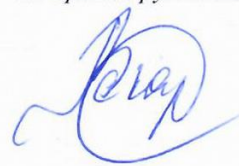


На правах рукописи



Карасева Вера Сергеевна

ПРОФИЛЬ АЭРОПАЛИНОЛОГИЧЕСКОГО СПЕКТРА Г. РЯЗАНИ

1.5.9. – Ботаника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Рязань – 2025

Работа выполнена на кафедре биологии и методики ее преподавания института естественных наук федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина» (РГУ имени С.А. Есенина)

Научный руководитель:

Селезнева Юлия Михайловна,

кандидат биологических наук, доцент, директор института естественных наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой биологии и методики ее преподавания федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина».

Официальные оппоненты:

Панасенко Николай Николаевич,

доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры биологии естественно-географического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского».

Волкова Елена Михайловна,

доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедрой биологии естественно-научного института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук.

Защита состоится « » _____ 2025 г. на заседании диссертационного совета 24.1.022.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина Российской академии наук» (ГБС РАН) по адресу: 127279, г. Москва, ул. Ботаническая, д. 4, конференц-зал. Факс: +7 (499) 977-91-72.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГБС РАН и на сайте www.gbsad.ru.
Автореферат разослан « » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук



Рябченко Андрей Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия во всем мире отмечается резкий рост распространенности аллергических заболеваний, что ставит эту проблему в число наиболее актуальных, после онкологии и сердечно-сосудистых заболеваний (Абдукаюмов, 2020; Ахмедова и др., 2023 (а); Ахмедова и др., 2023 (б)). По данным Всемирной организации здравоохранения, к 2050 г. каждый второй житель нашей планеты будет страдать от аллергических заболеваний (Dbouk, 2022). Одним из наиболее распространенных проявлений аллергии в мире на сегодняшний день является поллиноз (Горячкина, 2012; Lake, 2017; Мигачёва, 2022). Для больных, страдающих пыльцевой аллергией, и лечащих их врачей крайне необходимы данные аэропалинологического мониторинга, позволяющие планировать превентивную терапию, а в сезон пыления – корректировать прием лекарств, диету и образ жизни в целом. Такая информация должна быть ежедневной и легкодоступной.

Подсчет количества пыльцы уже более 50 лет используется для оценки воздействия аллергенов как в медицинской практике, так и в клинических и экспериментальных исследованиях (Allergenic pollen, 2013). В связи с лавинообразным ростом числа аллергических заболеваний в последние годы наблюдается и рост числа станций мониторинга. На сегодняшний день наиболее аэропалинологически изученными во всем мире остаются регионы Европы. В России число постоянно функционирующих станций меняется из года в год. Самые длительные непрерывные ряды наблюдений получены на станциях в Москве и Рязани.

Всё вышесказанное определило рамки нашего диссертационного исследования, посвященного мониторингу аэропалинологических спектров г. Рязани, который позволяет определить точную концентрацию пыльцевых зёрен в атмосфере. Аэробиологические наблюдения на территории региона были начаты в 2007 г. Ю.М. Селезневой (Посевиной). На основании наблюдений Юлии Михайловны был построен первый качественный календарь пыления для г. Рязани. В период с 2007 по 2014 гг. при проведении исследований использовался гравиметрический метод отбора проб, который не позволяет охарактеризовать спектр количественно. Начиная с 2015 г., пыльцевой мониторинг в г. Рязани проводится с использованием волюметрического пыльцеуловителя, позволившего впервые получить и представить количественные данные.

Цель исследования – провести качественный и количественный анализ состава аэропалинологического спектра г. Рязани.

Задачи исследования:

1. Составить усредненный календарь пыления для г. Рязани на основе волюметрических данных за 2015-2023 гг.;
2. Провести анализ динамики пыления основных аллергенных таксонов аэропалинологического спектра г. Рязани;
3. Детализировать кривые пыления злаков на основе данных об их пыльцевой продуктивности, распространении и фенологии, а также методом меташтрихкодирования;
4. Выявить происхождение пыльцы *Ambrosia* в составе аэробиологического спектра г. Рязани и проанализировать почасовую ритмику пыления *Ambrosia artemisiifolia*;
5. Провести оценку аллергологической значимости основных таксонов аэропалинологического спектра с помощью анализа поисковых запросов в сети Интернет.

Научная новизна. Впервые за девять лет наблюдений (2015-2023 гг.) в г. Рязани проведены аэропалинологические исследования с помощью волюметрического пыльцеуловителя, определен количественный состав аэропалинологического спектра и разработан усредненный календарь пыления за 2015-2023 гг. В работе проанализирована динамика пыления основных аллергенных таксонов аэропалинологического спектра г. Рязани (*Alnus*, *Betula*, *Рoaceae*, *Artemisia*, *Ambrosia*). Впервые проведен расчет пыльцевой продуктивности наиболее широко распространенных видов *Рoaceae* как основных аллергенов летнего периода; детализированы кривые пыления *Рoaceae*, выявлены виды злаков г. Рязани и периоды их пыления, наиболее опасные для аллергиков. Впервые проанализировано

происхождение пыльцы *Ambrosia* в составе аэробиологического спектра региона и выявлена почасовая ритмика пыления *Ambrosia artemisiifolia*.

Теоретическая и практическая значимость. Выявленные долговременные тренды могут дополнить данные, подтверждающие влияние глобального потепления на особенности пыления основных таксонов пыльцевого спектра. Предложенная (модифицированная) методика расчета пыльцевой продуктивности злаков и установленные значения этого показателя для отдельных видов могут использоваться при дешифровке кривых пыления Poaceae в других регионах. Установлено, что высокая концентрация пыльцы *Ambrosia* в воздухе г. Рязани в основном связана с локальным происхождением. Результаты текущего мониторинга на протяжении всего периода исследования размещались в открытом доступе на аллергологическом портале «Аллерготоп» (<https://allergotop.com/about>). Данные пыльцевого мониторинга помогали информировать пациентов и врачей-аллергологов об изменениях пыльцевого фона в г. Рязани.

Методология и методы исследования. Аэробиологический мониторинг проводился по стандартной международной методике (Gala'n et al., 2014) с помощью волюметрического пыльцеуловителя Lanzoni-VPPS 2000 и (или) Lanzoni-VPPS 2010. Образцы воздуха анализировались методом световой микроскопии, всего было исследовано 1892 препарата. Для детализации кривых пыления злаков использовались фенологические наблюдения и молекулярно-генетические методы. Метастрихкодирование было выполнено на биологическом факультете ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова» с использованием маркерных регионов ITS1 и ITS2 (данные по дешифровке кривых пыления злаков методом меташтрихкодирования предоставлялись А.А. Криницыной, А.С. Касьяновым и Д.О. Омельченко). Фенологические наблюдения за амброзией проводились на экспериментальном участке, расположенном на Биостанции РГУ имени С.А. Есенина. Для сопоставления аэробиологических и аллергологических данных в 2022-2023 гг. использовался сервис «Яндекс Вордстат».

Положения, выносимые на защиту:

1. Начало, продолжительность и интенсивность пыления основных аллергенных растений в г. Рязани значительно варьировали на протяжении последних 9 лет. Значимое увеличение пыльцевой продукции характерно только для *Betula*;

2. Для оценки вклада разных видов злаков в состав аэробиологического спектра г. Рязани и определения последовательности их пыления могут быть использованы молекулярные методы (меташтрихкодирование) и фенологический индекс, однако их применение имеет ряд ограничений. Для Рязани наиболее опасными с аллергологической точки зрения следует считать *Festuca pratensis*, *Dactylis glomerata* и *Phleum pratense*;

3. В составе воздушного спектра г. Рязани ежегодно отмечается пыльца *Ambrosia*, содержание которой варьирует из года в год. Высокая концентрация пыльцы в воздухе связана с локальным пылением амброзии.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Основные результаты работы апробированы на всероссийских и международных конференциях: Всероссийской конференции студентов и молодых ученых с международным участием (Рязань, 2017), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Москва, Ботанический сад биологического факультета МГУ, 2022 г.), Международном молодежном научном форуме «Ломоносов-2022» (Москва, 2022), XV Всероссийской палинологической конференции, посвященной памяти доктора геолого-минералогических наук В.С. Волковой и доктора геолого-минералогических наук М.В. Ошурковой (Москва, 2022), Международной научно-практической конференции «Защита и карантин растений» (ФГБУ «ВНИИКР», 2023), XV Всероссийской молодежной научной школе-конференции «МЕРИДИАН» (ИГ РАН, 2023), XVI Всероссийской научно-практической конференции «Human Health» (Казань, 2024), XI Международном молодёжном научном медицинском форуме «Белые цветы», посвященном 150-летию Н.А. Семашко (Казань, 2024), I Научно-практической конференции с международным участием «Фундаментальные, прикладные вопросы биологии и естественно-научного образования» (Рязань, 2024); представлены на заседаниях Рязанского отделения

Русского ботанического общества (27 апреля 2023 г. и 21 марта 2024 г.) и опубликованы в ведущих ботанических периодических изданиях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 5 статей в журналах, рекомендованных Перечнем ВАК РФ, в том числе 3 – в журналах, индексируемых в международных базах данных «Web of Science Core Collection (Q1)».

Личный вклад автора. Автором определены цель и задачи работы, отобраны и проанализированы образцы проб воздуха, получаемые непрерывно на протяжении 9 лет наблюдений (2015-2023 гг.). Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, были получены, проанализированы и интерпретированы лично соискателем или при его непосредственном участии. Автор самостоятельно сформулировал основные положения, выносимые на защиту, и выводы. Результаты исследований оформлены в виде научных публикаций, в том числе в журналах, рекомендованных Перечнем ВАК РФ, а также апробированы на всероссийских и международных конференциях и форумах, заседаниях Рязанского отделения Русского ботанического общества. Все сообщения по теме диссертационного исследования на конференциях и семинарах были подготовлены лично соискателем.

Связь работы с научными программами. Раздел работы, посвященный детализации кривых пыления злаков, выполнен при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-05-50035 «Микромир».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы, который включает 399 источников, в том числе 273 на иностранном языке, приложений. Работа содержит 38 рисунков и 9 таблиц (в том числе таблицы приложения). Объем диссертации составляет 202 страницы машинописного текста.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность своему научному руководителю – кандидату биологических наук, доценту, директору института естественных наук РГУ имени С.А. Есенина Юлии Михайловне Селезневой, а также кандидату биологических наук, ведущему научному сотруднику лаборатории морфологии и систематики высших растений биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Елене Эрастовне Северовой за мудрое руководство, поддержку на всех этапах написания работы, ценные советы и рекомендации, терпение и отзывчивость. Автор благодарен доктору биологических наук, доценту, профессору кафедры биологии и методики ее преподавания института естественных наук РГУ имени С.А. Есенина Казаковой Марине Васильевне за наставления и консультации. За предоставление данных по дешифровке кривых пыления злаков методом меташтрихкодирования автор благодарит ведущего научного сотрудника биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Криницыну Анастасию Александровну, научного сотрудника ИОГен РАН Касьянова Артема Сергеевича, научного сотрудника ИППИ РАН Омельченко Дениса Олеговича. За помощь в сборе материала автор благодарит обучающихся кафедры биологии и методики ее преподавания РГУ имени С.А. Есенина – Бирюкову Ирину Игоревну и Рогову Анастасию Петровну. Также автор выражает глубокую признательность родным и близким за помощь при написании диссертации, которые на протяжении многих лет поддерживали и направляли автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АЭРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Глава 1 включает в себя 7 разделов. В разделе **1.1. «История развития аэробиологических исследований»** описываются эксперименты по изучению пылевых зерен в воздухе, начиная с XIX века и по настоящее время. Анализируются результаты исследований по оценке качественного и/или количественного состава аэропалинологического спектра с использованием гравиметрических, волюметрических и автоматических ловушек за рубежом и в России. В разделе **1.2. «Аэробиологические исследования в г. Рязани»** подробно

рассматриваются результаты первых аэропалинологических исследований на территории г. Рязани, которые были начаты в 2007 г. Ю.М. Посевиной с использованием гравиметрического пылеуловителя. В разделе **1.3. «Аллергенные свойства пыльцы и её пороговые концентрации»** анализируются характерные особенности наиболее значимых растительных аллергенов (Bet v1 и его гомологов, липид-транспортирующих белков (LTP), профилинов, полкальцинов, экспансинов (аллергенов группы 1) и аллергенов группы 5). Помимо этого, обсуждаются результаты исследований, посвященных наиболее распространенным и изученным с аллергологической точки зрения пылевым типам. В разделе **1.4. «Влияние климатических изменений на пыление растений. Анализ долговременных трендов»** рассматриваются исследования, посвященные анализу долговременных трендов пыления растений для оценки произошедших за длительное время модификаций в сроках, продолжительности и интенсивности пыления отдельных таксонов, которые возникают под действием изменения температуры, влажности и концентрации углекислого газа в атмосфере. В разделе **1.5. «Моделирование и прогнозирование состава аэробиологического спектра»** анализируются исследования, посвященные прогностической аэробиологии. Рассматриваются прогностические и реконструирующие (анализирующие) модели, позволяющие как проанализировать текущую аэропалинологическую обстановку и исследовать эпизоды обратных траекторий движения воздушных масс, так и предсказать потенциальную концентрацию пыльцы в воздухе любого региона, а также – сроки пыления того или иного таксона. Отдельный раздел (**1.6. «Амброзия как инвазионный источник аллергенной пыльцы»**) посвящен распространению и интенсивности пыления инвазивного сорняка *Ambrosia*. Такой интерес к этому аллергенному растению обусловлен его хорошей адаптацией к условиям окружающей среды и быстрому вторжению и натурализации в разных регионах. В разделе **1.7. «Злаки как одна из причин поллинозов в мире»** рассматриваются различные подходы к идентификации пыльцы злаков в составе аэробиологического спектра. Необходимость дешифровки кривой пыления *Poaceae* связана с морфологическим сходством пыльцы большинства дикорастущих видов и их разной аллергенной активностью.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Методика проведения аэробиологических исследований. Аэробиологический мониторинг проводился с помощью волюметрического пылеуловителя Хирст-типа Lanzoni-VPPS 2000 и (или) Lanzoni-VPPS 2010, установленного на крыше четырехэтажного корпуса РГУ имени С.А. Есенина (54,6269° с.ш., 39,6916° в.д.) на высоте 18,54 м от поверхности земли с конца февраля-начала марта до конца сентября-начала октября 2015-2023 гг. по стандартной международной методике (Gala'n et al., 2014). В 2020-2023 гг. для проведения исследований мы использовали сразу 2 пылеуловителя. Образцы, отобранные дополнительной ловушкой в 2020-2022 гг. использовались для идентификации пылевых зерен злаков методом меташтрихкодирования. В сентябре 2023 г. дополнительная ловушка была установлена на Биостанции РГУ имени С.А. Есенина на высоте 1,5 метра от поверхности земли для определения суточного ритма пыления амброзии.

Образцы воздуха анализировались методом световой микроскопии на микроскопе «Levenhuk 625» или «Микмед-6» («ЛОМО») при увеличении $\times 400$. Определение и подсчет пылевых зерен проводились в двенадцати транссектах, перпендикулярных продольной оси препарата. При анализе суточной ритмики пыления амброзии в 2023 г. подсчет и анализ осуществлялись в 24 транссектах. Число пылевых зёрен, зарегистрированных в образце, пересчитывалось на единицу объема воздуха (Мейер-Меликян, 1999). Всего за период исследований было изготовлено и проанализировано **1892 образца**.

Результаты анализа образцов легли в основу усредненного календаря пыления, который строился подекадно и был визуализирован в программе Excel (Allergy Service, 1994). Для представления данных были выбраны следующие классы концентраций (пз/м³): 0, 1-2, 3-5, 6-11, 12-24, 25-49, 50-99, 100-199, 200-399, 400-799, 800-1600, >1600. В состав календаря пыления

вошли таксоны, пыльца которых количественно доминировала в спектре в различные периоды и/или характеризуется ярко-выраженными аллергенными свойствами: *Alnus*, *Corylus*, *Betula*, *Populus*, *Ulmus*, *Acer*, *Fraxinus*, *Salix*, *Quercus*, *Pinus* Poaceae, *Plantago*, *Rumex*, *Urtica*, *Chenopodiaceae*, *Artemisia*, *Ambrosia*.

Анализ динамики пыления основных таксонов спектра проводился по следующим показателям: дата первого и последнего появления пыльцы в спектре, начало, продолжительность и конец основного периода пыления (периода, в течение которого в воздухе циркулировало 90 % от суммарного годового содержания пыльцы), дата и значение пика пыления, суммарное содержание пыльцы за сезон (Nillson, Persson, 1981).

Метеорологические данные были получены на сайте http://rp5.in/Архив_погоды_в_Рязани (Archiv, 2023). Анализ эпизодов дальнего заноса проводился с использованием метода реконструкции обратных траекторий, реализованном в модели HYSPLIT (2024).

Статистическая обработка данных была проведена в программах «Past4.03» и «Microsoft Excel» с использованием методов описательной статистики, корреляционного и регрессионного анализов.

2.2. Методы детализации кривых пыления злаков.

2.2.1. Изучение морфологии пыльцы злаков. Злаки – один из основных компонентов летнего пыльцевого спектра, пыльца которых может быть определена только до уровня семейства (Driessen et al., 1989). В нашей работе мы исследовали морфологию пыльцы 10 видов злаков на постоянных препаратах в глицерин-желатине по методике, принятой в аэробиологических исследованиях для изготовления референсных коллекций. Пыльцу 10 видов (*Bromopsis inermis* Leyss., *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Dactylis glomerata* L., *Elymus repens* (L.), *Festuca pratensis* Huds., *Lolium perenne* L., *Phleum pratense* L., *Poa annua* (L.), *Poa pratensis* L. и *Poa trivialis* L.) без предварительной обработки помещали на предметное стекло и добавляли каплю глицерин-желатины, подкрашенной сафранином. Препараты просматривали и фотографировали на световом микроскопе Микмед-6» («ЛОМО»), у 25 пыльцевых зерен в каждом образце измеряли длину полярной оси и экваториального диаметра при увеличении $\times 400$. Для пяти видов (*Phleum pratense*, *Calamagrostis epigeios*, *Dactylis glomerata*, *Poa pratensis*, *Festuca pratensis*) были проанализированы спектры вторичной флюоресценции – параметр, используемый в автоматических ловушках для определения таксонов. Для анализа использовался автоматический детектор аэрозолей Rapid E+ (Швейцария).

2.2.2. Детализация кривых пыления злаков на основе фенологических наблюдений.

Детализация кривой пыления злаков проводилась на основе фенологических наблюдений и с использованием молекулярных методов (меташтрихкодирование). Алгоритм сопоставления качественных фенологических наблюдений и количественных аэробиологических данных был предложен S. Ghitarrini с соавторами (2017). В нашем исследовании фенологические наблюдения проводились в течение 2,5 месяцев (конец мая – конец июля) через каждые семь дней на 3 (в 2020 г.) и на 5 (в 2021-2022 гг.) пробных площадках размером 10×10 м, заложенных на расстоянии 1-10 км от места установки пыльцевой ловушки (Карасева и др., 2021). Фенологические особенности изучались на примере 25 экземпляров каждого из десяти наиболее распространенных видов Poaceae: *Bromopsis inermis* (Leyss.), *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Dactylis glomerata* L., *Elymus repens* (L.) Nevski, *Festuca pratensis* (Huds.), *Lolium perenne* L. *Phleum pratense* L., *Poa pratensis* L., *Poa annua* L., *Poa trivialis* L.

На основании фенологических наблюдений рассчитывались фенологический индекс и суммарный фенологический индекс для каждого вида злаков по всем площадкам в каждую дату наблюдений. Фенологический индекс (Ghitarrini et al., 2017) представлял собой произведение трех параметров: пыльцевая продуктивность, обилие вида и фенофаза. В методике Ghitarrini et al. (2017) пыльцевая продукция видов не оценивалась, одно- и многолетним видам придавались разные коэффициенты. В нашем случае среди изученных видов злаков почти все относились к многолетним (за исключением малолетнего вида *Poa annua*), поэтому мы использовали

реальные значения пыльцевой продукции, рассчитанные для каждого вида (Карасева и др. 2021, Severova et al, 2022). Оценка проективного покрытия видов на пробных площадках осуществлялась по шкале Браун-Бланке (Braun-Blanquet, 1964). Определение фенологического состояния видов проводилось по шкале BVCH Meier (1997), согласно которой каждой фазе присваивался коэффициент от 0 до 2.

2.2.3. Детализация кривых пыления злаков с использованием молекулярных методов (меташтрихкодирование). Параллельно с фенологическими наблюдениями в качестве дополнительного метода дешифровки кривых пыления злаков нами использовались молекулярные методы. Меташтрихкодирование образцов воздуха, отобранных нами в период с 2020 по 2022 гг., проводилось на кафедре высших растений биологического факультета МГУ (данные по дешифровке кривых пыления злаков методом меташтрихкодирования предоставлялись А.А. Криницыной, А.С. Касьяновым и Д.О. Омельченко) в рамках гранта РФФИ 19-05-50035 «Микромир» (Krinitina et al., 2023). Для анализа были выбраны фрагменты лент, соответствующие дням с наибольшей концентрацией пыльцы злаков в атмосфере (не менее 50 пз/м³ по результатам аэробиологических наблюдений), каждый фрагмент соответствовал одним суткам работы пыльцевой ловушки. Всего за три года наблюдений были отобраны и проанализированы 84 фрагмента. В работе использовались два ядерных маркера, ITS1 и ITS2 (Krinitina et al., 2023).

2.3. Методика проведения фенологических наблюдений за амброзией. Сопоставление аэробиологических и фенологических данных проводилось также для *Ambrosia artemisiifolia*. Фенологические наблюдения охватывали период с конца июля до конца сентября 2023 г. и были проведены на пробной площадке, расположенной на Биологической станции РГУ имени С.А. Есенина. Для изучения онтогенеза 1000 семян *A. artemisiifolia*, собранных в 2022 г. в г. Туапсе (Краснодарский край), были высеяны под зиму в 2023 г. в открытый грунт на экспериментальном участке Биостанции. Наблюдение за развитием растений в 2023 г. и определение их фенологических стадий осуществлялось 2-3 раза в неделю с начала прорастания и до отмирания большинства особей. Фиксировались стадии виргинильного (виргинильные растения) и генеративного (бутонизация, полное цветение, плодоношение) периодов (Работнов, 1950; Петрова, 2019).

2.4. Методика оценки аллергологической значимости основных таксонов аэропалинологического спектра с помощью анализа поисковых запросов в сети Интернет. Для сопоставления аэробиологических и аллергологических данных в 2022-2023 гг. мы использовали сервис «Яндекс Вордстат». Поисковые запросы анализировались с марта по сентябрь (октябрь) 2022-2023 гг. с периодичностью в одну неделю. Для этого был составлен список из 14 терминов: «пыльца», «ольха», «пыльца березы», «пыльца злаков», «пыльца полыни», «полынь», «пыльца амброзии», «амброзия», «поллиноз», «аллергия», «зуд», «чихание», «покраснения», «не хватает воздуха».

ГЛАВА 3. СОСТАВ АЭРОПАЛИНОЛОГИЧЕСКОГО СПЕКТРА Г. РЯЗАНИ

3.1. Качественный и количественный состав аэропалинологического спектра. Сезон пыления на территории г. Рязани и Рязанской области длился около 6 месяцев: с конца февраля (2020 г.) или с марта (2015-2019 гг., 2021-2023 гг.) до середины – конца сентября (в зависимости от года исследований). Анализ сроков начала вегетационного периода за 9 лет наблюдений не выявил никаких направленных изменений, в каждый конкретный год исследований пыление начиналось в разное время, даты первого появления пыльцы в воздухе различались на 1-4 недели в зависимости от текущих погодных условий. Продолжительность сезона пыления в регионе составила в среднем 186 дней ($M=186$, $Cv=8,4\%$, $Me=183,5$, $min=170$, $max=217$), значимых трендов выявлено не было.

За 9 лет наблюдений в воздухе региона всего было зафиксировано 38 пыльцевых типов. Качественный состав аэропалинологического спектра г. Рязани за 2015-2023 гг. хорошо

соответствовал данным, полученным ранее Ю.М. Посевиной (2011) с помощью гравиметрического пылеуловителя. Однако в нашей работе **впервые** представлены количественные данные. Результаты исследований отражены в усредненном календаре пыления за 2015-2023 гг. (таблица 1).

Во все годы наблюдений в составе аэропалинологического спектра доминировала пыльца анемофильных растений. Ее доля составляла от 99% (2020 г.) до 99,7% (2021 г., 2023 г.). Доля пыльцы древесных растений в составе спектра варьировала от 42,9% до 77,7%. На общее содержание пыльцы древесных растений, в первую очередь, оказывала влияние пылецевая продукция *Betula*. Именно концентрация пылецевых зерен березы во все годы наблюдений определяла, пыльца древесных или травянистых растений будет преобладать в спектре в течение всего вегетационного сезона.

Вегетационный сезон на территории г. Рязани условно подразделялся на 3 волны (периода) пыления (Посевина, 2011). Первая волна отмечалась с начала сезона до середины мая и была связана с пылением древесных таксонов. Этот период характеризовался самым высоким суммарным содержанием пыльцы в воздухе, составляющим более 50 % от годовой суммы. Открывали первую волну пыления раннецветущие серёжкоцветные (ольха и орешник), которых постепенно сменяла берёза. Последняя являлась доминирующим таксоном в первую волную пыления – на её долю приходилось более 80 % от суммарного содержания пыльцы за этот период. В составе спектра также была отмечена пыльца *Acer*, *Populus*, *Salix*, *Quercus*, *Fraxinus*, *Ulmus*. Помимо этого, единично в воздухе региона ежегодно фиксировались пылецевые зерна *Cupressaceae*, *Carex*, *Juglans*, *Larix*, *Rosaceae*.

Вторая волна пыления длилась с середины мая до середины июля. Индикаторными таксонами этого периода выступали пылецевые зерна злаков и сосны, которые, в зависимости от погодных условий, появлялись в составе спектра почти одновременно или последовательно (таблица 1). Кроме того, в первой половине лета в воздухе в небольших количествах отмечались пылецевые зерна *Betula*, *Urtica*, *Quercus*, *Fraxinus*, *Salix*, *Chenopodiaceae*, *Plantago*, *Rumex*, *Picea*, единично – *Aesculus*, *Apiaceae*, *Centaurea*, *Cichorium*, *Cupressaceae*, *Carex*, *Juglans*, *Tilia*, *Labiatae*, *Syringa*, *Caryophyllaceae*, *Cruciferae*, *Rosaceae*, *Ranunculaceae*.

Третья волна – это период пыления разнотравья, который длился с середины июля до конца вегетационного сезона. Доминирующими пылецевыми типами в этот период были *Artemisia* и *Urtica* (таблица 1). Руководящим таксоном при выделении поздне-летней волны пыления выступала полынь из-за её высокой аллергенности (pollenlibrary.com). Помимо этого, в составе аэропалинологического спектра отмечалась пыльца *Chenopodiaceae*, *Ambrosia*, *Plantago*, *Roaceae*, *Rumex*. Пылецевые зерна *Apiaceae*, *Asteraceae*, *Cichorium*, *Tilia*, *Caryophyllaceae*, *Cruciferae*, *Fabaceae*, *Epilobium*, *Tetrads*, *Lilium* отмечались в воздухе единично.

Таблица 1. Усредненный календарь пыления г. Рязани за 2015-2023 гг.

Рязань, 2015-2023 гг.																
	февраль		март		апрель		май		июнь		июль		август		сентябрь	
<i>Betula</i>																
<i>Alnus</i>																
<i>Corylus</i>																
<i>Acer</i>																
<i>Populus</i>																
<i>Salix</i>																
<i>Quercus</i>																
<i>Fraxinus</i>																
<i>Ulmus</i>																
<i>Pinus</i>																
Chenopodiaceae																
<i>Ambrosia</i>																
<i>Artemisia</i>																
<i>Plantago</i>																
Poaceae																
<i>Rumex</i>																
<i>Urtica</i>																

концентрация (пз/м3)

	0 п.з.
	1-2 п.з.
	3-5 п.з.
	6-11 п.з.
	12-24 п.з.
	25-49 п.з.
	50-99 п.з.
	100-199 п.з.
	200-399 п.з.
	400-799 п.з.
	800-1600 п.з.
	>1600 п.з.

3.2. Анализ сезонной ритмики пыления основных аллергенных таксонов аэропаллинологического спектра

В данном разделе мы подробно останавливаемся на анализе особенностей пыления ключевых аэроаллергенов нашего региона – *Alnus*, *Betula*, *Poaceae*, *Artemisia*, *Ambrosia*.

Сроки начала пыления всех таксонов за весь период наблюдений существенно варьировали: между первым появлением пыльцы и началом локального пыления отмечался большой временной разрыв. Особенно ярко это проявлялось у раннецветущих древесных растений, у которых разница могла составлять до 70 дней (например, 61 день у *Betula* в 2022 г.) (рисунок 1). Эти эпизоды мы рассматривали как дальний транспорт пыльцы из соседних регионов.

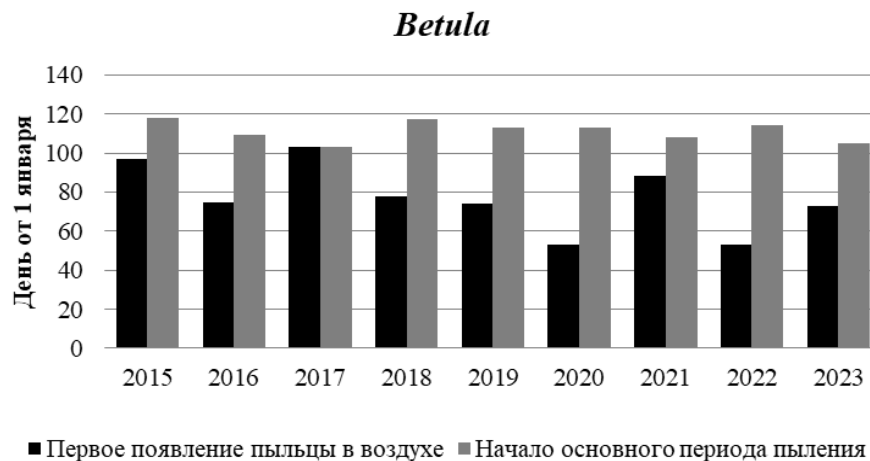


Рисунок 1. Сроки появления первых пыльцевых зерен *Betula* в воздухе г. Рязани: 2015-2023 гг.

Предполагаемые эпизоды дальнего заноса были исследованы при помощи анализа обратных траекторий движения воздушных масс, выполненного с использованием онлайн-модели HYSPLIT (2024). Анализ HYSPLIT-моделей показал, что регистрация в составе спектра пыльцевых зерен *Alnus*, *Betula*, *Poaceae*, *Artemisia* и *Ambrosia* раньше сроков их локального пыления сопряжена с ветрами южных, юго-западных и юго-восточных направлений. Регионами-потенциальными источниками, вероятно, являлись южные регионы России, Украины, Польши и Беларуси, где пыление этих таксонов начиналось гораздо раньше и опережало локальное пыление в г. Рязани на несколько недель. Более точно определить регионы-источники пыльцы не представляется возможным из-за отсутствия для них данных пыльцевого мониторинга.

При анализе **сроков начала локального пыления** основных аллергенных растений в г. Рязани тенденции к более раннему старту за 9 лет наблюдения выявлено не было: все построенные модели линейной регрессии оказались незначимыми.

Продолжительность основного периода пыления в большей степени варьировала у *Betula* ($M=24$, $Cv = 35,2 \%$, $Me = 23$, $max=43$, $min=16$) и *Alnus* ($M=26,5$, $Cv = 53,2 \%$, $Me = 20,5$, $max=58$, $min=14$), в меньшей – у злаков, полыни и амброзии (коэффициент вариации составил 15,1 %, 28,8 % и 18 % соответственно).

Анализ **интенсивности пыления** основных аллергенных таксонов выявил значимое увеличение пыльцевой продукции березы за последние 9 лет ($R^2=0,4038$, $p=0,011469$) (рисунок 2). Увеличение пыльцевой продукции древесных растений в последние десятилетия отмечалось во многих исследованиях (Spieksma et. al, 1995; Frei, 1998; Levetin, 2001; Rasmussen, 2002; Ziska et. al, 2019; Adams-Groom, 2022), что связывают в первую очередь с глобальными изменениями климата.

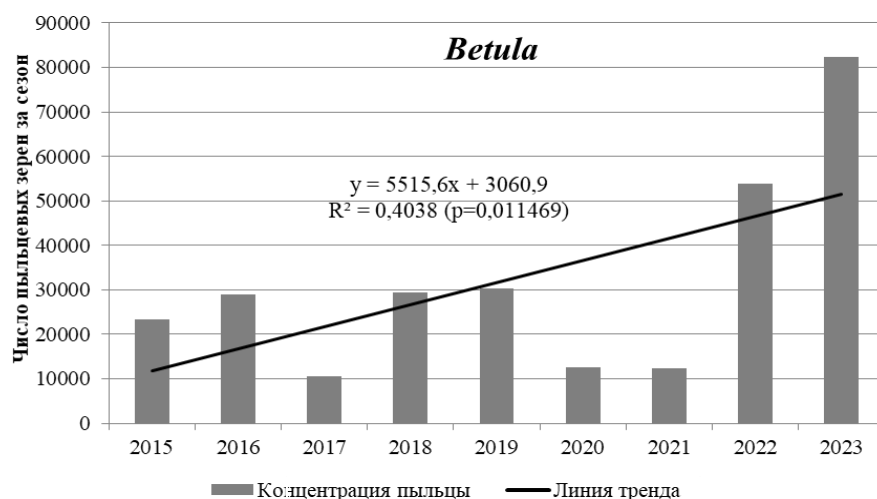


Рисунок 2. Суммарное годовое содержание пыльцы *Betula* в составе аэропалинологического спектра г. Рязани (2015-2023 гг.) (пз/м³)

Анализ пыльцевой продукции *Betula* позволил проследить чередование сезонов с высокой и низкой концентрациями пыльцы (рисунок 2), что подтверждается другими исследователями (Северова и др., 2001; Severova, 2006). В нашей работе у березы наблюдался трёхгодичный цикл, который нарушался, поэтому для получения достоверных результатов требуется увеличение длительности наблюдений.

Положительный тренд, выявленный при анализе интенсивности пыления *Poaceae*, оказался незначимым ($R^2=0,3331$, $p=0,1037$) (рисунок 3). Вариабельность суммарного годового содержания пыльцы злаков в городе связана в первую очередь с режимом кошения газонов. Так, наиболее высокие значения этого показателя были зарегистрированы в 2020 г. (3625 пз/м³), что совпало с пандемией COVID-19. В этот год работа сотрудников управления благоустройства и управляющих компаний по покосу газонов была приостановлена из-за внедрения запретов и ограничений, что нашло свое отражение в составе пыльцевого спектра.

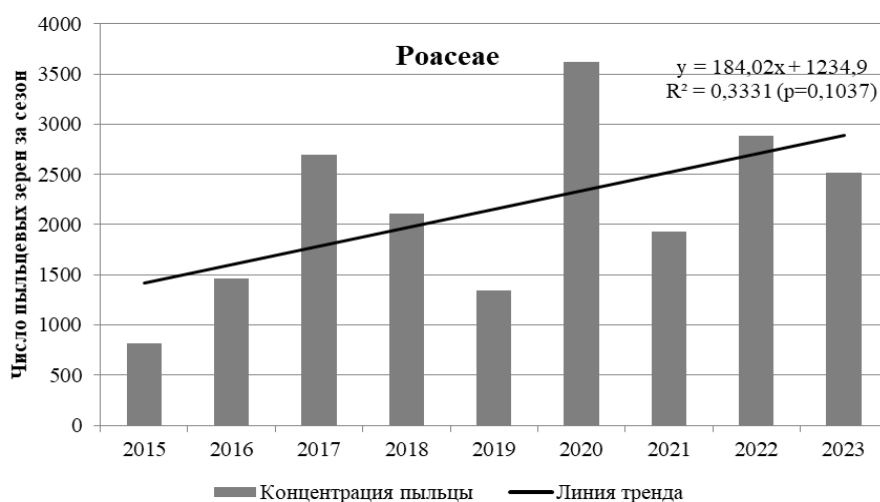


Рисунок 3. Суммарное годовое содержание пыльцы *Poaceae* в составе аэропалинологического спектра г. Рязани (2015-2023 гг.) (пз/м³)

Для ольхи, полыни и амброзии значимые направленные изменения суммарного годового содержания пыльцы не выявлены.

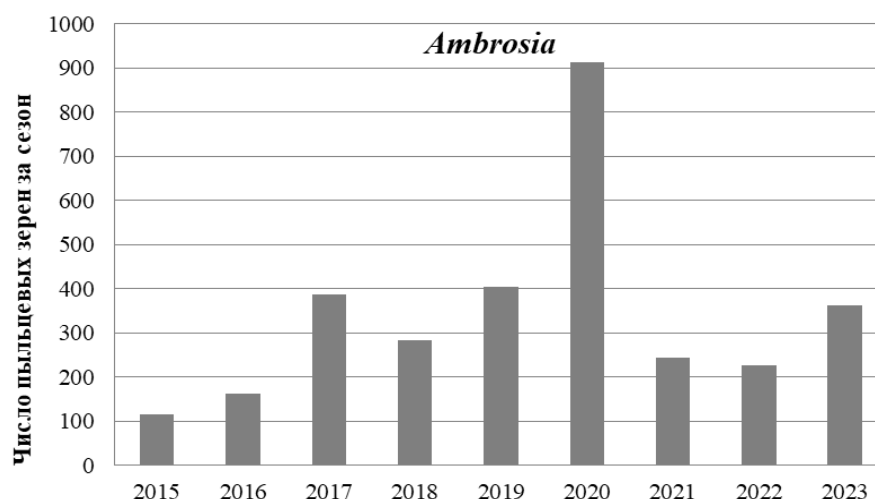


Рисунок 4. Суммарное годовое содержание пыльцы *Ambrosia* в составе аэропалинологического спектра г. Рязани (2015-2023 гг.) (пз/м³)

Пыльца амброзии в атмосфере г. Рязани была впервые зафиксирована в 2007 г. Ю.М. Посевиной (2011) и с той поры отмечалась регулярно. Рекордным по уровню концентрации пыльцы амброзии стал сезон 2020 г. (рисунок 4): ее суммарное годовое содержание составило 914 пз, более чем в три раза превысив показатели, зафиксированные в Рязани ранее. Также в 2020 г. была установлена рекордно высокая суточная концентрация пыльцевых зерен амброзии за всю историю наблюдений в нашем регионе – 349 п.з./м³ (31.08.2020 г.) (Карасева и др., 2022). Этот показатель, как и в случае с *Roaseae*, мы связываем с пандемией COVID-19 и наложением двух событий – интенсивного локального цветения и дальнего переноса пыльцы из южных и юго-западных регионов.

3.3. Анализ суточной ритмики пыления амброзии в г. Рязани. В нашем исследовании помимо анализа сезонной ритмики пыления амброзии, была исследована также и её суточная динамика. Результаты анализа аэропалинологических образцов в 2023 г. показали, что суточный пик пыления амброзии приходился на период с 10.00 до 15.00 ч. Необходимо отметить, что эти данные несколько расходятся с показателями, полученными в других регионах России. Так, Северова Е.Э. с соавторами (2008) отмечали, что суточный максимум пыления амброзии в средней полосе в большинстве случаев приходится на утренние или полуденные часы (8-14 часов, чаще всего в интервале 10-12 часов) (Северова и др., 2008; Северова, Майоров, 2025). Это может быть связано с особенностями развития растения в условиях «вторичного ареала», а также с локальными метеорологическими условиями, которые нами не фиксировались.

При сопоставлении данных по суточной ритмике пыления амброзии, полученных в эксперименте на пробной площадке, с данными пыльцевого мониторинга за 9 лет наблюдений установлено, что в большинстве случаев (13 дней из 19) суточный максимум приходился на период с 10 до 16 часов. Таким образом, полученные данные скорее всего свидетельствует о локальном происхождении пыльцы амброзии в воздухе г. Рязани. При этом наличие эпизодов дальнего заноса подтверждается смещением суточного максимума на ночные и ранние утренние часы.

Наблюдения за цветением амброзии и анализ кривых пыления поставил перед нами дополнительную задачу: выяснить, может ли однолетнее растение *Ambrosia artemisiifolia* самовозобновляться в условиях умеренного климата или появление новых популяций амброзии – это результат заноса семян извне. В нашей работе из 1000 посаженных семян *Ambrosia artemisiifolia* выросло 230 растений. Проростки появлялись неравномерно и до фаз бутонизации, цветения и плодоношения успевали доходить не все экземпляры. Из 97 активно

цветущих в конце сентября растений зрелые семена смогли образовать только 5 особей, которые зацвели раньше остальных. В нашем эксперименте мы получили небольшое количество плодов амброзии полыннолистной.

Плодоношение амброзии наступало в конце сентября-октябре, но многие особи перейти в эту стадию не успели, вероятнее всего из-за рано наступивших в 2023 г. холодов. Собранные в октябре с наиболее полноценных особей плоды в большинстве случаев оказались незрелыми. Необходимо отметить, что из-за наступивших холодов не все растения смогли дойти даже до стадии цветения, поэтому фенологические наблюдения завершились нами уже в октябре. Таким образом, для того, чтобы делать вывод о самовозобновлении *Ambrosia artemisiifolia* в г. Рязани, одного года наблюдений недостаточно.

ГЛАВА 4. ПЫЛЬЦЕВАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЫЛЬЦЕВОГО СПЕКТРА ЗЛАКОВ Г. РЯЗАНИ

Пыльца злаков – основной аллерген в составе воздушного спектра на протяжении всего лета. Злаки распространены повсеместно: во флоре Центральной России отмечено около 270 видов семейства Poaceae (Маевский, 2014), Рязанской области – 135 видов злаков (Казакова, Щербаков, 2017). Период пыления злаков составляет 2,5-3 месяца, а период высокой концентрации пыльцы в воздухе составляет порядка месяца (рисунок 5). Такая растянутая аэропалинологическая кривая отражает вклад РАЗНЫХ видов злаков, цветущих в разное время.

При этом пыльца всех видов Poaceae относится к единому палиноморфологическому типу и при аэробиологическом мониторинге диагностируется только до уровня семейства, но обладает разной аллергенной активностью. По данным pollenlibrary.com, среди видов, типичных для Средней полосы России, четыре обладают сильными аллергенными свойствами (*Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Lolium perenne*, *Phleum pratense*), четыре – умеренными (*Bromopsis inermis*, *Poa pratensis*, *Poa annua*, *Poa trivialis* (pollenlibrary.com)). Степень аллергенности двух видов (*Calamagrostis epigeios*, *Elymus repens*) на сегодняшний день не известна.

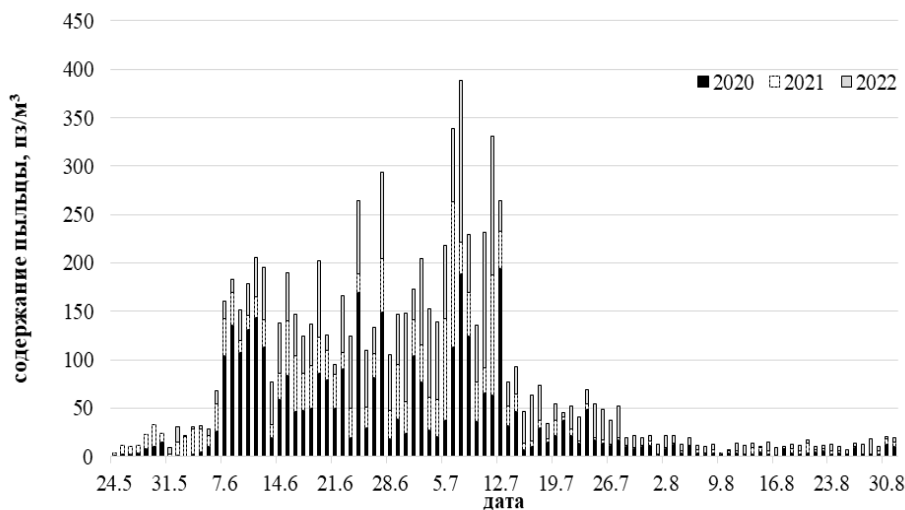


Рисунок 5. Динамика пыления злаков в г. Рязани, 2020-2022 гг., диаграмма с накоплением

Морфологическое сходство пыльцы злаков наряду с различной аллергенностью делает чрезвычайно актуальной проблему детализации кривых пыления, получаемых в ходе рутинного мониторинга.

4.1. Морфология пыльцы злаков. Пыльца десяти, наиболее распространенных в Рязанской области, видов злаков (*Bromopsis inermis* Leyss., *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Dactylis glomerata* L., *Elymus repens* (L.), *Festuca pratensis* Huds., *Lolium perenne* L., *Phleum pratense* L., *Poa annua* (L.), *Poa pratensis* L. и *Poa trivialis* L.) была изучена и сфотографирована под световым микроскопом. Для злаков характерны дистально однопоровые пыльцевые зерна с хорошо выраженным ободком и оперкулюмом, мелкобугорчатой поверхностью и часто

гранулярной цитоплазмой. Размер пыльцевых зерен обычно рассматривается как довольно стабильный признак. Однако наши результаты показали, что диаметр пыльцевых зерен различается даже у разных образцов одного и того же вида (особенно у *Bromopsis*, *Dactylis*, *Lolium*, *Phleum*). Связь размеров пыльцевого зерна с жизненной формой злаков в нашей работе не выявлена. Пыльцевые зерна единственного малолетнего вида *Poa annua* не превышали 30 мкм в диаметре, но некоторые многолетние растения также имели пыльцевые зерна такого же размера (*Calamagrostis epigeios*, *Poa trivialis*). Пыльца злаков обладает не только схожей морфологией, но и сходными спектральными характеристиками. Проведенный нами спектральный анализ пяти видов злаков продемонстрировал высокую степень схожести их флуоресцентных характеристик.

4.2. Пыльцевая продуктивность некоторых видов злаков. Для оценки вклада каждого конкретного вида злаков в состав аэропалинологического спектра, необходимы данные об их пыльцевой продуктивности. В нашей работе была изучена пыльцевая продуктивность 10 видов злаков, наиболее широко распространенных в Рязанской области. Среди изученных видов только один (*Poa annua*) относится к малолетникам, для него характерна минимальная пыльцевая продукция. Среди многолетних видов максимальной пыльцевой продукцией обладали *Dactylis glomerata*, *Phleum pratense* и *Calamagrostis epigeios*, минимальной – *Elymus repens*.

При расчете пыльцевой продуктивности вида нами анализировалось число пыльцевых зерен в пыльнике, число цветков в колоске и число колосков в соцветии. Из всех анализируемых показателей наиболее изменчивым параметром оказалось число колосков в соцветии. Средние значения варьировали от 16 (*Elymus repens*) до 1648 (*Calamagrostis epigeios*), с коэффициентом вариации от 11 % (*Lolium perenne*) до 55-56% (*Poa trivialis* и *Phleum pratense* соответственно). Число пыльцевых зерен в пыльнике у большинства видов достаточно стабильно, коэффициент вариации составлял от 13% (*Elymus repens*, *Calamagrostis epigeios*) до 30% (*Bromopsis inermis*). Число цветков в колоске также оставалось относительно постоянным, коэффициент вариации не превышал 32% (*Poa trivialis*). У многолетних видов мы обнаружили слабую, но значимую отрицательную корреляцию между числом пыльцевых зерен в цветке и числом цветков в соцветии ($r = -0,6$; $p = 0,036$). Так, большее число пыльцевых зерен формировалось в пыльниках тех растений, у которых число колосков (и общее число цветков) в соцветии относительно невелико. Наиболее изменчивым параметром оказалось число колосков в соцветии, коэффициент вариации у разных видов составлял от 11% (*Lolium perenne*) до 56% (*Poa trivialis*).

4.3. Сопоставление аэробиологических и фенологических наблюдений

Одним из способов детализации кривых пыления злаков может быть интеграция аэробиологических и фенологических наблюдений. Такой комплексный подход позволяет выявить виды, играющие наиболее заметную роль в формировании воздушного спектра, и определить периоды, наиболее опасные для больных поллинозами. Для детализации кривой пыления мы использовали фенологический индекс (рисунок 6).

Сопоставление аэропалинологических и фенологических данных показало, что в 2020 и 2022 гг. суммарный фенологический индекс хорошо коррелировал с изменениями концентрации пыльцы злаков в воздухе ($r=0,79$, $p=0,0007$ и $r=0,66$, $p=0,007$ соответственно) (рисунок 6). Тем не менее, при анализе этих показателей были выявлено несколько случаев их несоответствия. В июне отмечались периоды, когда значение суммарного фенологического индекса увеличилось, а концентрация пыльцы резко снизилась. Такое расхождение мы связываем с ливневыми дождями, которые отмечались в эти периоды в г. Рязани (rp5.ru, 2020). Дожди вымывали пыльцу из атмосферы, что и привело к снижению ее концентрации. На значении фенологического индекса интенсивные осадки никак не отразились. В июле расхождения между фенологическими и аэробиологическими наблюдениями связаны с увеличением концентрации пыльцы в воздухе и одновременным снижением фенологического индекса. Это может отражать вторичный подъём пыльцевых зерен в атмосферу, транспорт пыльцы от удаленных источников, а также вторичное цветение отдельных видов злаков,

которые после скашивания быстро набирают вегетативную массу.

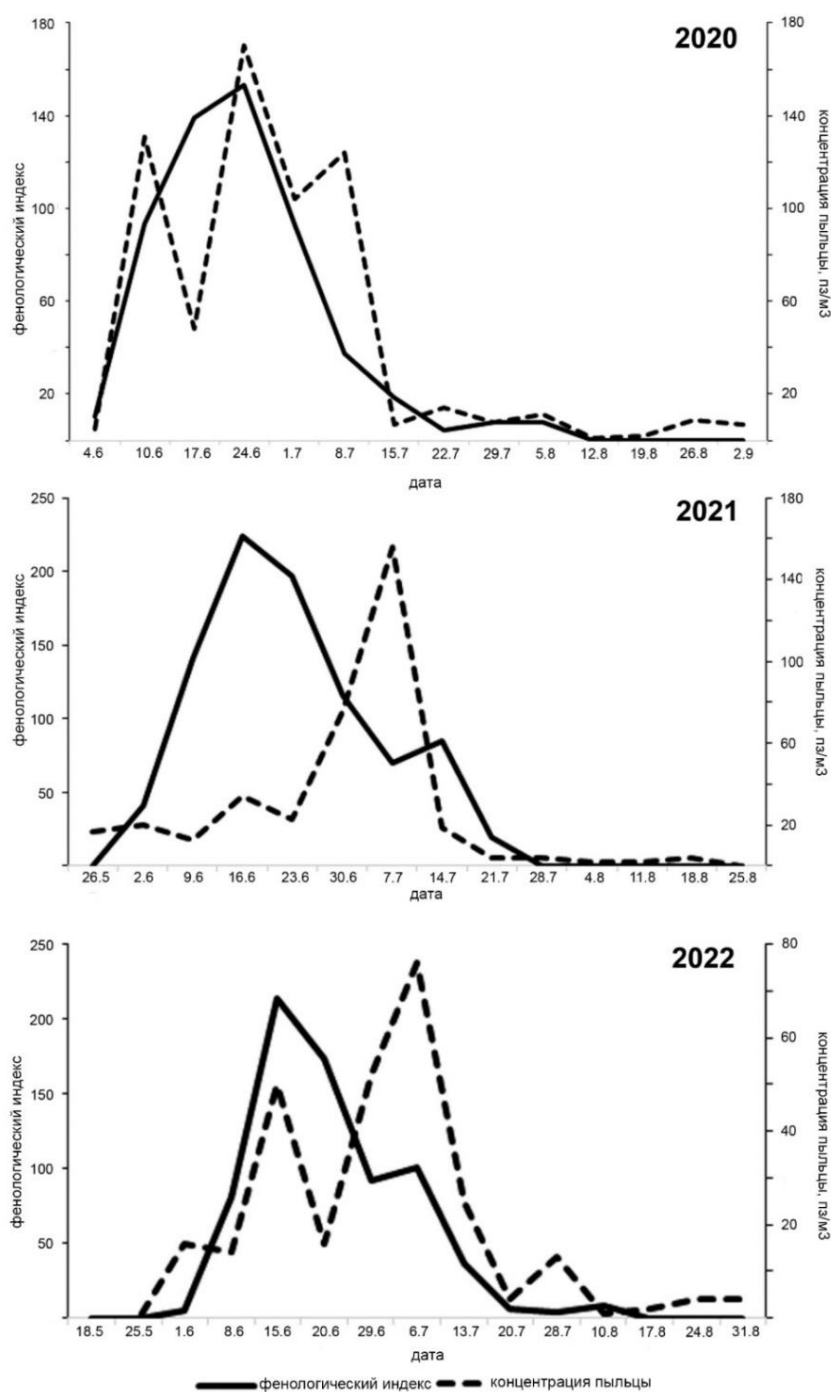


Рисунок 6. Динамика пыления и изменение суммарного фенологического индекса в г. Рязани (2021-2022 гг.)

В 2021 г. корреляции между фенологическим индексом и концентрацией пыльцы в воздухе обнаружено не было ($r=0,37$, $p=0,32$) (Карасева и др., 2021), что связано с резким увеличением концентрации пыльцы 7 и 12 июля (156 и 134 пз/м³ соответственно). При этом, согласно фенологическим наблюдениям, цветение основных видов злаков в г. Рязани к этому времени уже завершилось. Такую высокую концентрацию пыльцы мы связываем с началом цветения *Calamagrostis epigeios* за пределами фенологических площадок. Эта гипотеза в дальнейшем была подтверждена результатами метагеномного анализа образцов воздуха (подробнее ниже).

В целом, одной из основных причин расхождения фенологических и аэробиологических данных можно считать особенности методики проведения исследований. Пыльцевая ловушка, установленная на высоте 18,5 метров от поверхности земли, фиксирует изменения концентрации пыльцы в атмосфере на региональном уровне. В условиях Среднерусской равнины радиус охвата пыльцеуловителя составляет более 50 км (Severova, Volkova, 2018; Frisk et al., 2022). При этом фенологические наблюдения проводятся на конкретных пробных площадках и отражают локальное цветение.

Помимо этого, большое влияние на концентрацию пыльцы *Poa* в городе оказывает режим скашивания. Как правило, фенологические наблюдения проводят на ненарушенных пробных площадях. При этом пыльцевая 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 аэробиологическими наблюдениями (Карасева и др., 2021).

4.4. Детализация кривых пыления злаков на основе фенологических наблюдений

На основе фенологических данных нам удалось частично расшифровать кривую пыления злаков (рисунок 7). Первое появление пыльцы злаков в воздухе за три года наблюдений отмечалось примерно в одно и то же время, во второй половине мая. Первые пыльцевые зерна вероятнее всего принадлежали 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 делали 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 (Казакова, Щербаков, 2017), обнаружение его пыльцы в составе воздушного спектра маловероятно.

Высокая концентрация пыльцы злаков в 2020-2022 гг. отмечалась с середины июня до середины июля (рисунок 7). В июне наиболее опасным для аллергиков оказалось пыление *Festuca pratensis*, *Dactylis glomerata* и *Phleum pratense*, в июле – *Phleum pratense*.

Значительный вклад в суммарную кривую фенологического индекса (10-18%) в начале июня вносил *Poa pratensis*. Вид был обнаружен на всех пробных площадях, однако его пыльца является умеренно аллергенной (pollenlibrary.com) и может не оказывать существенного влияния на развитие симптомов поллиноза. Пик пыления середины июня был связан в основном с цветением *Dactylis glomerata* (41-45% от суммарного фенологического индекса). Этот вид отмечен как один из основных источников пыльцы злаков в г. Рязани.

Вклад *Festuca pratensis* в суммарную кривую фенологического индекса составил 9-13%. Поскольку виды рода *Festuca* используются в газонных смесях, то пыльца этих растений, наряду с *Dactylis glomerata*, может быть причиной июньского поллиноза. В частности, в газонных смесях на территории Рязани широко применяется *Festuca arundinacea*. И, хотя этот вид не был отмечен нами на исследуемых площадках, его пыльца также может присутствовать в составе спектра.

Вторым по значимости видом (15-21% от суммарного фенологического индекса) для Рязани оказался *Phleum pratense*. Пыление тимopheевки отмечалось с середины июня до середины июля. Помимо *Phleum pratense*, в июле в воздухе фиксировалась пыльца *Calamagrostis epigeios*. Однако на сегодняшний день степень аллергенности пыльцевых зерен вейника не установлена и говорить о нем как о триггере аллергических заболеваний в этот период не представляется возможным.

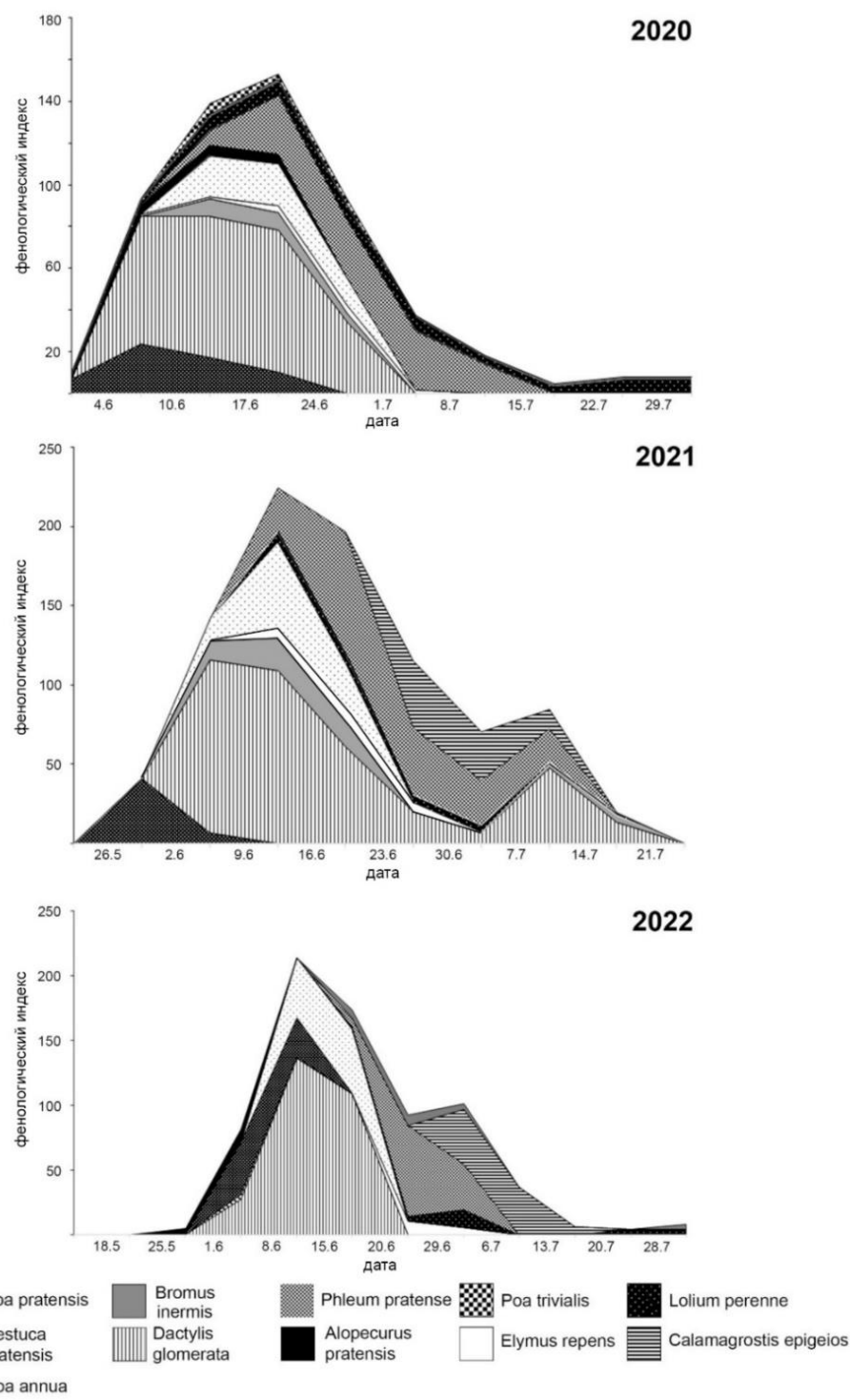


Рисунок 7. Детализация кривых изменения фенологического индекса в г. Рязани, 2020-2022 гг.

Таким образом, недостаточное количество пробных площадок не позволило полностью дешифровать кривую пыления злаков с помощью фенологических наблюдений. Например, не удалось выяснить, с цветением каких видов связаны повторяющиеся из года в год июльские пики пыления, а также пыльца каких видов отмечается в составе аэропалинологического спектра в конце июля и августе. Мы предполагаем, что это связано с цветением *Calamagrostis epigeios* за пределами фенологических площадок, повторным подъемом пыльцы с различных поверхностей, а также вторичным цветением злаков после скашивания. Повторное цветение было отмечено нами у *Phleum pratense*, *Lolium perenne*, *Dactylis glomerata*, *Bromopsis inermis*,

однако пыльцевая продукция и аллергенные свойства пыльцы этих вторично цветущих злаков не исследованы.

4.5. Детализация кривых пыления злаков методом меташтрихкодирования

Помимо фенологических наблюдений, ещё одним способом расшифровки кривых пыления злаков является меташтрихкодирование. Анализ образцов воздуха, отобранных в г. Рязани в 2020-2022 гг., молекулярными методами был выполнен на кафедре высших растений биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова А.А. Криницыной, А.С. Касьяновым и Д.О. Омельченко (Krinitina et al., 2023). Детализация кривых пыления злаков методом меташтрихкодирования показала, что оценка штрихкодов достаточно надежно отражает изменения качественного состава аэропалеонтологического спектра региона (рисунок 8).

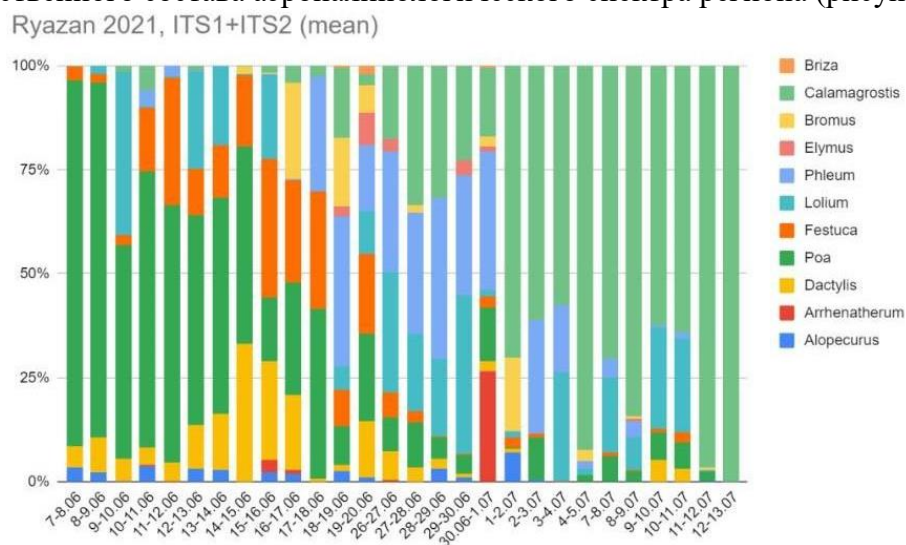


Рисунок 8. Результаты меташтрихкодирования (ITS1 + ITS2) пыльцы из образцов воздуха г. Рязани, 2021 г. (Krinitina et al., 2023)

Так, на основании анализа штрих-кодов ITS-1 и ITS-2 удалось установить следующую последовательность пыления злаков: *Poa*, *Alopecurus* и *Arrhenatherum* (с начала до середины июня), *Lolium*, *Bromopsis* и *Dactylis* (середина-конец июня), *Phleum*, *Elymus* и *Briza* (конец июня-начало июля) и *Calamagrostis* (с начала до середины июля). Аналогичная последовательность была выявлена и при проведении фенологических наблюдений.

Мы сопоставили результаты дешифровки кривой пыления злаков, полученные методом меташтрихкодирования с данными, полученными на основе фенологических наблюдений, в результате чего было выявлено несколько несоответствий.

Во-первых, качественный состав спектра, выявленный молекулярными методами, оказался шире. В частности на фенологических площадках, не отмечались виды рода *Briza* и *Arrhenatherum*, которые были выявлены методом меташтрихкодирования.

В-вторых, на протяжении всех трех лет наблюдений сезон пыления злаков по результатам меташтрихкодирования завершался цветением *Calamagrostis*. Этого фенологические наблюдения отражали не всегда из-за сравнительно небольшого числа экземпляров вейника на исследуемых площадках. Результаты же метагеномного анализа образцов воздуха показали, что, например, 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 (Krinitina 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 *Calamagrostis* из пригородов представляется нам возможным.

Метод меташтрихкодирования позволил достоверно определить изменения в качественном составе спектра злаков, однако количественный анализ на основе штрихкодов

оказался невозможен. Это связано с тем, что для идентификации пыльцы злаков в составе сложных образцов оптимально использовать протокол пробоподготовки, который не включает в себя амплификацию. Для успешного использования данного протокола требуется высокое содержание ДНК в составе образца. В нашей работе выделить достаточное количество ДНК из пыльцы злаков, находящейся в составе образцов воздуха, оказалось невозможным. Избирательность при проведении ПЦР для наработки амплификата для дальнейшего анализа делает невозможным количественную оценку встречаемости разных видов в исходной смеси.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА АЛЛЕРГОЛОГИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ ОСНОВНЫХ ТАКСОНОВ СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ПОИСКОВЫХ ЗАПРОСОВ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ

В 2022-2023 гг. мы провели анализ поисковых запросов, связанных с поллинозами, с помощью сервиса «Яндекс Вордстат» (<https://wordstat.yandex.ru/>) для установления ретроспективной связи между общественным интересом и реальной концентрацией пыльцы в воздухе.

Поскольку на территории Рязанской области важнейшими пыльцевыми аллергенами являются ольха, береза, злаки, полынь и амброзия, то мы проанализировали заинтересованность жителей региона именно этими таксонам. При сопоставлении кривой пыления ольхи с суммарным количеством запросов за неделю («ольха», «поллиноз», «аллергия») мы установили, что в 2022 г. данные достаточно хорошо согласуются друг с другом ($r=0,6$ ($p=0,08$); $r=0,7$ ($p=0,02$); $r=0,9$ ($p=0,002$) соответственно). Однако статистически значимые результаты мы получили лишь при сопоставлении концентрации пыльцы с количеством запросов «поллиноз» и «аллергия». В 2023 г. значимых корреляций выявлено не было. Возможно, это связано с более длительным периодом наблюдений в 2022 г. – пыльцеуловитель был установлен на 19 дней раньше, чем в 2023 г. Необходимо отметить, что максимальное число запросов по термину «аллергия» (4124) и «поллиноз» (144) отмечалось в период с 11 по 17 апреля 2022 г. В эту же неделю была зафиксирована максимальная концентрация пыльцевых зерен ольхи (1749 пз/м^3).

При сопоставлении кривых пыления *Betula* и поисковых запросов в периоды 21.02.2022-19.06.2022 гг. и 13.03.2023-25.06.2023 гг., были выявлены очень высокие значения корреляции ($r > 0,8$; $p < 0,05$) для поисковых запросов «пыльца березы», «поллиноз», «аллергия». В случае с *Betula* максимальное недельное содержание пыльцевых зерен было зафиксировано в периоды с 25.04.2022-01.05.2022 гг., 02.05.2022-08.05.2022 гг. и 17.04.2023-23.04.2023 гг. В эти же промежутки времени отмечалось наибольшее число поисковых запросов по словам «пыльца березы», «поллиноз» и «аллергия». В пик пыления березы было отмечено максимальное число запросов (более 5000) за весь период анализа.

Злаки – доминирующий таксон второй волны пыления. Обеспокоенность населения в связи с цветением злаков, однако, не столь высока, как с древесными таксонами. Нам не удалось выявить значимые корреляции между концентрацией пыльцы злаков в атмосфере и частотой поисковых запросов по термину «злаки»: $r=0,515811191$, $p=0,059024$ (2022 г.) и $r=0,415722164$, $p=0,22178$ (2023 г.).

Главными триггерами конца лета-начала осени являются полынь и амброзия. Эти растения относятся к семейству Сложноцветных, цветут практически одновременно, и нередко у сенсibilизированных пациентов находят специфические IgE антитела к пыльце и амброзии, и полыни (Мачарадзе, 2019). При сопоставлении кривых пыления полыни с частотой поисковых запросов мы установили сильную и очень сильную корреляцию с терминами «полынь» ($r=0,736795$, $p=0,001014$ (2022 г.); $r=0,714562$, $p=0,071183$ (2023 г.)), «поллиноз» ($r=0,846557$, $p=1,31E-05$ (2022 г.); $r=0,84254$; $p=0,01733$ (2023 г.)) и «аллергия» ($r=0,943492$, $p=0,009695$ (2022 г.)). Пик пыления полыни особенно хорошо согласуется с пиком поисковых запросов в 2022 г.: 01.08.2022-07.08.2022 гг.

Пыльца амброзии является сильнейшим аллергеном в период с августа по сентябрь. Максимальное содержание пыльцевых зерен амброзии было зафиксировано в периоды

22.08.2022-28.08.2022 гг. и 18.09.2023-24.09.2023 гг. В 2022 г. в этот же период было зафиксировано максимальное количество поисковых запросов по слову «амброзия». Однако максимум поисков «поллиноз» и «аллергия» фиксировался неделей раньше (в 2023 г. эти показатели также не совпадали). Мы связываем это несоответствие с тем, что большинство людей связывают симптомы аллергии в конце лета именно с цветением полыни. Установлено, что мажорный аллерген пыльцы полыни обыкновенной (наиболее распространенного вида полыни, проявляющего высокую аллергенную активность) Art v 1 гомологичен белкам амброзии, в результате чего пациенты с аллергией на Art v 1 также реагируют на Amb a 4 (Oberhuber, 2008).

ВЫВОДЫ

1. Период пыления в г. Рязани длится с начала марта по конец сентября и составляет в среднем 186 дней. В составе аэробиологического спектра за 9 лет наблюдений было зарегистрировано 38 пыльцевых типов, 17 из которых вошли в усредненный календарь пыления. Среди последних 13 таксонов представляют опасность с аллергологической точки зрения.

2. Между первым появлением пыльцы и началом локального пыления основных таксонов спектра г. Рязани (*Alnus*, *Betula*, *Poaceae*, *Artemisia*, *Ambrosia*) может отмечаться большой временной разрыв, который связан с дальним транспортом пыльцы.

3. Анализ пыления *Alnus*, *Poaceae*, *Artemisia* и *Ambrosia* не выявил значимых изменений в сроках начала, интенсивности и продолжительности пыления. Для *Betula* отмечен значимый рост суммарного годового содержания пыльцы.

4. Расхождение между аэробиологическими и фенологическими данными определяется, в первую очередь, разницей в методике проведения исследований: фенологический индекс отражает цветение на конкретных площадках, а пыльцевые ловушки дают представление о составе регионального пыльцевого спектра.

5. Детализация кривых пыления злаков на основе фенологического индекса показала, что наиболее опасный период пыления злаков отмечается с середины июня до середины июля и связан с цветением *Festuca pratensis*, *Dactylis glomerata* и *Phleum pratense*.

6. При использовании ядерных маркеров ITS1 и ITS2 удастся идентифицировать качественный состав пыльцевого спектра злаков.

7. Высокая концентрация пыльцы *Ambrosia* в воздухе г. Рязани в основном связана с локальным цветением; суточный пик пыления амброзии отмечается с 10.00 ч до 15.00 ч.

8. Анализ поисковых запросов в сети Интернет показал, что наибольшую тревогу среди населения вызывает пыление березы в апреле-мае и полыни в конце лета.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК РФ, в том числе включенных в базу данных Web of Science (*):

1. Карасева, В. С., Селезнева, Ю. М., Казакова, М. В., Северова, Е. Э. Фенологический анализ динамики пыления злаков в Рязани / В. С. Карасева, Ю. М. Селезнева, М. В. Казакова, Е. Э. Северова // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. — 2021. — Т. 126. — №. 6. — С. 18-28;

2. *Severova, E., Kopylov-Guskov, Y., Selezneva, Y., Karaseva, V., Yadav, S. R., Sokoloff, D. Pollen production of selected grass species in Russia and India at the levels of anther, flower and inflorescence / E. Severova, Y. Kopylov-Guskov, Y. Selezneva, V. Karaseva, S. R. Yadav, D. Sokoloff // Plants. — 2022. — V. 11. — №. 3. — P. 285;

3. *Krinitcina, A. A., Omelchenko, D. O., Kasianov, A. S., Karaseva, V. S., Selezneva, Y. M., Chesnokova, O. V... & Severova E. E. Aerobiological Monitoring and Metabarcoding of Grass Pollen / A. A. Krinitcina, D. O. Omelchenko, A. S. Kasianov, V. S. Karaseva, Y. M. Selezneva, O. V. Chesnokova,... & E. E. Severova // Plants. — 2023. — V. 12. — №. 12. — P. 2351;

4. *Severova, E. E., **Karaseva, V. S.**, Selezneva, Y. M., & Polevova, S. S. Phenological Analysis of Grasses (Poaceae) in Comparison with Aerobiological Data in Moscow (Russia) / E. E. Severova, V. S. Karaseva, Y. M. Selezneva, & S. S. Polevova // Plants. — 2024. — V. 13. — № 17. — P. 2384;

5. **Карасева, В.С.**, Селезнева, Ю.М., Северова, Е.Э. Мониторинг пыления злаков в г. Рязани / В. С. Карасева, Ю. М. Селезнева, Е. Э. Северова // Ботанический журнал. — 2025. — Т. 110. — № 2. — С. 175-187.

В прочих изданиях:

1. **Карасева, В. С.**, Посевина, Ю. М. Аэробиологические исследования г. Рязани / В. С. Карасева, Ю. М. Посевина // Естественнонаучные основы медико-биологических знаний. — 2017. — С. 222-225;

2. Селезнева, Ю. М., **Карасева, В. С.** Интерпретация аэропалинологических данных по результатам аэробиологических исследований в г. Рязани / В. С. Карасева, Ю. М. Селезнева // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Биология в высшей школе: актуальные вопросы науки, образования и междисциплинарной интеграции». — 2019. — С. 63-65;

3. Severova, E., Britsky, D., Churyukina, E., Goloshubova, E., **Karaseva, V.**, Milchenko, N., Moroz, A., Pavlyuchenko, I., Selezneva, Y., Ukhanova, O., Zheltova, I. Monitoring of *Ambrosia* pollen in Southern and Central Russia / E. Severova, D. Britsky, E. Churyukina, E. Goloshubova, V. Karaseva, N. Milchenko, A. Moroz, I. Pavlyuchenko, Y. Selezneva, O. Ukhanova, I. Zheltova // 7th European Symposium on Aerobiology. Bioaerosols and Environmental Impacts. Cordoba, Spain. — 2020. — P. 179;

4. Severova, E., Selezneva, Y., **Karaseva, V.** Pollen production of Poaceae species in Central Russia / E. Severova, Y. Selezneva, V. Karaseva // 7th European Symposium on Aerobiology. Bioaerosols and Environmental Impacts. Cordoba, Spain. — 2020. — P. 207;

5. **Карасева, В.С.** Перспективы развития аэропалинологических исследований в г. Рязани / В. С. Карасева // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021». — М.: МАКС Пресс. — 2021;

6. **Карасева, В. С.**, Селезнева, Ю. М., Бирюкова, И. И. Особенности пыления амброзии в Рязани (2015-2021 гг.) / В. С. Карасева, Селезнева, Ю. М., Бирюкова, И. И. // Фитоинвазии: остановить нельзя сдаваться: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Москва, Ботанический сад биологического факультета МГУ, 10–11 февраля 2022 г.). — 2022. — С. 471;

7. **Карасева, В. С.** Интерпретация аэропалинологических данных по результатам фенологических исследований в г. Рязани на примере злаков / В. С. Карасева // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2022». — М.: МАКС Пресс. — 2022;

8. **Карасева, В. С.**, Селезнева, Ю. М. Анализ динамики пыления раннецветущих сережкоцветных на примере *Alnus* и *Corylus* в г. Рязани / В. С. Карасева, Ю. М. Селезнева // Актуальные проблемы современной палинологии. — 2022. — С. 156-159;

9. **Карасева, В. С.**, Селезнева, Ю. М., Бирюкова, И. И. Особенности пыления березы в г. Рязани / В. С. Карасева, Ю. М. Селезнева, И. И. Бирюкова // Исследования природы и общества в условиях глобальных трансформаций: сборник материалов XV всероссийской молодежной научной школы-конференции «МЕРИДИАН». — М.: ИГ РАН. — 2023. — С. 110-116;

10. **Карасева, В. С.**, Селезнева, Ю. М. Динамика пыления березы на территории Рязанской области / В. С. Карасева, Ю. М. Селезнева // Актуальные вопросы современной педиатрии: новые возможности диагностики и лечения детских болезней: сборник материалов международной научно-практической конференции, Ташкент — 2023. — С. 15;

11. **Карасева, В. С.**, Селезнева, Ю. М., Жулина, Д. А., Федотова, Т. С. & Сомов, В. В. Интерпретация аэробиологических данных по результатам фенологических наблюдений на примере *Ambrosia artemisiifolia* L. в г. Рязани / В. С. Карасева, Ю. М. Селезнева, Д. А. Жулина,

Т. С. Федотова, В. В. Сомов // Фитосанитария. Карантин растений. — 2024. — №2 S (18A) — С. 57-58;

12. Карасева, В. С. Главные пыльцевые аллергены г. Рязани / В. С. Карасева // Белые цветы: сборник тезисов XI Международного молодёжного научного медицинского форума, посвящённого 150-летию Н. А. Семашко — 2024. — С. 5:

13. Карасева, В. С., Рогова, А. П., Бирюкова, И. И., Селезнева Ю. М. Дешифровка аэробиологических данных по результатам фенологических наблюдений на примере *Betula* в городе Рязани / В. С. Карасева, А. П. Рогова, И. И. Бирюкова, Ю. М. Селезнева // Фундаментальные, прикладные вопросы биологии и естественно-научного образования: сборник материалов I научно-практической конференции с международным участием. — 2024.