три года наблюдений отмечалось примерно в одно и то же время, во второй половине мая (см. табл. 1). Первые пыльцевые зерна вероятнее всего принадлежат малолетним видам рода *Poa*, в первую очередь *Poa annua*, цветение которого открывает сезон пыления злаков в городской среде. Однако низкая пыльцевая продукция и небольшие размеры этого вида делают его вклад в общую кривую пыления незначительным. К раннецветущим злакам относится также *Alopecurus pratensis*, не зарегистрированный нами на фенологических площадках. Для городской среды этот вид, приуроченный преимущественно к пойменным лугам, не характерен (Kazakova, Shcherbakov, 2017), обнаружение его пыльцы в составе воздушного спектра маловероятно.

Начало основного периода пыления злаков регистрируется в среднем через две недели после появления первой пыльцы в атмосфере и охватывает промежуток времени с середины июня до середины июля. Именно в этот период регистрируются “пики пыления” – короткие периоды в 1–4 дня с очень высокой концентрацией пыльцы, намного превышающей концентрации, при которых у больных, сенсibilизированных к пыльце злаков, развиваются симптомы заболевания (Hoffmann-Sommrgruber et al., 1996; Lipiec et al., 2005; Rapijko et al., 2007; Becker et al., 2021). По данным фенологических наблюдений, основные доминанты спектра в этот период – пыльца *Festuca pratensis*, *Dactylis glomerata* и *Phleum pratense*. Помимо широкого распространения, в том числе в городе, эти злаки обладают и наиболее высокой пыльцевой продукцией (Severova et al., 2022).

Интенсивность пыления злаков значительно варьировала в разные годы исследований (см. табл. 1). Наиболее высокое содержание пыльцы в атмосфере было зарегистрировано в 2020 г. (3625 пз), что в 1.9 раза превышало показатели 2021 г., и в 1.3 раза – показатели 2022 г. Такую высокую концентрацию пыльцы злаков в 2020 г. мы связываем с тем, что первый год наших исследований совпал с пандемией COVID19. В связи с введением локдауна на территории Рязанской области работа сотрудников управления благоустройства и управляющих компаний была временно приостановлена. Кошение газонов

в 2020 г. началось намного позже обычного, когда пыление доминирующих видов злаков уже завершилось, что отразилось на общем содержании пыльцы злаков в атмосфере. Этот пример подтверждает важность проведения мероприятий по благоустройству с учетом фенологических особенностей растений городской среды.

Основной период пыления злаков завершился к началу августа, однако единичные пыльцевые зерна циркулировали в атмосфере до конца сентября. Такие единичные находки могут быть связаны как со вторичным подъемом пыльцы в атмосферу, так и со вторичным цветением отдельных видов.

Наши исследования показали, что использование фенологического индекса для детализации кривой пыления злаков имеет свои ограничения. Не всегда динамика значений фенологического индекса хорошо согласуется с динамикой концентрации пыльцы в атмосфере. Так, в 2020 г. суммарный фенологический индекс хорошо коррелировал с аэриобиологическими данными, при этом сопоставление кривых пыления и изменения фенологического индекса выявило три периода их несоответствия (Karaseva et al., 2021). Первый период был зарегистрирован в начале сезона пыления злаков, когда значения суммарного фенологического индекса увеличивались, а концентрация пыльцы, наоборот, снижалась. В начале сезона пыления такие расхождения обычно связаны с погодными условиями, в первую очередь с обильными осадками, что подтверждается метеорологическими данными. Именно в этот период (12–15 июня 2020 г.) в Рязани отмечались ливневые дожди. Увеличение концентрации пыльцы 8–9 июля, напротив, не сопровождалось увеличением фенологического индекса. Причиной такого расхождения мог быть вторичный подъем пыльцы в атмосферу или ее транспорт от удаленных источников. Так, по данным С.А. Frisk с соавторами (2022), дальность переноса пыльцы в городской среде может составлять до 30 км. Незначительное увеличение концентрации пыльцы в конце сезона пыления (23 июня 2020 г.), также не связанное с изменением фенологического индекса, может отражать вторичное цветение отдельных растений после скашивания (Karaseva et al., 2021).

В 2021 г. корреляции между фенологическим индексом и концентрацией пыльцы не обна-

ружено ($r = 0.37$, $p = 0.32$). Такое расхождение – следствие резкого увеличения концентрации в отдельные дни в начале июля – 7 июля 2021 г. (156 пз/м^3) и 12 июля 2021 г. (134 пз/м^3). При этом, согласно фенологическим наблюдениям на исследуемых площадках, цветение основных видов злаков к началу июля в Рязани уже завершилось. Существенное увеличение концентрации пыльцы в первой половине июля мы связали с началом цветения *Calamagrostis epigeios* за пределами фенологических площадок. Эта гипотеза в дальнейшем была подтверждена результатами метагеномного анализа образцов воздуха, отобранных нами параллельно с аэриобиологическими наблюдениями: 7 июля 2021 г. представленность маркерных последовательностей *Calamagrostis epigeios* составила 73% (ITS1) и 67.4% (ITS2), а 12–13 июля 2021 г. – 100% по обоим маркерам (Krinitcina et al., 2023). Вейник наземный – широко распространенный вид, произрастающий на сухих почвах, в остепненных сосновых лесах. Пыльцевая продукция вейника может достигать 9.5 млн пыльцевых зерен на одно соцветие (Severova et al., 2022), поэтому занос пыльцы вейника из пригородов представляется нам возможным.

В 2022 г. фенологический индекс и кривая пыления злаков также хорошо коррелировали между собой ($r = 0.66$, $p = 0.007$). При сравнении аэриобиологических и фенологических данных было выявлено два периода несоответствия (см. рис. 2). Первый период пришелся на третью декаду июня, когда значения концентрации пыльцы снижались, а значение фенологического индекса увеличивалось. Как и в 2020 г., в это время в Рязани были зафиксированы ливневые дожди, которые вымывали из атмосферы пыльцу, что и привело к резкому снижению ее концентрации. Низкое значение фенологического индекса при небольшом увеличении концентрации пыльцы в атмосфере в конце июля может отражать транспорт пыльцы растений, цветущих за пределами пробных площадок.

Мы полагаем, что одной из основных причин расхождения фенологических и аэриобиологических данных можно считать особенности методики проведения исследований. Фенологические наблюдения, проведенные в одной точке, даже на нескольких пробных площадях, не отражают цветение на больших территориях. В свою оче-

редь, пылевая ловушка, установленная на высоте 10–12 м над уровнем земли на Среднерусской равнине, может отражать пыление в радиусе 30–50 км (Skjøth et al., 2013; Severova, Volkova, 2018; Frisk et al., 2022).

Кроме того, огромное влияние на концентрацию пыльцы трав в городе оказывает режим скашивания. Как правило, фенологические наблюдения проводят на ненарушенных пробных площадях. При этом пылевая ловушка, установленная в городе, отражает в основном пыление активно косимых городских территорий. Интенсивное выкашивание приводит не только к изменению общей концентрации пыльцы в атмосфере, но и к расхождению между фенологическими и аэриобиологическими наблюдениями.

На основе фенологических данных нам удалось частично детализировать кривую пыления злаков в Рязани. Период наиболее высокой концентрации пыльцы связан с пылением *Festuca pratensis*, *Dactylis glomerata* (июнь) и *Phleum pratense* (июль). Пик пыления середины июня связан в основном с цветением *Dactylis glomerata* (41–45% от суммарного фенологического индекса). Вторым по значимости видом для Рязани является *Phleum pratense*, на долю которого приходится 15–21% от суммарного фенологического индекса. Вклад *Festuca pratensis* в суммарную кривую фенологического индекса составил 9–13%. Тимофеевка и овсяница широко распространены в городе, виды рода *Festuca* используются в газонных смесях, поэтому пыльца этих растений, наряду с *Dactylis glomerata*, может быть причиной июньского поллиноза.

В июле в воздухе может также отмечаться высокая концентрация пыльцы *Calamagrostis epigeios*, однако на сегодняшний день степень аллергенности пыльцы вейника не установлена, и говорить о нем как о сильном аллергене, ответственном за развитие поллинозов во второй половине лета, не представляется возможным.

Poa pratensis был обнаружен на всех пробных площадях, его цветение вносило значительный вклад в суммарную кривую фенологического индекса (10–18%) в начале июня, однако пыльца этого вида является умеренно аллергенной (PollenLibrary.com, 2023) и может не оказывать существенного влияния на развитие симптомов поллиноза.

Подъемы концентрации пыльцы в конце сезона пыления могут быть связаны со вторичным цветением злаков или вторичным подъемом пыльцы в атмосферу. Так, вторичное цветение злаков за пределами пробных площадок было отмечено нами у *Phleum pratense*, *Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*, *Bromus inermis*. Пыльцевая продукция и аллергенные свойства пыльцы вторично цветущих злаков никогда ранее не исследовались.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование фенологического индекса для детализации кривой пыления имеет целый ряд ограничений. Расхождения между аэробиологическими и фенологическими данными определяются в первую очередь разницей в методике проведения исследований: фенологический индекс отражает цветение на конкретных площадках, число которых всегда невелико, а пыльцевые ловушки, установленные на крышах зданий, дают представление о региональном пыльцевом спектре на большой территории. Кроме того, несоответствие данных может быть связано с режимом благоустройства городской территории. Фенологический индекс может быть использован для оценки вклада разных видов в состав аэробиологического спектра и определения последовательности их пыления. Для Рязани наиболее опасными с аллергологической точки зрения следует считать *Festuca pratensis*, *Dactylis glomerata* (июнь) и *Phleum pratense* (июль).

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-05-50035. Авторы выражают благодарность доктору биологических наук Казаковой Марине Васильевне за помощь в описании пробных площадей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Alonso A., Bull R.D., Acedo C., Gillespie L.J. 2014. Design of plant-specific PCR primers for the ETS region with enhanced specificity for tribe Bromaeae and their application to other grasses (Poaceae). — *Botany*. 92(10): 693–699. <https://doi.org/10.1139/cjb-2014-0062>

Andersson K., Lidholm J. 2003. Characteristics and immunobiology of grass pollen allergens. — *IAA*. 130(2): 87–107. <https://doi.org/10.1159/000069013>

Becker J., Steckling-Muschack N., Mittermeier I., Bergmann K.C., Böse-O'Reilly S., Buters J., Damialis A., Heigl K., Heinrich J., Kabesch M., Mertes H., Nowak D., Schutzmeier P., Walser-Reichenbach S., Weinberger A., Korbelly C., Herr C., Heinze S., Kutzora S. 2021. Threshold values of grass pollen (Poaceae) concentrations and increase in emergency department visits, hospital admissions, drug consumption and allergic symptoms in patients with allergic rhinitis: a systematic review. — *Aerobiologia*. 37: 633–662. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09720-9>

Behrendt H., Tomczok J., Sliwa-Tomczok W., Kasche A., Ebner von Eschenbach C., Becker W.M., Ring J. 1999. Timothy Grass (*Phleum pratense* L.). Pollen as allergen carriers and initiators of an allergic response. — *International Archives of Allergy and Immunology*. 118(2-4): 414–418. <https://doi.org/10.1159/000024151>

Brennan G.L., Potter C., De Vere N., Griffith G.W., Skjøth C.A., Osborne N.J., Wheeler B.W., McInnes R.N., Clewlow Y., Barber A. 2019. Temperate airborne grass pollen defined by spatio-temporal shifts in community composition. — *Nature Ecology & Evolution*. 3(5): 750–754. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0849-7>

Campbell B.C., Al Kouba J., Timbrell V., Noor M.J., Masael K., Gilding E.K., Angel N., Kemish B., Hugenholtz P., Godwin I.D. 2020. Tracking seasonal changes in diversity of pollen allergen exposure: targeted metabarcoding of a subtropical aerobiome. — *Science of the Total Environment*. 747: 141189. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141189>

Cecchi L., Scala E., Caronni S., Citterio S., Asero R. 2021. Allergenicity at component level of sub-pollen particles from different sources obtained by osmolar shock: A molecular approach to thunderstorm-related asthma outbreaks. — *Clin Experimental Allergy*. 51(2): 253–261. <https://doi.org/10.1111/cea.13764>

D'Amato G., Cecchi L., Bonini S., Nunes C., Annesi-Maesano I., Behrendt H., Liccardi G., Popov T., Van Cauwenberge P. 2007a. Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. — *Allergy*. 62(9): 976–990. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2007.01393.x>

D'Amato G., Liccardi G., Frenguelli G. 2007b. Thunderstorm-asthma and pollen allergy. — *Allergy*. 62(1): 11–16. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2006.01271.x>

Driessen M.N.B.M., Willemse M.T.M., Van Luijn J.A.G. 1989. Grass pollen grain determination by light- and UV-microscopy. — *Grana*. 28(2): 115–122. <https://doi.org/10.1080/00173138909429962>

Frisk C.A., Apangu G.P., Petch G.M., Adams-Groom B., Skjøth C.A. 2022. Atmospheric transport reveals grass pollen dispersion distances. — *Science of the Total Environment*. 814: 152806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152806>

Galán C., Smith M., Thibaudon M., Frenguelli G., Oteros J., Gehrig R., Berger U., Clot B., Brandao R. 2014. Pollen Monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. — *Aerobiologia*. 30: 385–395. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>

- García-Mozo H. 2017. Poaceae pollen as the leading aeroallergen worldwide: A review. — *Allergy*. 72(12): 1849–1858. <https://doi.org/10.1111/all.13210>
- Ghitarrini S., Galán C., Frenguelli G., Tedeschini E. 2017. Phenological analysis of grasses (Poaceae) as a support for the dissection of their pollen season in Perugia (Central Italy). — *Aerobiologia*. 33(3): 339–349. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9473-7>
- Hoffmann-Sommergruber K., Ferreira F.D., Ebner C., Barisani T., Korninger L., Scheiner D., Kraft O., Baumgartner I. 1996. Detection of allergen-specific IgE in tears of grass pollen-allergic patients with allergic rhinoconjunctivitis. — *Clin Experimental Allergy*. 26(1): 79–87. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.1996.tb00059.x>
- Hrabina M., Peltre G., Ree R. Van, Moingeon P. 2008. Grass pollen allergens. — *Clinical & Experimental Allergy Reviews*. 8(1): 7–11. <https://doi.org/10.1111/j.1472-9733.2008.00126.x>
- [Karaseva et al.] Карасева В.С., Селезнева Ю.М., Казакова М.В., Северова Е.Э. 2021. Фенологический анализ динамики пыления злаков в Рязани. — *Бюллетень МОИП. Отдел биологический*. 126(6): 18–28.
- [Kazakova, Shcherbakov] Казакова М.В., Щербаков А.В. 2017. Флористическая изученность муниципальных районов Рязанской области. — *Тр. Рязан. отд. РБО. “Флористические исследования”*. Вып. 4. Рязань. С. 84–138.
- Krinitzina A.A., Omelchenko D.O., Kasianov A.S., Karaseva V.S., Selezneva Y.M., Chesnokova O.V., Shirobokov V.A., Polevova S.V., Severova E.E. 2023. Aerobiological monitoring and metabarcoding of grass pollen. — *Plants*. 12(12): 2351. <https://doi.org/10.3390/plants12122351>
- Lipiec A., Rapiejko P., Samolinski B., Krzych E. 2005. Correlation between conjunctival provocation test results and conjunctival symptoms in pollinosis—Preliminary report. — *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 12(1): 17–20.
- Meier U. 1997. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. Berlin, Heidelberg. 622 p.
- Nepi M., Franchi G.G., Padni E. 2001. Pollen hydration status at dispersal: cytophysiological features and strategies. — *Protoplasma*. 216: 171–180.
- Nilsson S., Persson S. 1981. Tree pollen spectra in the Stockholm region (Sweden), 1973–1980. — *Grana*. 20(3): 179–182. <https://doi.org/10.1080/00173138109427661>
- PollenLibrary.com — Allergen and Botanic Reference Library. 2023. <https://www.pollenlibrary.com/> (Accessed: 29.01.2023)
- Rapiejko P., Stankiewicz W., Szczygielski K., Jurkiewicz D. 2007. Progowe stężenie pyłku roślin niezbędne do wywołania objawów alergicznych. — *Otolaryngologia Polska*. 61(4): 591–594. [https://doi.org/10.1016/S0030-6657\(07\)70491-2](https://doi.org/10.1016/S0030-6657(07)70491-2)
- Rowney F.M., Brennan G.L., Skjøth C.A., Griffith G.W., McInnes R.N., Clewlow Y., Adams-Groom B., Barber A., De Vere N., Economou T. 2021. Environmental DNA reveals links between abundance and composition of airborne grass pollen and respiratory health. — *Current Biology*. 31(9): 1995–2003. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.02.019>
- Severova E., Volkova O. 2018. Sampling height in aerobiological monitoring. — In: 11th International Congress on Aerobiology. Programme & Abstract book. Italy. P. 74.
- Severova E., Kopylov-Guskov Y., Selezneva Y., Karaseva V., Yadav S.R., Sokoloff D. 2022. Pollen Production of selected grass species in Russia and India at the levels of anther, flower and inflorescence. — *Plants*. 11(3): 285. <https://doi.org/10.3390/plants11030285>
- Skjøth C.A., Ørby P.V., Becker T., Geels C., Schlünssen V., Sigsgaard T., Bønløkke J.H., Sommer J., Søgaard P., Hertel O. 2013. Identifying urban sources as cause of elevated grass pollen concentrations using GIS and remote sensing. — *Biogeosciences*. 10(1): 541–554. <https://doi.org/10.5194/bg-10-541-2013>
- Suphioglu C. 1998. Thunderstorm asthma due to grass pollen. — *International archives of allergy and immunology*. 116(4): 253–260. <https://doi.org/10.1159/000023953>
- [Torshkhoeva et al.] Торшхоева Р.М., Намазова-Баранова Л.С., Мурадова О.И., Томилова А.Ю., Вознесенская Н.И. 2014. Аллергенспецифическая иммунотерапия у детей с поллинозом. — *Вопросы современной педиатрии*. 13(1): 155–161. <https://doi.org/10.15690/vsp.v13i1.927>
- Volkova O., Severova E. 2019. Poaceae pollen season and associations with meteorological parameters in Moscow, Russia, 1994–2016. — *Aerobiologia*. 35(4): 73–84. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9540-8>
- Wang A., Gopurenko D., Wu H., Lepschi B. 2017. Evaluation of six candidate DNA barcode loci for identification of five important invasive grasses in Eastern Australia. — *PLoS One*. 12(4): e0175338. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175338>
- [Weather] Архив погоды в Рязани. 2023. https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Рязани (дата обращения: 20.01.2023)
- Weber R.W. 2003. Patterns of pollen cross-allergenicity. — *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 112(2): 229–239. <https://doi.org/10.1067/mai.2003.1683>

MONITORING OF GRASS POLLEN IN THE AIR OF RYAZAN

V. S. Karaseva^{1,*}, Yu. M. Selezneva^{1,**}, E. E. Severova^{2,3,***}

¹*S. A. Esenin Ryazan' State University, Dep. of Biology and Teaching Methods
Svoboda Str., 46, Ryazan, 390000, Russia*

²*M. V. Lomonosov Moscow State University, Biological Faculty
Leninskie Gory, 1–12, Moscow, 119234, Russia*

³*Faculty of Biology, Shenzhen MSU-BIT University
Shenzhen, 518172, China*

*e-mail: v.karaseva94@mail.ru

**e-mail: posevina_julia@mail.ru

***e-mail: elena.severova@mail.ru

The pollen of grasses (Poaceae) is one of the main causes of pollinosis in summer worldwide. The pollen of all grass species belongs to the same palynomorphological type and is identified only to the family level during routine pollen analysis. The periods of pollen dispersion in different grass species overlap significantly, while the allergenic properties of different pollen may vary. In this paper, we attempted to detail the grass pollen curve obtained during aerobiological monitoring based on phenological observations. The calculation of the phenological index (a combination of data on the phenological state of the species, its pollen production, and abundance) was used as a basis method. The research was conducted in Ryazan from 2020 to 2022. It was shown that the application of the phenological index has several limitations, and the reasons for the disagreement between phenological and aerobiological data were analyzed. The discrepancies are determined primarily by the difference in the research methodology: the phenological index reflects flowering at specific sites, and pollen traps installed on the roofs of buildings provide insight into a regional pollen spectrum over a large area. The phenological index can be used to assess the contribution of different species to the aerobiological spectrum's composition and determine the pollen dispersion sequence. In Ryazan, *Festuca pratensis*, *Dactylis glomerata*, and *Phleum pratense* should be considered the most dangerous species as the main cause of pollinosis in midsummer.

Keywords: Poaceae, grasses, aerobiology, phenological index, allergenicity

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out with the support from the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-05-50035. The authors express their gratitude to Doctor of Biological Sciences Marina Vasil'yevna Kazakova for her help when describing the sample plots.

REFERENCES

- Alonso A., Bull R.D., Acedo C., Gillespie L.J. 2014. Design of plant-specific PCR primers for the ETS region with enhanced specificity for tribe Bromaeae and their application to other grasses (Poaceae). — *Botany*. 92 (10): 693–699. <https://doi.org/10.1139/cjb-2014-0062>
- Andersson K., Lidholm J. 2003. Characteristics and immunobiology of grass pollen allergens. — *IAA*. 130(2): 87–107. <https://doi.org/10.1159/000069013>
- Becker J., Steckling-Muschack N., Mittermeier I., Bergmann K.C., Böse-O'Reilly S., Buters J., Damialis A., Heigl K., Heinrich J., Kabesch M., Mertes H., Nowak D., Schutzmeier P., Walser-Reichenbach S., Weinberger A., Korbelly C., Herr C., Heinze S., Kutzora S. 2021. Threshold values of grass pollen (Poaceae) concentrations and increase in emergency department visits, hospital admissions, drug consumption, and allergic symptoms in patients with allergic rhinitis: a systematic review. — *Aerobiologia*. 37: 633–662. <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09720-9>
- Behrendt H., Tomczok J., Sliwa-Tomczok W., Kasche A., Ebner von Eschenbach C., Becker W.M., Ring J. 1999. Timothy Grass (*Phleum pratense* L.) Pollen as allergen carriers and initiators of an allergic response. — *International Archives of Allergy and Immunology*. 118(2-4): 414–418. <https://doi.org/10.1159/000024151>
- Brennan G.L., Potter C., De Vere N., Griffith G.W., Skjøth C.A., Osborne N.J., Wheeler B.W., McInnes R.N., Clewlow Y., Barber A. 2019. Temperate airborne grass pollen defined by spatio-temporal shifts in community composition. — *Nature Ecology & Evolution*. 3(5): 750–754. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0849-7>
- Campbell B.C., Al Kouba J., Timbrell V., Noor M.J., Massel K., Gilding E.K., Angel N., Kemish B., Hugenholtz P., Godwin I.D. 2020. Tracking seasonal changes in diversity of pollen allergen exposure: targeted metabarcoding of

- a subtropical aerobiome. — *Science of the Total Environment*. 747: 141189.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141189>
- Cecchi L., Scala E., Caronni S., Citterio S., Asero R. 2021. Allergenicity at component level of sub-pollen particles from different sources obtained by osmolar shock: A molecular approach to thunderstorm-related asthma outbreaks. — *Clin Experimental Allergy*. 51(2): 253–261.
<https://doi.org/10.1111/cea.13764>
- D'Amato G., Cecchi L., Bonini S., Nunes C., Annesi-Maesano I., Behrendt H., Liccardi G., Popov T., Van Cauwenberge P. 2007a. Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. — *Allergy*. 62(9): 976–990.
<https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2007.01393.x>
- D'Amato G., Liccardi G., Frenguelli G. 2007b. Thunderstorm-asthma and pollen allergy. — *Allergy*. 62(1): 11–16.
<https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2006.01271.x>
- Driessen M.N.B.M., Willemse M.T.M., Van Luijn J.A.G. 1989. Grass pollen grain determination by light- and UV-microscopy. — *Grana*. 28(2): 115–122.
<https://doi.org/10.1080/00173138909429962>
- Frisk C.A., Apangu G.P., Petch G.M., Adams-Groom B., Skjøth C.A. 2022. Atmospheric transport reveals grass pollen dispersion distances. — *Science of the Total Environment*. 814: 152806.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152806>
- Galán C., Smith M., Thibaudon M., Frenguelli G., Oteros J., Gehrig R., Berger U., Clot B., Brandao R. 2014. Pollen Monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. — *Aerobiologia*. 30: 385–395.
<https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>
- García-Mozo H. 2017. Poaceae pollen as the leading aeroallergen worldwide: A review. — *Allergy*. 72(12): 1849–1858.
<https://doi.org/10.1111/all.13210>
- Ghitarrini S., Galán C., Frenguelli G., Tedeschini E. 2017. Phenological analysis of grasses (Poaceae) as a support for the dissection of their pollen season in Perugia (Central Italy). — *Aerobiologia*. 33(3): 339–349.
<https://doi.org/10.1007/s10453-017-9473-7>
- Hoffmann-Sommergruber K., Ferreira F.D., Ebner C., Barisani T., Korninger L., Scheiner D., Kraft O., Baumgartner I. 1996. Detection of allergen-specific IgE in tears of grass pollen-allergic patients with allergic rhinoconjunctivitis. — *Clin Experimental Allergy*. 26(1): 79–87.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.1996.tb00059.x>
- Hrabina M., Peltre G., Ree R. Van, Moingeon P. 2008. Grass pollen allergens. — *Clinical & Experimental Allergy Reviews*. 8(1): 7–11.
<https://doi.org/10.1111/j.1472-9733.2008.00126.x>
- Karaseva V.S., Selezneva J.M., Kazakova M.V., Severova E.E. 2021. Phenological analysis of grass pollination in Ryazan'. — *Bull. Moscow Soc. Natur. Biol. Ser.* 126(6): 18–28 (In Russ.).
- Kazakova M.V., Shcherbakov A.V. 2017. Floristicheskaya izuchennost' munitsipal'nykh rayonov Ryazanskoy oblasti [Floristic study of municipal districts of the Ryazan region]. — In: *Trudy Ryaz. Otd. RBO. Vyp. 4: Floristicheskie issledovaniya. Ryazan. P. 84–138* (In Russ.).
- Krinitsina A.A., Omelchenko D.O., Kasianov A.S., Karaseva V.S., Selezneva Y.M., Chesnokova O.V., Shirobokov V.A., Polevova S.V., Severova E.E. 2023. Aerobiological monitoring and metabarcoding of grass pollen. — *Plants*. 12(12): 2351.
<https://doi.org/10.3390/plants12122351>
- Lipiec A., Rapiejko P., Samolinski B., Krzych E. 2005. Correlation between conjunctival provocation test results and conjunctival symptoms in pollinosis-Preliminary report. — *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 12(1): 17–20.
- Meier U. 1997. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. Berlin, Heidelberg. 622 p.
- Nepi M., Franchi G.G., Padni E. 2001. Pollen hydration status at dispersal: cytophysiological features and strategies. — *Protoplasma*. 216: 171–180.
- Nilsson S., Persson S. 1981. Tree pollen spectra in the Stockholm region (Sweden), 1973–1980. — *Grana*. 20(3): 179–182.
<https://doi.org/10.1080/00173138109427661>
- PollenLibrary.com — Allergen and Botanic Reference Library. 2023.
<https://www.pollenlibrary.com/> (Accessed: 29.01.2023)
- Rapiejko P., Stankiewicz W., Szczygielski K., Jurkiewicz D. 2007. Progowe stężenie pyłku roślin niezbędne do wywołania objawów alergicznych. — *Otolaryngologia Polska*. 61(4): 591–594.
[https://doi.org/10.1016/S0030-6657\(07\)70491-2](https://doi.org/10.1016/S0030-6657(07)70491-2)
- Rowney F.M., Brennan G.L., Skjøth C.A., Griffith G.W., McInnes R.N., Clewlow Y., Adams-Groom B., Barber A., De Vere N., Economou T. 2021. Environmental DNA reveals links between abundance and composition of airborne grass pollen and respiratory health. — *Current Biology*. 31(9): 1995–2003.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.02.019>
- Severova E., Volkova O. 2018. Sampling height in aerobiological monitoring. — In: *11th International Congress on Aerobiology. Programme & Abstract book. Italy. P. 74*.
- Severova E., Kopylov-Guskov Y., Selezneva Y., Karaseva V., Yadav S.R., Sokoloff D. 2022. Pollen Production of selected grass species in Russia and India at the levels of anther, flower and inflorescence. — *Plants*. 11(3): 285.
<https://doi.org/10.3390/plants11030285>
- Skjøth C.A., Ørby P.V., Becker T., Geels C., Schläpffen V., Sigsgaard T., Bønløkke J.H., Sommer J., Søgaard P., Hertel O. 2013. Identifying urban sources as cause of elevated grass pollen concentrations using GIS and remote sensing. — *Biogeosciences*. 10(1): 541–554.
<https://doi.org/10.5194/bg-10-541-2013>
- Suphioglu C. 1998. Thunderstorm asthma due to grass pollen. — *International archives of allergy and immunology*. 116(4): 253–260.
<https://doi.org/10.1159/000023953>
- Torshkheeva R.M., Namazova-Baranova L.S., Muradova O.I., Tomilova A.Y., Voznesenskaya N.I. 2014. Aller-

- gen-specific immunotherapy in children with pollinosis. — *Current pediatrics*. 13(1): 155–161 (In Russ.).
<https://doi.org/10.15690/vsp.v13i1.927>
- Volkova O., Severova E. 2019. Poaceae pollen season and associations with meteorological parameters in Moscow, Russia, 1994–2016. — *Aerobiologia*. 35(4): 73–84.
<https://doi.org/10.1007/s10453-018-9540-8>
- Wang A., Gopurenko D., Wu H., Lepschi B. 2017. Evaluation of six candidate DNA barcode loci for identification of five important invasive grasses in Eastern Australia. — *PloS One*. 12(4): e0175338.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175338>
- Weather archive in Ryazan. 2023.
https://rp5.ru/Weather_Archive_in_Ryazan (accessed: 20.01.2023)
- Weber R.W. 2003. Patterns of pollen cross-allergenicity. — *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 112(2): 229–239.
<https://doi.org/10.1067/mai.2003.1683>