Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных и экологических проблем
Сибирского отделения Российской академии наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Алтайский государственный университет»

На правах рукописи

КУРЯТНИКОВА НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

МОНИТОРИНГ АДВЕКТИВНЫХ ПЫЛЬЦЕВЫХ ЗЕРЕН В ТВЕРДЫХ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКАХ НА ЮГО-ВОСТОКЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

1.6.21 – Геоэкология (географические науки)
Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук

Научный руководитель:
к.г.н. Н.С. Малыгина

Барнаул – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….. 3

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ……... 10

1.1. Основные понятия и подходы к мониторингу……... 10

1.2. Распространение пыльцы в атмосфере……..……... 15

1.3. Мониторинг пыльцевых зерен……. 25

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ…….. 30

2.1. Физико-географические условия территории исследования…….. 30

2.2. Условия проведения мониторинга пыльцевых зерен в атмосферных осадках холодного периода…… 37

2.3. Реализация мониторинга ……. 41

ГЛАВА 3. ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ В ПЫЛЬЦЕВЫХ СПЕКТРАХ ТВЕРДЫХ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ……..... 45

3.1. Таксономическое разнообразие пыльцы в осадках…….. 45

3.2. Пыльцевые зерна в пробах твердых атмосферных осадков рекогносцировочной точки…… 48

3.3. Пыльцевые зерна в пробах твердых атмосферных осадков опорных точек……. 55

ГЛАВА 4. АДВЕКТИВНЫЕ ПЫЛЬЦЕВЫЕ ЗЕРНА, КАК ТРАССЕРЫ АТМОСФЕРНЫХ МЕЖГЕОСИСТЕМНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ…… 63

4.1. Синоптический анализ атмосферного поступления пыльцы с осадками……... 63

4.2. Алгоритм определения атмосферного поступления пыльцевых зерен с осадками……. 69

4.3. Адвективные пыльцевые зерна полыни (*Artemisia* sp.) и ивы (*Salix* sp.) в осадках, как атмосферные трассеры на юго-востоке Западной Сибири в холодный период……..... 73

ЗАКЛЮЧЕНИЕ…… 81

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ……. 83

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……... 84

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Наблюдающееся в последние десятилетия увеличение аэрозольной составляющей в атмосфере, оказывающей влияние не только на разномасштабные климатические и экологические изменения в окружающей среде, но и на здоровье населения, выступает одной из важнейших геоэкологических проблем (Ивлев, 1982; Seinfeld et al., 1998, 2006; Аэрозоли..., 2006; WHO, 2015; Jyethi, 2016; Jaafari et al., 2021). Пристальное внимание при изучении состояния атмосферы уделяют мониторингу антропогенных и биогенных (биологических) загрязняющих веществ (ГОСТ Р 54139-2010), включая биоаэрозоли. Мониторинг определяют как систему наблюдений, оценки и прогноза антропогенных изменений состояния окружающей природной среды (Израэль, 1984), а применительно к геосистемам реализуют геоэкологический мониторинг на локальном, региональном и глобальном уровнях (Калинин, Рязанова, 2011). В системе геоэкологического мониторинга выделяют биологический (санитарный) блок, который включает наблюдения за ПДК токсичных веществ, физическими и биологическими раздражителями (шумами, аллергенами) (Герасимов, 1985). Биоаэрозоли являются широко распространенной группой аэрозолей и зачастую выступающих в качестве аллергенов (Despres et al., 2012), но их недоучет (например, при моделировании до 70%) обуславливает кратно возрастающий к ним интерес (Despres et al., 2012; IPCC, 2014; Steiner et al., 2015; Li et al., 2020). Пыльца наиболее крупный представитель биоаэрозолей, характеризуется хорошей сохранностью, что предопределяет ее как значимый объект мониторинга, который в последние годы приобрел особую актуальность в связи с существенным ростом числа заболеваний, вызванных ее негативным влиянием на человека (Елькина, 2008; WHO, 2015).

Пыльцевые зерна используют и в качестве геоиндикаторов изменений состояний природных систем, в частности, криолитозоны (Nakazawa et al., 2007; 2013 2018; Papina et al., 2013, 2015; Brugger et al., 2018; Васильчук, 2018), объекты

которой – подземные льды, ледники, снежный покров, снег и др. (Котляков, Кренке, 1979), формируются преимущественно за счет атмосферных осадков в холодный период, в связи с чем пыльца в них может поступать с адвективными воздушными массами и/или региональным, глобальным переносом. Большинство всех наблюдений за пыльцевой компонентой в воздухе проводят в теплый период (т.е. во время вегетации высших растений) на специализированных станциях с целью своевременного информирования населения об аллергокомфортности. Исследования, посвященные непосредственному анализу осаждений пыльцевых зерен с осадками единичны, и они узко локализованы (Kasprzyk, Borycka, 2019). При этом, как присутствие в атмосфере, так и вымывание аэрозолей, включая пыльцу, вне зависимости от сезона года определяет не только степень ее загрязнения, но и потенциальный экологический риск для человека (Суржиков и др., 2021).

Одни из первых работ по оценке дальнего переноса пыльцы были проведены в рамках работы комиссии по изучению Четвертичного периода под руководством Е.А. Мальгиной, Е.Д. Заклинской, Р.Ф. Федоровой. На юге Западной Сибири сотрудники институтов РАН и других научных организаций (И.С. Андреева, А.Н. Анкилов, А.М. Бакланов, Б.Д. Белан, В.И. Букатый, К.П. Куценогий, М.В. Панченко, В.Ф. Рапута, А.С. Самойлов, А.С. Сафатов, И.А. Суторихин и др.) выполняли исследования преимущественно антропогенных аэрозольных частиц в осадках и снежном покрове. Изучением пыльцевой составляющей в атмосфере занимались В.В. Головко (Новосибирск) и Г.И. Ненашева (Барнаул), в том числе с целью получения данных о содержании аллергенной пыльцы в воздухе, но лишь в теплый период года (Ненашева, 2013). Полученные научными группами результаты в настоящее время весьма востребованы, в первую очередь, при проведении оценок экологических рисков и рисков для здоровья населения, а также оценок состояний геосистем и при моделировании процессов, происходящих в них. Однако, данные по вымыванию пыльцы, являющейся в большинстве случаев аллергеном, с атмосферными осадками, в течение продолжительного зимнего периода (5-6 месяцев) на юго-востоке Западной Сибири, отсутствуют.

Цель исследования – выделение адвективных пыльцевых трассеров в твердых атмосферных осадках, отобранных в ходе мониторинга на юго-востоке Западной Сибири для идентификации атмосферных межгеосистемных связей.

Для достижения указанной цели было необходимо решить следующие ***задачи***:

1) обосновать целесообразность мониторинга пыльцы в твердых атмосферных осадках как составляющей в оценках атмосферных межгеосистемных связей;

2) оценить таксономическое разнообразие пыльцевых зерен в осадках, отобранных в ходе мониторинговых исследований на юго-востоке Западной Сибири в холодный период;

3) проанализировать поступление, транспорт и вымывание адвективной пыльцы, и рассмотреть ее способность выступать в качестве трассеров атмосферного взаимодействия геосистем в течение холодных периодов на исследуемой территории.

Объект исследования – пыльцевые зерна, выделенные в твердых атмосферных осадках, отобранных в ходе мониторинга на юго-востоке Западной Сибири.

Предмет исследования – процессы атмосферного поступления, транспортировки и вымывания адвективной пыльцы с осадками в период с устойчивым снежным покровом.

Материалы и методы исследования. Диссертационная работа базируется на данных 460 проб твердых атмосферных осадков, микроскопический анализ которых полностью выполнен автором. В работе использованы данные реанализов NCEP/NCAR и ERA, ERA5 средних скоростей и направлений ветра, осадков, температуры и др. В качестве основных методов исследования применяли: геосистемный, мониторинговый, микроскопический, синоптический, траекторный, сравнительно-географический, и др. Мониторинг заключался в отборе каждого случая выпадения твердых атмосферных осадков в пробоотборники, соответствующие минимальным требованиям «Pollen monitoring program (PMP)» в течение семи холодных периодов (2014-2021 гг.). Пробоподготовку полученных образцов выполняли с соблюдением методических рекомендаций (Руководство…, 1992), микроскопические исследования проводили с помощью

светового и сканирующего микроскопов. Систематизацию полученных данных выполняли с использованием программы Microsoft Office Access, статистическую обработку – Microsoft Office Excel, включающей XLSTAT. Траекторное моделирование реализовывали в HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory).

Научная новизна. Впервые в пробах твердых атмосферных осадков выделены пыльцевые зерна и обоснована необходимость их использования при верификации реконструкций условий окружающей среды. При траекторном моделировании атмосферного переноса пыльцевых зерен впервые успешно апробировано совместное использование в качестве входных параметров высот пограничного слоя атмосферы (ПСА) и продолжительности естественного синоптического периода (ЕСП). Предложен и успешно реализован алгоритм, базирующийся на траекторном моделировании и данных адвективных пыльцевых трассеров, описывающий атмосферные межгеосистемные связи, и показано, что для юго-востока Западной Сибири пыльцевые зерна ивы и полыни выступают таковыми трассерами.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты диссертационной работы вносят значительный вклад в развитие научных направлений, находящихся на стыке геоэкологии, палинологии, метеорологии. Полученные данные о пыльцевой составляющей в твердых атмосферных осадках, отобранных на юго-востоке Западной Сибири, и путях ее поступления позволяют оценивать как атмосферные связи между геосистемами регионального уровня, так и состояния геосистем в целом. Результаты диссертационного исследования, целесообразно использовать для верификаций, ранее выполненных палеореконструкций состояний окружающей среды могут существенно повысить их достоверность и качество для территории исследования и сопредельных с ней районах.

Положения, выносимые на защиту:

1) мониторинг адвективной пыльцы в твердых осадках (снеге) рекомендуется проводить в период с устойчивым снежным покровом и полученные

результаты использовать при оценках процессов атмосферного взаимодействия геосистем;

2) адвективные пыльцевые спектры в твердых атмосферных осадках юго-востока Западной Сибири с максимальным таксономическим разнообразием в начале и конце холодных периодов целесообразно учитывать при верификации палеореконструкций условий окружающей среды;

3) алгоритм, базирующийся на траекторном моделировании и адвективных трассерах, в качестве которых для юго-востока Западной Сибири выступает пыльца ивы (*Salix* sp.) и полыни (*Artemisia* sp.) отражает атмосферные межгеосистемные связи.

Степень достоверности и апробация результатов. Исходные материалы с 2014 по 2019 гг. получены при участии автора в качестве исполнителя работ по двум тематикам госбюджетных НИР ИВЭП СО РАН: в 2014-2016 гг. «Климатические и экологические изменения в Сибири по данным гляциохимического, диатомового и споро-пыльцевого анализа ледниковых кернов» (науч. рук. – д.х.н. Т.С. Папина.); в 2017-2019 гг. «Климатические и экологические изменения и региональные особенности их проявления на территории Сибири по данным палеоархивов и атмосферных осадков» (науч. рук. – д.х.н. Т.С. Папина). Автор с 2019 по 2022 гг. на базе АлтГУ являлся исполнителем научного аспирантского проекта РФФИ № 19-35-90078 «Адвективные биологические объекты (пыльца и водоросли) в зимних атмосферных осадках и снежном покрове зон взаимодействия нивально-гляциальных систем Алтая», в рамках которого им был выполнен отбор проб атмосферных осадков и проведен комплексный анализ полученных результатов. В работе использованы как методические рекомендации, регламентированные международной программой «Pollen monitoring program», также методические рекомендации в области исследований биологических образцов. Лабораторную пробоподготовку и микроскопический анализ выполняли на профессиональном оборудовании с соблюдением регламентирующих норм и правил, а камеральную обработку проводили по стандартным методикам. Результаты диссертационного

исследования опубликованы и были представлены на профильных конференциях разного уровня, среди которых: «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2015, 2019); «European Geosciences Union General Assembly» (Вена, 2015); «Водные и экологические исследования в Западной Сибири» (Барнаул, 2019, 2020, 2021); «Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: химия и климат» (Иркутск, 2017, 2020, 2021); «Полярная конференция и гляциологический симпозиум» (Сочи, 2018); «Роль криосферы в прошлом, настоящем и будущем Земли» (Санкт-Петербург, 2020); «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Москва, 2020); «ENVIROMIS-2020» (Томск, 2020); «SecNet» (Томск, 2020) и др.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, формулировке основных научных положений, выносимых на защиту. Соискатель участвовал в отборе большей части проб и последующей их пробоподготовке, им лично выполнен микроскопический анализ 460 проб атмосферных осадков посредством световой и сканирующей электронной микроскопии. Автор принимал непосредственное участие в анализе синоптических ситуаций для случаев выпадения атмосферных осадков и рассчитывал обратные траектории движения воздушных масс с учетом предложенных их параметров.

Публикации. Соискателем в соавторстве опубликовано более 40 научных работ, в том числе по теме диссертационного исследования – 21, из них 4 статьи в изданиях Web of Science и Scopus, 3 – в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных «Спорово-пыльцевые и альгологические спектры в зимних атмосферных осадках зон взаимодействия нивально-гляциальных систем Алтая» № 2021621843 RU, 02.09.2021.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и списка литературы из 157 источников. Общий объем составляет 98 страниц машинописного текста, включая 27 рисунков, 7 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность к.г.н., доценту Г.И. Ненашевой за любовь, привитую к палинологии; к.г.н., Н.С. Малыгиной за научное руководство; руководителю ХАЦ ИВЭП СО РАН д.х.н. Т.С. Папиной и

сотрудникам центра за частичный многолетний отбор проб атмосферных осадков; к.б.н., Е.Ю. Митрофановой за помощь на всех этапах выполнения работы и поддержку; Г.С. Зинченко за консультации при проведении синоптического анализа; к.г.н. Е.С. Попову за всемерное содействие при выполнении работы.

Автор благодарит сотрудников лаборатории ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования ИВЭП СО РАН за важные замечания и идеи на различных этапах обсуждения работы; сотрудников лаборатории гидробиологии ИВЭП СО РАН за внимание к диссертационной работе и ценные советы; преподавателей института географии АлтГУ и лично к.г.н. Н.И. Быкова за содействие при проведении исследования; сотрудников научно-инновационного управления АлтГУ за личную поддержку.

Благодарю Т.А. Бляхарчук (ИМКЭС СО РАН), О. Дембрел (Ховдский университет), А.А. Галанина (ИМЗ СО РАН) и сотрудников ИВЭП СО РАН за плодотворную совместную работу и публикации.

Автор благодарен директору ИВЭП СО РАН д.б.н. А.В. Пузанову за предоставленную возможность проведения лабораторных работ и использования оборудования.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Основные понятия и подходы к мониторингу

Оценка состояния атмосферы занимает одно из ведущих мест при проведении комплексного мониторинга окружающей среды, что обусловлено влиянием загрязняющих веществ (аэрозолей) на глобальные климатические и экологические процессы и биосферу в целом (МГЭИК, 2021). Важным практическим аспектом является необходимость оценки загрязнения атмосферы по данным мониторинга, в первую очередь, присутствия аэрозолей при расчетах экологических рисков и рисков для здоровья населения (ГОСТ Р 14.09-2005).

На Стокгольмской конференции ООН, проводимой в 1972 году, впервые Р. Мэнном было предложено определение мониторинга окружающей среды (Munn, 1973), которое затем программа ЮНЕСКО определила как систему длительных регулярных наблюдений во времени и в пространстве, дающую информацию о прошлом и настоящем состояний окружающей среды, позволяющую прогнозировать изменение ее параметров, имеющих особое значение для человечества. В развитие общей теории мониторинга, включая обоснование необходимости и значимости, выведения основных принципов и подходов, наиболее значимый вклад внесли Ю.А. Израэль, И.П. Герасимов, Ф.Я. Ровинский, В.Е. Соколова и другие исследователи.

Ю.А. Израэль (1984) под мониторингом определял систему наблюдений, оценки и прогноза антропогенных изменений состояния окружающей природной среды (Израэль, 1984). При этом мониторинг должен был включать следующие направления: наблюдения за состоянием природной среды и факторами, которые на нее воздействуют; оценку фактического состояния; прогноз состояния окружающей среды (рисунок 1.1). Данное понятие мониторинга чаще всего используют при экологических исследованиях, когда основным объектом

выступают экосистемы. Однако при мониторинге взаимосвязанных природных компонентов и соподчиненных комплексов реализуют геоэкологический мониторинг, под которым понимают систему наблюдений, оценки и прогноз состояний геосистемы (Калинин, Рязанова, 2015).

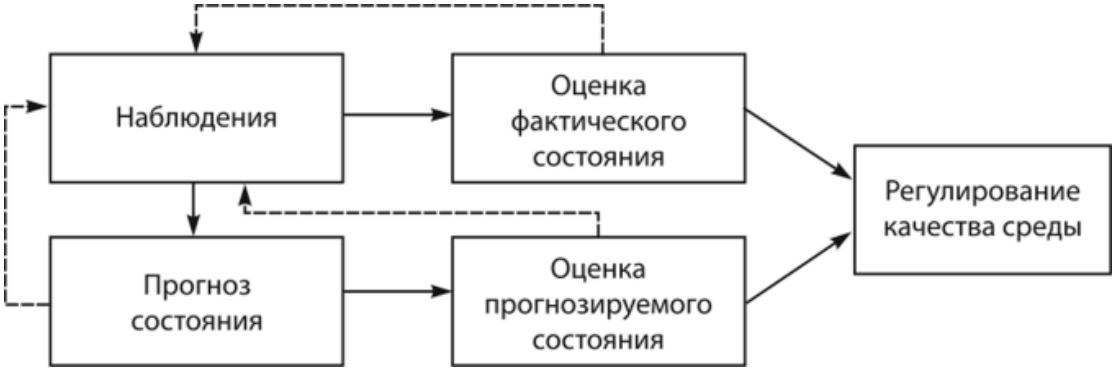

Рисунок 1.1 – Схема мониторинга и взаимосвязи его блоков (Израэль, 1984)

Понятие геосистемы было введено В. Б. Сочава в 1963 г. для обозначения объектов, изучаемых непосредственно географией, под которыми он понимает «земное пространство всех размерностей, где отдельные компоненты природы находятся в системной связи друг с другом и как определенная целостность взаимодействуют с космической сферой и человеческим обществом» (Сочава, 1978). В иерархии геосистем выделяют три уровня организации: планетарный, региональный и локальный (рисунок 1.2).

Планетарный уровень охватывает всю географическую оболочку или эпигеосферу; к региональным геосистемам относят крупные и достаточно сложные элементы эпигеосферы – ландшафтные зоны, страны, области, провинции. Простые ландшафтные единицы: местности, урочища, подурочища и фации формируют локальные геосистемы (Исаченко, 1991). При этом локальные и региональные геосистемы включают как отдельные элементы, так и их комплекс, и при изучении локальных геосистем полученная информация в большей степени описывает местные процессы и закономерности, а региональных – имеет охват по площади в несколько десятков тысяч квадратных километров и по высоте – до трех-четырех километров (Исаченко, 1991).

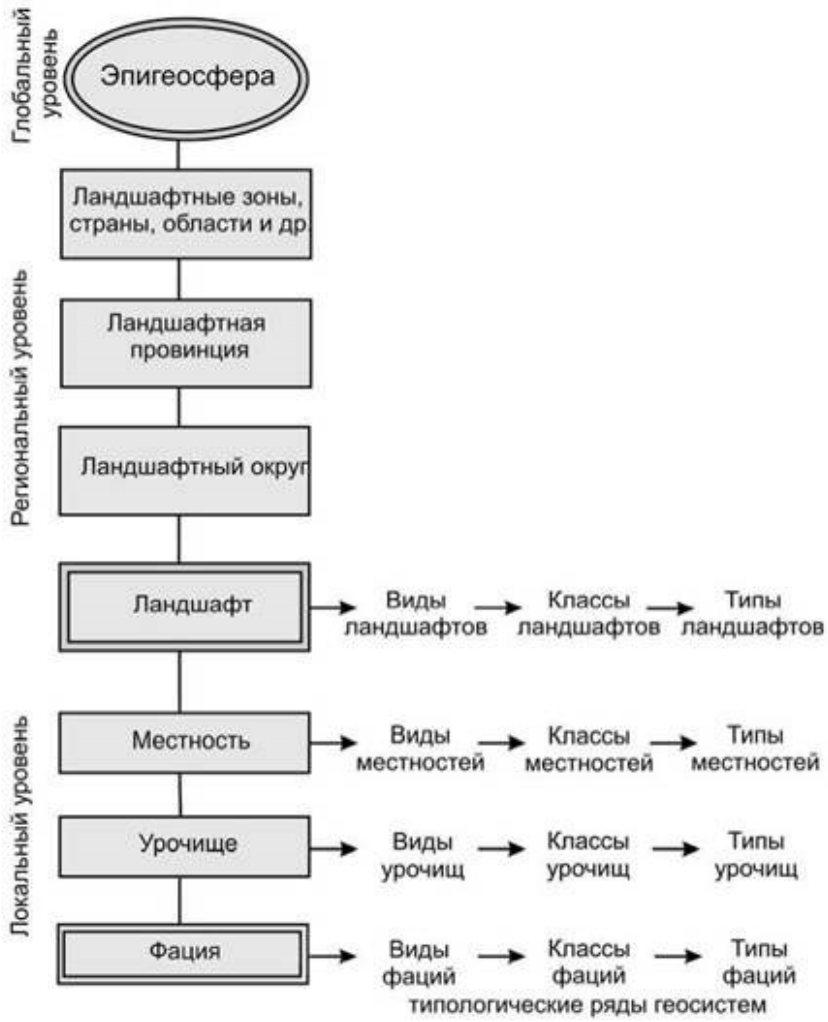

Рисунок 1.2 – Схема иерархии геосистем (Исаченко, 1991)

Среди основных свойств геосистем выделяют ее структурность, выражающуюся в пространственно-временной упорядоченности (организованности), т.е. определенном расположении ее частей и характере их связей:

- вертикальных (межкомпонентных) – образованных внутрисистемными взаимодействиями между компонентами геосистемы, например, фильтрация вод в почву, поднятие водных растворов по капиллярам почвы и материнской породы, испарение, транспирация, всасывание почвенных растворов корневой системой растений и т.д.;
- горизонтальных (межсистемных) – образованных взаимодействиями между отдельными одноуровневыми геосистемами, например, атмосферный, водный и твердый сток (Соболева, Язиков, 2010).

В целях детального изучения и описания процессов, происходящих на всех уровнях геосистем, используют различные модели: функционально-компонентные, функционально-геомерные, структурно-динамические и другие (Сочава, 1978). Первые из них используют для анализа взаимосвязей между системами одного уровня, которые основываются на данных натурных наблюдений и описывают процессы поступления, транспортировки, трансформации и выведения различных компонентов из геосистем (Сочава, 1978). Элементы этой модели Г. Рихтер объединил в 3 группы, соответствующие компонентам геосистем: радиация и тепло (включая адвективные притоки и оттоки); влагооборот (атмосферные осадки и влагообмен в приземном слое); круговорот органических веществ, газообразных растворимых неорганических веществ и обломочного неорганического материала. Среди основных каналов, посредством которых осуществляется транзит и перераспределение вещества между геосистемами, определяют воздушную среду, а фактическое перераспределение осуществляется через сухое и мокрое осаждение.

Пространственная и временная изменчивость, а также высокая способность к распространению в атмосфере загрязняющих веществ, наряду с многообразием путей их поступления, определяет организацию сети мониторинга за состоянием атмосферы как сложную и многоаспектную задачу. Под эгидой ООН в 1975 г. была создана Глобальная система мониторинга окружающей среды (Зарина, Гильдин, 2011). При мониторинге пристальное внимание уделяют изучению качественного и количественного состава загрязняющих веществ в атмосфере, которые подразделяют на антропогенные и биогенные (биологические) (ГОСТ Р 54139-2010), а среди последних биоаэрозоли являются наиболее широко распространенной группой. Большинство частиц, относящиеся к биоаэрозолям, способны вызывать аллергические реакции и выступать аллергенами, поэтому они входят в биологический блок геоэкологического мониторинга (таблица 1.1) (Герасимов, 1985).

Таблица 1.1 – Система наземного мониторинга окружающей среды (Герасимов, 1985)

Блок мониторинга	**Объекты мониторинга**	**Характеризуемые показатели**	**Службы и опорные базы**
Биологический (санитарный)	Приземный слой воздуха. Поверхностные и грунтовые воды, промышленные.	ПДК токсичных веществ. Физические и биологические раздражители (шумы, аллергены)	Гидрометеорологическая, водохозяйственная, санитарно-эпидемиологическая.
Геосистемный (хозяйственный)	Исчезающие виды животных и растений. Природные экосистемы. Агросистемы. Лесные экосистемы.	Функциональная структура природных экосистем и ее нарушения. Популяционное состояние растений и животных. Урожайность сельскохозяйственных культур. Продуктивность насаждений.	
Биосферный (глобальный)	Атмосфера (тропосфера) и озоновый экран. Гидросфера. Растительный и почвенный покровы, животное население.	Радиационный баланс, тепловой перегрев, газовый состав и запыление загрязнение больших рек и водоемов; водные бассейны, круговороты воды на обширных водосборах и континентах. Глобальные характеристики состояния почв, растительного покрова и животных. Глобальные баллансы CO_2 и O_2. Крупномасштабные круговороты веществ.	Международные биосферные станции.

В настоящее время значительная часть действующих нормативно-правовых документов регламентирует проведение мониторинга за антропогенными частицами (загрязнителями), и для городских территорий его реализуют преимущественно за: двуокисью серы, озоном, двуокисью азота, угарным газом, свинцом и твердыми примесями (ГОСТ 12.0.003-2015; ГОСТ 56828.38-2018), а так же токсичными химическими веществами (такими, как бензол и ртуть) и

биологическими частицами (например, спорами плесени и пыльцой) (ГОСТ Р 54139-2010).

В последние годы потребность в проведении мониторинга частиц биологического происхождения, в первую очередь пыльцы в воздухе, существенно возросла в связи с переоценкой их вклада в наблюдаемые и моделируемые климатические и экологические изменения, недоучет которых огормен (Kawecki and Ebert, 2004; Burrows et al., 2009; Poschl et al., 2010; Despres et al., 2012; IPCC, 2014). Наблюдения за данными частицами, существенно расширились, в частности в сфере здравоохранения, ввиду их способности оказывать влияние на состояние человека, а также и в генной инженерии, т.к., например, пыльцевые зерна играют важную роль в опылении растений и распространении модифицированных генов (Zhang et al., 2017; Brackett et al., 2021), что может оказывать влияние на изменение ареалов растений.

1.2. Распространение пыльцы в атмосфере

К биологическим частицам (биоаэрозолям) относят частицы природного происхождения: в первую очередь бактерии, споры грибов и их фрагменты, пыльцу, вирусы, микроскопические водоросли, цианобактерии, лишайники, биологические наросты и остатки растительного или животного происхождения (Despres et al., 2012). При этом именно они являются одной из важных составляющих атмосферного аэрозоля, присутствуя преимущественно в нижних слоях атмосферы, куда поступают непосредственно из биосферы (Despres et al., 2012). Среди частиц биологического происхождения пыльца является одним из самых крупных представителей (рисунок 1.3), размеры которой варьируют от 2 до 100 мкм, при этом она покрыта оболочкой из спорополленина (устойчивой к внешним воздействиям), что позволяет пыльцевым зернам долгое время сохраняться в атмосфере, не смотря на влияние многочисленных физических и химических факторов (Despres et al., 2012).

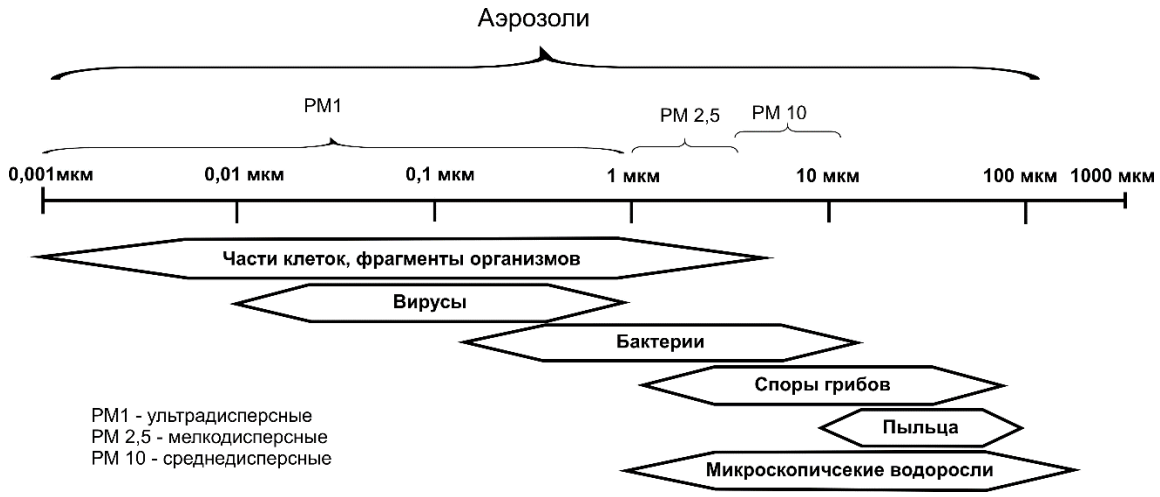

Рисунок 1.3 – Размеры частиц биологического происхождения (Ghimire et al., 2019)

Пыльцевые зерна, присутствуя в атмосфере, оказывают существенное влияние на климат, в первую очередь через перераспределение радиационных потоков (Despres et al., 2012; Steiner et al., 2015; Li et al., 2020). При этом объем эмиссии пыльцы в среднем составляет порядка 87 Тг в год, а ее поступление в воздушную среду возможно активным или пассивным путем (Despres et al., 2012; Hu et al., 2020). Пассивное поступление происходит вследствие механического воздействия внешних факторов на источник биологических частиц. Активный путь поступления обусловлен особенностями самих биологических объектов, проявляющихся в качестве ответа на воздействие внешних факторов, например, изменения влажности воздуха или температуры окружающей среды. Ярким примером активного процесса поступления биологических частиц в атмосферу является эмиссия пыльцы в период пыления растений, интенсивность которой зависит как от температурных и влажностных условий, так и от ряда других метеорологических параметров.

Осаждение биологических частиц, в частности пыльцевых зерен, из атмосферы происходит вследствие седиментации (сухое осаждение) и/или вымывания (мокрое осаждение) (рисунок 1.4). При этом вклад седиментации в поступление частиц биологического происхождения на подстилающую поверхность в умеренных широтах составляет всего 10-20% (Ивлев, 1999; Emerson et al., 2020), и его учет более важен при локальных исследованиях, так как в региональных и глобальных масштабах он нивелируется (Fröhlich-Nowoisky et al., 2016). При влажном

осаждении твердые атмосферные осадки (снег) вымывают аэрозоли в 3-4 раза эффективнее относительно жидких осадков (дождя), и пыльцевые зерна выступают в качестве ядер конденсации (Семенченко, 2002; Blanco-Alegrea et al., 2021).

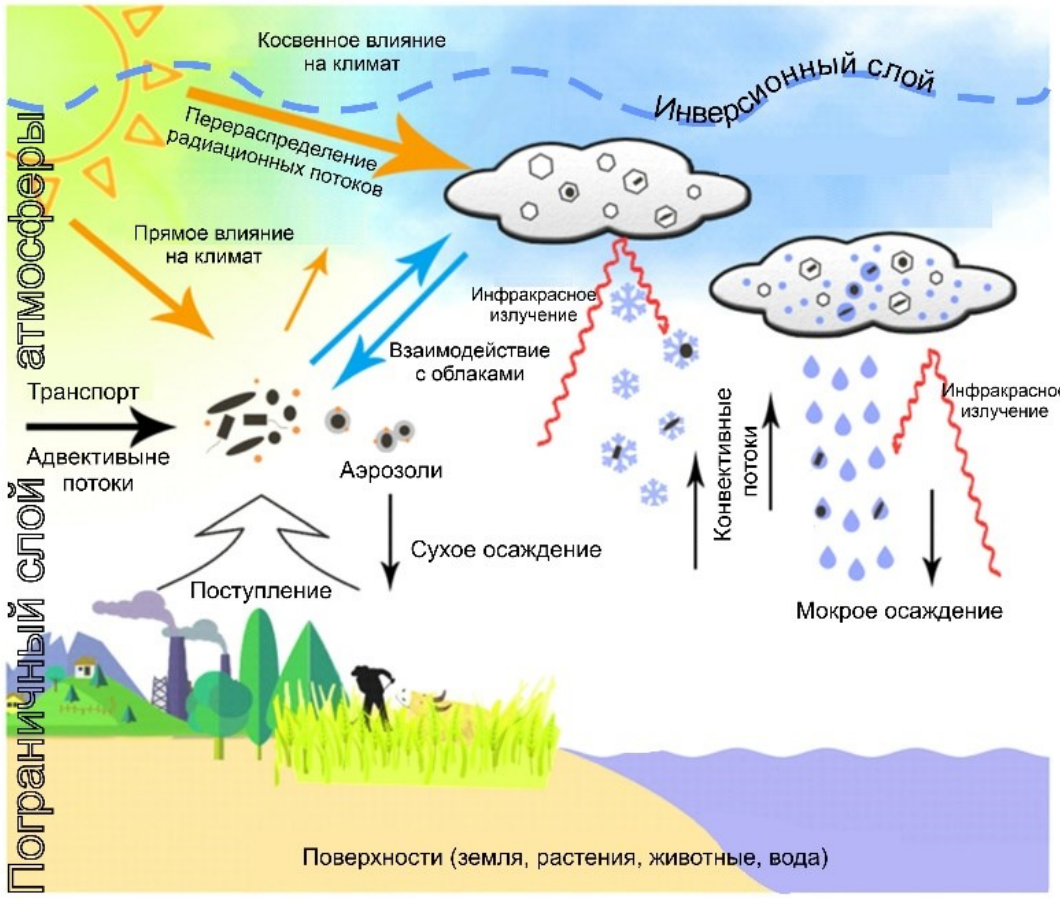

Рисунок 1.4 – Схема поступления, трансформация и осаждения частиц биологического происхождения (по: Hu et al., 2020)

Пыльца имеет сезонный характер распространения, ограниченный преимущественно периодом вегетации растений, т.е. теплым периодом года, и ее максимальные концентрации в воздухе наблюдаются в пик пыления растений (Tormo et al., 2010). Такими образом, в зимний период, когда присутствует снежный покров, даже вторичный локальный подъем пыльцы с подстилающей поверхности исключается. При этом в локальном масштабе основной период пыления для каждого растения предсказуем, однако он может существенно смещаться как на более ранние, так и на более поздние сроки в зависимости от условий окружающей среды, в первую очередь, синоптических. Также возможен занос пыльцы с воздушными массами, т.е. в следствие адвективного поступления с удаленных

территорий, что может существенно влиять на период нахождения пыльцы в воздухе и особенно четко проявляться в северных регионах, где пыление начинается сравнительно позднее, чем в южных (Посевина, 2011).

Попадая в атмосферу, пыльцевые зерна находятся преимущественно в приземном слое (рисунок 1.4), высота которого зависит от подстилающей поверхности, времени суток, температуры, скорости ветра и ряда других метеопараметров. Для данного слоя характерны турбулентные потоки, способствующие переносу биологических частиц не только в горизонтальном, но и вертикальном направлении, т.е. их преимущественному перемещению из нижних слоев в более высокие под действием конвективных потоков, а в горизонтальном направлении под действием адвективных потоков (Семенченко, 2002; Theuerkauf et al., 2013).

Приземный слой атмосферы является нижней частью пограничного слоя атмосферы, который на верхней границе перекрывается инверсионным слоем, препятствующим дальнейшему вертикальному перемешиванию воздуха, и, как следствие, ограничивающим попадание частиц в более высокие слои (Linskens and Jorge, 1986; Brunet et al., 2017; Nissanka et al., 2018). На верхней границе ПСА направления движения воздушных масс соответствуют направлению изобар (Семенченко, 2002), а высота этой границы может значительно варьировать в зависимости от орографии и аэродинамических свойств подстилающей поверхности, а также скорости турбулентных потоков и ряда других факторов (Семенченко, 2002). В этой связи процессы, обуславливающие поступление в атмосферу, дальнейший перенос и осаждение пыльцевых зерен, в первую очередь, необходимо изучать в переделах ПСА.

Дальность атмосферного переноса пыльцевых зерен стоит учитывать не только при изучении направлений потоков движения воздушных масс, но и в ряде других исследований, например, при исторических реконструкциях или геоэкологических оценках окружающей среды (Федорова, Вронский, 1980; Kawecki and Ebert, 2004). Важно отметить, что в последнее время проводились исследования, учитывающие дальность транспортировки пыльцы в связи с

необходимостью оценок рисков и управления распространением генетически модифицированных организмов (Hofmann et al., 2014).

Первые исследования атмосферного переноса пыльцевых зерен были проведены еще в начале прошлого века, когда Г. Хессельман летом 1918 г. установил чашки Петри на расстоянии 30 и 55 км от берега на маяках Ботнического залива. За период с 16 мая по 25 июня на чашки, размещенные на ближайшем маяке, осело более 100 тысяч пыльцевых зерен сосны, березы и ели, а на втором маяке – в два раза меньше пыльцы, однако состав пыльцевых спектров разнился незначительно. Полученные результаты позволили сделать предварительные выводы о том, что пыльцевые зерна способны переноситься на значительные расстояния от ареала произрастания продуцирующих их растений (Грегори, 1968).

Воздушные пути распространения пыльцевых зерен изучают с использованием различных методов, все многообразие которых можно разделить на следующие:

- улавливание пыльцевых зерен на различных высотах и расстояниях от источника при помощи специальных пробоотборников;
- эксперименты с перекрестным опылением растений, находящихся на значительных расстояниях друг от друга;
- анализ пыльцевых спектров в поверхностных слоях почвы, донных отложениях и др.;
- определение дальности переноса по теоретическим и модельным подсчетам на основании ряда параметров пыльцевых зерен (удельный вес, аэродинамические свойства и др.) (Федорова, Вронский, 1980).

На распространение пыльцевых зерен в атмосфере влияют как биологические особенности самих растений, так и внешние факторы. В числе основных внешних факторов выделяют температуру воздуха окружающей среды, влажность, атмосферные осадки, скорость и направление движения воздушных масс. Так при повышении температуры возрастает интенсивность пыления растений и, как следствие, ее поступление в атмосферу, а максимальные концентрации пыльцы отмечаются при отметке выше +20˚С, что показывает ряд исследований (Ahas et al.,

2002; Fitter and Fitter 2002; Walther et al., 2002; Galán et al., 2005; Frei and Gassner, 2008; Newnham et al., 2013; Sofia et al., 2017), однако значительную часть подобных работ проводили относительно локально, охватывая лишь несколько сезонов и/или таксонов (Sofiev et al., 2013; Liu et al., 2016; Zhang et al., 2014). По данным работ по улавливанию пыльцы, проведенных на протяжении всего года на 8 станциях, расположенных равномерно по всей территории Англии, было показано, что наибольшие концентрации пыльцевых зерен в воздухе были зафиксированы в период вегетации. С конца августа до середины марта, когда частично присутствовал снежный покров были выделены лишь единичные пыльцевые зерна, при этом пыльца, находящаяся в воздухе, на 93% принадлежала ветроопыляемым растениям (Головко, 2004).

При увеличении влажности атмосферного воздуха количество пыльцы в атмосфере снижается, т.к. водяные пары способствуют осаждению пыльцевых зерен, а при значениях более 90% происходит принципиальное сокращение ее количества. Важно отметить, что атмосферные осадки активно вымывают пыльцевые зерна, находящиеся во взвешенном состоянии в воздушной среде, и непосредственно смывают их с раскрытых цветков. Влияние движения воздушных масс на распространение пыльцы было показано в ходе ряда работ, а данные натурных исследований подтверждали, что постоянные ветры, дующие в период максимального пыления, могут обусловить до 50% заноса пыльцы в подветренные районы (Заклинская, 1950; Мальгина, 1950, 1959; Федорова, 1956; Вронский, 1976; Nagarajan and Sing, 1990; Головко, 2004), но при этом метеорологические условия определяют не только перенос пыльцы, но и в значительной мере лимитируют время ее пребывания в атмосфере (Fang et al., 2018).

К основным биологическим факторам, влияющим на распространение пыльцы, относят: особенности цветения растений, количество продуцируемой пыльцы, а также размер и вес каждого пыльцевого зерна. Ветроопыляемые (анемофильные) растения продуцируют большое число пыльцы, морфологические особенности которой (гладкая экзина, наличие воздушных мешков и т.д.) способствуют их дальнему переносу. Пыльца насекомоопыляемых растений имеет

скульптурированную экзину, что позволяет пыльцевым зернам объединяться в группы, а также другим взвешенным частицам налипать на их поверхность, существенно утяжеляя, и, как следствие, не позволяя переноситься на значительные расстояния (Федорова, Вронский, 1980).

По данным Мальгиной (1950) пыльцу деревьев можно поделить на три группы: пыльца, которая выносится в больших количествах (сосна); пыльца, поступающая в меньших количествах (береза); пыльца, выносимая в незначительных количествах (липа, вяз, дуб). Так ранее было показано, что пыльца сосны способна переносится на расстояния до нескольких тысяч километров и встречалась в образцах, полученных еще в середине прошлого века и далеко за пределами своего ареала, например, в Арктике (Polunin, 1951), Гренландии, на поверхности ледника Франка-Иосифа (Кренке, Федорова, 1961). Подобно пыльце сосны, пыльца березы была идентифицирована в поверхностных пробах, полученных на значительном удалении от ареала ее произрастания, и она отмечалась почти во всех анализируемых образцах почв независимо от района исследования, а на ее долю приходилось 1-2% от общего числа пыльцевых зерен в спорово-пыльцевых спектрах пустынь Южного Казахстана и Средней Азии (Головко, 2004).

Пыльца трав имеет ограниченную возможность транспортироваться по воздуху по сравнению с пыльцевыми зернами деревьев, что связано с их небольшой пыльцевой продуктивностью, т.к их значительная часть относится к этномофильным растениям, расположенным в нижних ярусах, поэтому она оседает недалеко от источника (Заклинская, 1950; Мальгина, 1950, 1959; Федорова, 1952, 1959; Вронский, 1976; Головко, 2004).

Данные по распространению пыльцевых зерен подтверждают и результаты исследований А.Н. Сладкова (1967) (таблица 1.2), согласно которым, пыльца сосны (*Pinus* sp.) может транспортироваться на несколько тысяч километров, пихты (*Abies* sp.) на 1250–1300 км, ели (*Picea* sp.) на 300-400 км, в то время как пыльцевые зерна трав переносятся преимущественно в пределах ареала (таблица 1.2). Среди древесных видов пыльца сосны имеет наиболее крупные размеры (60–100 мкм) и

снабжена так называемыми «воздушными мешками», которые превосходят размер самого тела пыльцевого зерна, поэтому она легко переносятся на огромные расстояния. В то же время дальность переноса пыльцы лиственницы от дерева-продуцента не превышает первых сотен метров, поскольку ее пыльцевые зерна не имеют специальных приспособлений для транспортировки по воздуху (Савина, 1981).

Таблица 1.2 – Данные по расстоянию переноса пыльцевых зерен

Таксон	Дальность заноса пыльцы (км)	
	Сладков, 1967	Giner et al., 2001
Лиственница	Несколько сотен метров	-
Сосна	500-1700	1000
Ель	300-400	-
Пихта	1250-1300	1300
Береза	250-300	1000
Ольха	Около 1 км	585
Дуб	Преимущественно в пределах ареала	1000-1500
Липа	Преимущественно в пределах ареала	585
Граб	Преимущественно в пределах ареала	-
Вяз	Преимущественно в пределах ареала	-
Травы	Преимущественно в пределах ареала	-

Исходя из оценки относительной летучести пыльцы, компоненты каждого спектра В.П. Гричук (1989) делит на четыре группы: региональные, квазирегиональные, сублокальные и локальные. Региональные компоненты – это пыльца, переносящаяся по воздуху на расстояния, измеряемые тысячами и сотнями километров, в свою очередь пыльцу, транспортирующуюся на десятки километров, относят к квазирегиональным компонентам, на сотни метров – к сублокальным, и на расстояния, измеряемые метрами – к локальным.

Дальность переноса пыльцы в значительной степени зависит и от того, на какую высоту были подняты пыльцевые зерна. Под влиянием конвективных

потоков в пределах ПСА пыльца способна транспортироваться в атмосферу на значительные высоты, однако границы высотного предела зависят от интенсивности эмиссии, температуры окружающей среды, влажности, скорости ветра, а также ряда других параметров (Linskens and Jorge, 1986). Однако не стоит исключать хоть и едкий, но все же возможный более значительный подъем отдельных пыльцевых зерен и их вовлечение в дальнейший глобальный перенос (Monin and Obukhov, 1954; Tackenberg, 2003; Taylor and Jonsson, 2004; Wright et al., 2008). В количественном выражении максимальные концентрации пыльцы регистрируются на высотах от 100 до 500 м, а на 2000 м отмечают уже лишь единичные экземпляры (Головко, 2004).

При моделировании переноса пыльцевых зерен в атмосфере в основном используют модели двух типов: лагранжевые и эйлеровые. Первые описывают изменения только одной компоненты, рассчитываемой вдоль траектории движения воздушных масс частицы, а пассивные компоненты остаются неизменными (Лукьянов и др., 2015). В эйлеровых моделях, в отличии от лагранжевых, учитывается диффузия, в первую очередь, процессы рассеивания реагирующих примесей и их трансформации, поэтому они менее подходят для изучения атмосферного распространения пыльцы, устойчивой к различным воздействиям условий окружающей среды.

Среди лагранжевых модель Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model – HYSPLIT в настоящее время является наиболее часто используемой, т.к. результаты ее реализации позволяют устанавливать как прямые, так и обратные связи между источниками и рецепторами посредством расчета траекторий движения воздушных масс, а с ними и частиц в атмосфере. При построении траекторий в качестве исходных данных обязательно задают координаты точки наблюдения, время старта (для прямых траекторий), либо время прихода (для обратных траекторий) частицы и общее время движения, и высоту переноса. После этого происходит обработка метеоданных, результаты которой интерполируются во внутреннюю сетку модели, а затем реализуется непосредственное вычисление траекторий.

Результаты расчетов траекторий в HYSPLIT в зависимости от заданных условий могут быть отображены тремя способами. Первый и один из самых часто используемых способов визуализации – это простой тип графика, отображающий траекторию перемещения одной частицы с учетом метеорологических параметров в разных масштабах на основе как архивных, так и прогнозных данных. При таком типе возможен выбор нескольких траекторий для разных высот, сходящихся в одну точку (рисунок 1.5 а). Данные расчетов единичных обратных траекторий используют, например, при палеореконструкциях по данным спорово-пыльцевых спектров, выделенных в объектах криосферы (Rousseau et al., 2008; Papina et al., 2015), а также при изучении дальнего сухого переноса пыльцы (Kasprzyk et al., 2011; Skjoth et al., 2007; Myszkowsk et al., 2021).

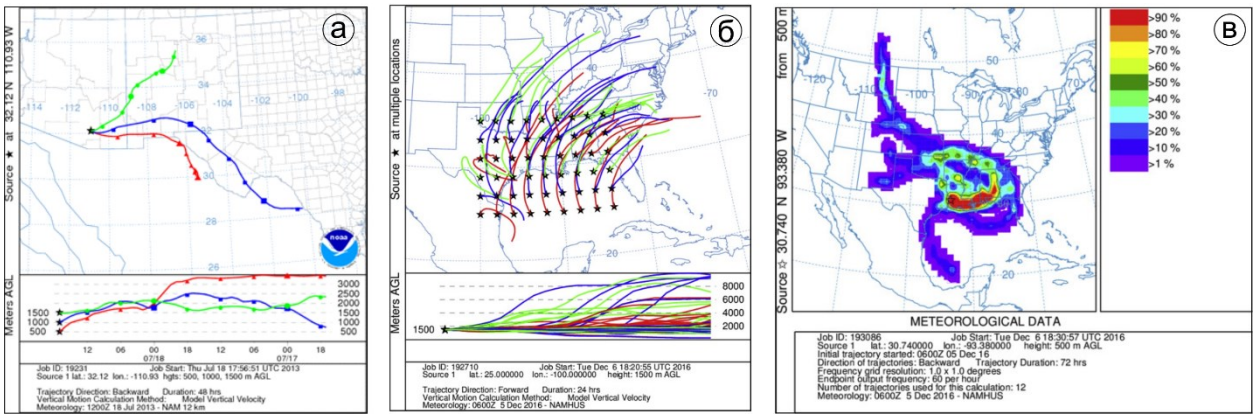

Рисунок 1.5 – Вид рассчитанных траекторий HYSPLIT:

(а) единичный; (б) матричный; (в) частотный

Второй тип визуализации результатов моделирования представляет собой матрицу, где рассчитанные траектории движения воздушных масс ограничены сеткой, рамки которой вводятся пользователем в качестве исходных данных (рисунок 1.5 б). Отражением направлений множества отдельных траекторий с учетом их процентного вклада выступает третий тип – частотный (рисунок 1.5 в), который используют при определении вклада той или иной траектории в общее поступление воздушных масс, а соответственно, и частиц. При построении таких траекторий расчет осуществляется каждые 6 часов с одного места и высоты, а затем суммируется то число раз, которые траектории проходили по ячейке сетки, и в дальнейшем полученные результаты группируются по общему количеству

траекторий или конечных точек. В аэробиологических исследованиях для определения территорий, с которых поступали пыльцевые зерна, чаще всего используют единичные обратные траекторий HYSPLIT, которые строят для «стандартных» аэробиологических высот в целях разномасштабного охвата переноса частиц. Но большинство процессов, связанных с атмосферным переносом частиц биологического происхождения, происходит в пределах ПСА (Tignat-Perrier et al., 2020).

При траекторном моделировании важно учитывать возможность поступления дальнезаносной пыльцевой компоненты, вычленение которой может базироваться на основе комплексных исследований, включающих в себя аэробиологические, метеорологические и фенологические наблюдения, анализ растительного покрова изучаемой территории (Siljamo et al., 2008). Однако стоит отметить, ранее подобные исследования реализовались только в период вегетации, а поступление частиц биологического происхождения (в первую очередь, пыльцы) возможно круглогодично, т.е. даже в холодный период, при отрицательных температурах. Например, осевшая во время основного периода пыления на подстилающую поверхность пыльца под действием восходящих потоков может снова подниматься в воздух, внося свой существенный вклад в пыльцевой спектр, а затем и транспортироваться на значительные расстояния. Исследований, посвященных оценкам таких поступлений и распространений пыльцы в холодный период не так много, и они узко локализованы или носят эпизодический характер (Kasprzyk and Borycka, 2019).

1.3. Мониторинг пыльцевых зерен

Пыльцевые зерна являются одними из аллергенных представителей биологических частиц, и согласно докладу Всемирной организации здравоохранения, опубликованному в начале 2000-х гг., пыльца была признана сильнейшим аллергеном, от которого страдало более 20% населения (WHO, 2003). Однако мониторинг пыльцы в атмосфере в большинстве случаев ограничен

периодом вегетации и сосредоточен лишь на определении концентраций пыльцевых зерен в воздухе, что обусловлено необходимостью составления аллергопрогнозов для более эффективного информирования населения и, как следствие, качественного лечения. Все наблюдения за распространением пыльцы в воздухе проводят прямыми и косвенными методами. При использовании косвенных методов удается получить данные не только о содержании пыльцы в воздухе, но и оценить дальность и направление ее переноса на основе расчетов или моделирования (Головко, 2004). При прямых исследованиях пыльцу из воздуха улавливают с помощью пробоотборников, которые по своему принципу действия разделяют на: пробоотборники с седиментационным (естественным) осаждением и с принудительным отбором (Головко, 2004).

Принцип действия седиментационных пробоотборников основан на осаждении частиц из воздуха под действием силы тяжести на улавливаемые поверхности, в качестве которых чаще всего используют предметные стекла, покрытые глицерин-желатиновой смесью или вазелином, а также чаши Петри с питательной средой. Данный тип пыльцевых ловушек (пробоотборников) прост в использовании, не требует больших финансовых затрат, автономен, что обеспечивает непрерывность его работ при длительных наблюдениях. Однако при его использовании необходимо учитывать, что в зависимости от размеров частиц скорость их осаждения может существенно варьировать, так крупные частицы оседают гораздо быстрее, чем мелкие, что накладывает некоторые ограничения при анализе результатов исследований полученных проб (Головко, 2004).

К седиментационному типу пробоотборников относят ловушку Дюрама, которая состоит из двух дисков, расположенных параллельно друг другу, при этом на нижнем диске крепится предметное стекло, покрытое глицерин-желатиновой смесью, которое меняется с разной периодичностью в зависимости от целей исследования. Данный тип пробоотборника не очень эффективен, так как при увеличении потоков воздуха до 0,5 м/с на поверхность предметного стекла оседает менее 3% взвесей, находящихся в воздухе, а при увеличении ветра до 10 м/с, этот показатель снижается до значения менее 1% (Головко, 2004). В этой связи

результаты, полученные с использованием данного пробоотборника, не могут в полной мере отразить качественный и количественный состав пыльцы в воздухе.

Пыльцевая ловушка Таубера состоит из емкости, закрытой крышкой, имеющей отверстие диаметром 5 см и скосые края, предотвращающей попадание лишней жидкости (осадков) вовнутрь, что было регламентировано правилами PMP. Таким образом, данный седиментационный пробоотборник аккумулирует как сухое, так и мокрое осаждение (с атмосферными осадками) пыльцы из атмосферы, но перед установкой ловушки на длительный период на дно добавляют формалин с целью сокращения развития микрофлоры и глицерин, который выступает в качестве улавливающей среды. Пробоотборники, согласно рекомендациям PMP, зачастую устанавливают на год с целью получения информации о годичной пыльцевой продуктивности, что, в свою очередь, позволяет анализировать и устанавливать взаимосвязь между видовым разнообразием пыльцы, растительностью и климатом для дальнейшей оценки изменений природных сред и верификации условий прошлого. Таким образом, этот седиментационный пробоотборник прост в использовании, не требует значительных финансовых затрат в изготовлении, автономен и позволяет реализовывать непрерывный мониторинг за пыльцевой компонентой, поступающей как в ходе сухого, так и мокрого осаждения из атмосферы.

Пробоотборники с принудительным отбором проб прокачивают воздух, и взвешенные частицы, которые оседают на фильтрах, липких поверхностях, либо в жидкостях, и в зависимости от физического механизма улавливания частиц, их разделяют на импакторы, фильтры, импиджеры, циклоны (Головко, 2004; William et al., 2017). Наиболее распространенными пробоотборниками данного типа при изучении пыльцевой компоненты в воздухе являются ловушка Буркарда и работающий по тому же принципу пробоотборник Хирста, в которых происходит принудительная прокачка воздуха со скоростью порядка 10 л/мин, что близко к среднему объему воздуха, потребляемому человеком при дыхании. Далее используя данные об объеме прокачиваемого воздуха, можно определить концентрацию пыльцы, спор и грибов в единице объема воздуха (1 $м^3$). Для анализа

общей региональной динамики пыльцевого спектра ловушку Буркард, как и Хирста, устанавливают на высоте 15–20 м, и данный тип ловушек используют преимущественно при аэропалинологических исследованиях, проводимых чаще всего в период вегетации (Kapyla and Penttinen, 1981; Leuschner, 1999; Comtois et al., 1999; Carinanos et al., 2000; Jato et al., 2006; Carvalho et al., 2008; Sikoparija et al., 2011; Velasco-Jimenez et al., 2013).

Негативное воздействие пыльцы на организм человека через способность вызывать аллергию послужило мощным толчком для создания станций мониторинга, на которых получают информацию о качественном и количественном составе пыльцевых зерен. По данным 2018 г. (Buters et al., 2018) в Европе функционировало более 600 станций пыльцевого мониторинга, объединённых Европейской сетью аэроаллергологов, при этом деятельность каждой станции была регламентирована стандартом, определяющим процедуру отбора проб и анализа концентраций переносимых по воздуху пыльцевых зерен и спор с использованием пробоотборника типа Херста (CEN/TS 16868:2015).

Подобный нормативный документ был разработан для Австралии (Beggs et al., 2018), и в нем были определены принципы, протоколы и процедуры мониторинга за пыльцой и спорами в воздухе, включая различные аспекты сбора образцов, их первичную обработку, подсчет и анализ данных, подготовку отчетной документации. Основная цель введения данных нормативных документов заключается в получении качественных и количественных данных, в первую очередь, об аллергенной пыльце и спорах для дальнейшего составления аллергопрогнозов, а также для изучения атмосферного переноса пыльцевых зерен. Однако несмотря на то, что в настоящее время наблюдения за пыльцевой компонентой в атмосфере четко регламентированы по времени, все же они ограничены периодом вегетации той территории, на которой они проводятся.

В России максимальное количество действующих аэропалинологических станций по данным 2012 г. было чуть больше десяти, при этом их значительная часть была сосредоточена в Европейской части страны. За Уралом первая точка мониторинга была организована на территории г. Барнаул (юг Западной Сибири),

где с 2004 г. с использованием ловушки Буркада ведутся наблюдения за качественным и количественным содержанием пыльцы в воздухе с целью получения данных о наличии аллергенной пыльцы в воздухе (Ненашева, 2013). Деятельность всех станций пыльцевого мониторинга в России осуществляется в соответствии с международными рекомендациями, что позволяет получать репрезентативную информацию для дальнейшего анализа и сравнения с данными других точек мониторинга, но все же единого методического обеспечения по мониторингу за пыльцой на территории России еще не существует.

Таким образом, большинство наблюдений, проводимых в том числе и на станциях аэропалинологического мониторинга, с использованием разнотипных пробоотборников не позволяют оценивать полный объем поступления пыльцы из атмосферы. Это связано с тем, что отсутствует возможность учета вымывания пыльцевых зерен с осадками, особенно с твердыми (снегом), которое существенно превалирует как над сухим осаждением, так и дождем. В этой связи, мониторинг пыльцы, поступающей с атмосферными осадками, в первую очередь с тердыми, рекомендуется проводить с использованием пыльцевых пробоотборников, соответствующих требованиям PMP и позволяющих отдельно отбирать каждый случай выпадения снега на территориях с устойчивым снежным покровом, который является основным лимитирующим фактором локального поступления пыльцевых зерен для вычленения адвективной пыльцевой составляющей, способной отражать горизонтальные связи между геосистемами регионального уровня.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Физико-географические условия территории исследования

Расположенная на юго-востоке Западной Сибири между Западно-Сибирской равниной и Алтае-Саянской горной областью территория исследования частично занимает Кулундинскую равнину, Приобской плато, долину Оби, Бийско-Чумышскую возвышенность. В целях получения данных о пыльцевой составляющей в твердых атмосферных осадках в равнинной части юго-востока Западной Сибири были выбраны точки для проведения мониторинга (рисунок 2.1) с учетом следующего: расположение точек репрезентативно с позиций охвата физико-географических условий (типичная степная и лесостепная области); в непосредственной близости размещены метеорологические станции, данные которых можно использовать для оценок синоптических условий; средняя продолжительность холодного периода и периоды выпадения осадков в твердом виде, как и даты формирования и разрушения устойчивого снежного покрова близки, что позволит получить одинаковые по продолжительности ряды наблюдения всех точек мониторинга.

Климатические условия территории исследования детально описаны и представлены в работах А.П. Сляднева и Я.И. Фельдмана (1958), А.П. Сляднева (1973), Атласе Алтайского края (1978), Н.Ф. Харламовой (1995, 2013) и др., но для корректного решения поставленных задач необходимо рассмотреть в первую очередь особенности циркуляционных условий и данных о снежном покрове. Местоположение юго-востока Западной Сибири определяет возможность не только влияния океанов, но проявления континентальности климата, проникновения арктических и тропических воздушных масс, способствующих развитию фронтальных зон и активных атмосферных процессов (Харламова, 1995). При этом на территории исследования ощущается воздействие соседней Алтае-Саянской горной страны, проявляющееся в увеличении количества осадков в

восточной части, вызванное обострением турбулентных процессов по мере приближения к горам атмосферных фронтов (Сляднев, Фельдман, 1958). В целом для территории характерны неустойчивые погодные условия, что обусловлено чередованием воздушных масс различного происхождения.

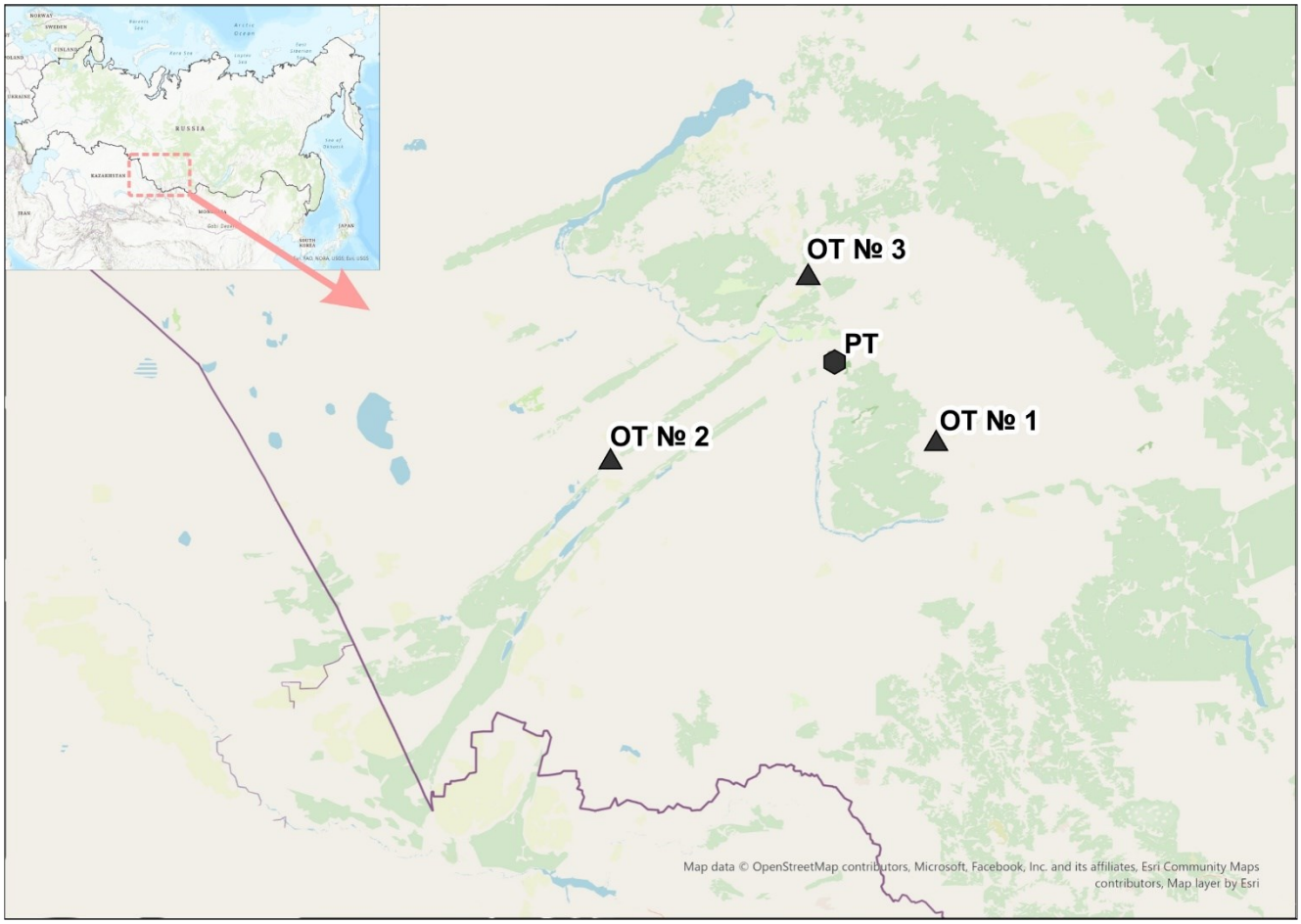

Рисунок 2.1 – Территория исследования и местоположение опорных точек (РТ – рекогносцировочная точка, ОТ – опорная точка)

Все же основной закономерностью атмосферной циркуляции на юго-востоке Западной Сибири является преобладание западного переноса воздушных масс (Харламова, 2013), но наблюдаются сезонные изменения, так с ноября по первую половину декабря зачастую проявляется циклоническая деятельность, обуславливающая большое число снегопадов. В целом, в зимний период преобладает Азиатский (Монгольский, Сибирский, Центральноазиатский) антициклон с повышенным атмосферным давлением, определяющий значительные понижения температур, а с февраля уже наблюдается неустойчивая погода с

увеличением скоростей ветра и буранами. При прохождении западных циклонов может устанавливаться положительная аномалия температур и фиксироваться продолжительные снегопады. До 30% зимних циклонов, проходящих над территорией юго-востока Западной Сибири – северные и северо-западные, вызывающие сильные метели, ветры и снегопады. Весной преобладают циклоны западного направления (36%), приходящие с Атлантики, при этом северо-западные циклоны (35%) вызывают весенние заморозки, снегопады и метели, а юго-западные циклоны составляют 29% (Харламова, 2013). Средняя скорость ветра зимой в степи и открытой лесостепи составляет 4-6 м/с, зачастую наблюдаются метели, повторяемость которых в степных районах может превышать 50 дней, с преобладанием в декабре. В Барнауле, где находилась РТ мониторинга, преобладают ветра западного и юго-западного направления, что характерно для всех сезонов года с большей повторяемостью в холодное полугодие, а в теплое – могут наблюдаться как южные, так и северные ветры (рисунок 2.2).

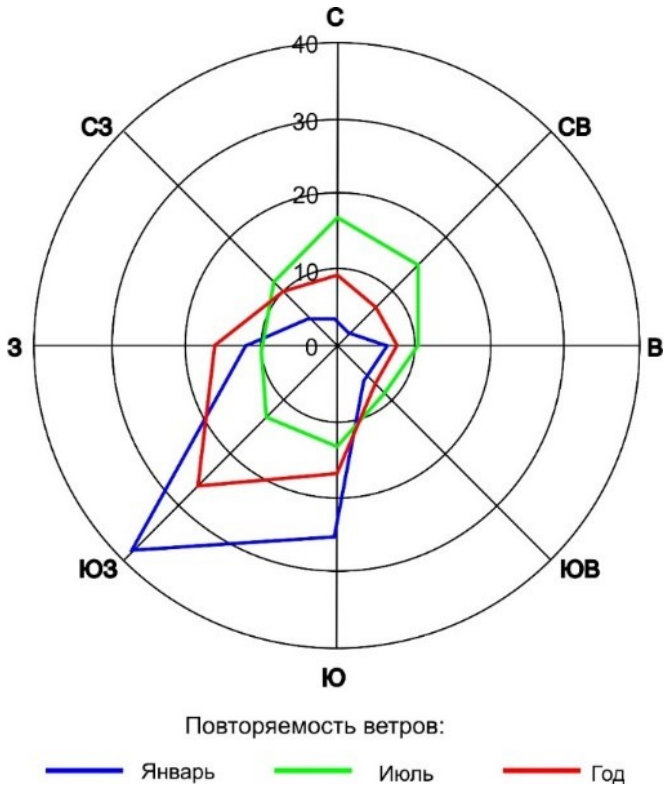

Рисунок 2.2 – Роза ветров для г. Барнаул (Харламова, 2013)

На распределение осадков на юго-востоке Западной Сибири оказывает влияние горное обрамление территории, которое сдерживает проникновение

влагонесущих воздушных масс, что приводит к увеличению осадков с запада на восток и отчетливо проявляется в их годовом распределении, от 200–250 мм в Кулундинской степи, до 500-550 мм на Бийско-Чумышской возвышенности (Атлас Алтайского края, 1978), причем южные циклоны вносят максимальный вклад в осадки (Малыгина и др., 2014). Такое распределение осадков по территории обуславливает плавный переход от степной к лесостепной зоне. Атмосферные осадки в течение года выпадают неравномерно и максимальное количество наблюдается в июле, а минимальное – в феврале-марте, при этом 70% зимних осадков приходится на первую половину холодного периода (Харламова, 2013).

Средняя дата формирования устойчивого снежного покрова на территории исследования отмечается в первой декаде ноября, а максимальное снегонакопление фиксируется в феврале-марте, и достигает 110 см, но при этом территория исследования в целом характеризуется неравномерным распределением снежного покрова (Харламова, Казарцева, 2015). Максимальные среднедекадные высоты снежного покрова в лесостепях достигают 43–53 см, что объясняется значительной залесенностью и большой повторяемостью циклонов (Харламова и др., 2013). Минимальные значения характерны для степной территории Кулунды – 20–25 см, чему способствует значительная повторяемость антициклонов с низкими температурами и малым количеством осадков в следствие застаивания воздушных масс в понижениях Кулундинской равнины (Харламова, 2013; Харламова, Казарцева, 2014; Харламова, Казарцева, 2015). Начиная с марта снежный покров сокращается, его разрушение фиксируется в среднем в первой декаде апреля, при этом окончательный сход приходится на 20-е числа этого месяца. Средняя продолжительность залегания снежного покрова составляет 154–160 дней, варьируя год от года в пределах 145–198 дней (Харламова, 2013).

Согласно схеме природного районирования (Сляднева, Фельдман, 1958) выбранные точки мониторинга расположены в степной и лесостепной зонах. ОТ № 1 была размещена в южной части лесостепи, для которой характерна более теплая и многоснежная зима, общее число дней, когда на территории фиксируется снежный покров, в среднем составляет 158, и начинает формироваться 10 ноября,

а его разрушение происходит в районе 8 апреля. ОТ № 3 расположена в подзоне средней лесостепи лесостепной зоны, где в среднем начиная с первых чисел ноября в течение 165 дней фиксируется снежный покров, разрушение отмечается в середине апреля. На рекогносцировочной точке средняя продолжительность залегания снежного покрова составляет 165 дней, средней начальной датой его формирования считается 4 ноября, а разрушение – 10 апреля. ОТ № 2 расположена в умеренно-засушливой зоне степи, для которой характерны: малоснежные зимы со средней высотой снежного покрова до 40 см; значительное понижение температур в начале сезона; сильные бураны в декабре и марте (Сляднев, Фельдман, 1958).

Растительный покров территории представлен преимущественно следующими типами растительности: леса, степи, луга, кустарниковая, водная, солончаковая и синантропная растительность (Куминова, 1960; Силантьева, 2013). Растительные зоны наиболее полно были охарактеризованы В.Д. Александровой, Н.П. Гуричевой, Л.И. Иваниной (1958). Согласно схеме геоботанического районирования (Александрова и др., 1958) точки проведения мониторинга расположены в степной и лесостепной зонах, а также в районе сосновых боров. Так рекогносцировочная точка относится к подзоне южной (колочно-степной) лесостепи Верхнеиртышской провинции степной зоны (Александрова и др., 1958). В окрестностях данной точки расположен Барнаульский ленточный бор, где основной древесной породой является *Pinus sylvestris*, содоминантами выступают *Betula pendula, Populus tremula.* Растительность поймы представлена разнотравно-злаковыми и злаково-разнотравными лугами, которые встречаются на вершинах высоких грив, в межгривенных понижениях отмечаются влажные злаково-осоковые луга и древесно-кустарниковая растительность (Винокуров, Цимбалей, 2016; Ландшафтная карта…, 2016).

Опорная точка № 1 находилась в юго-восточной части подзоны средней лесостепи лесостепной зоны, где преобладающим типом растительности являются злаково-разнотравные луговые степи на выщелоченных черноземах (полностью распаханные) и березовые леса, сохранившиеся главным образом по склонам

долинно-балочной сети. Луговые степи характеризуются богатым разнотравьем, состоящим из *Libanotis intermedia*, *Tragopogon orientale*, *Phlomis tuberosa*, *Vicia amoena*, *Medicago falcata*, *Galium verum*, *Campanula sibirica* и др. Местами по склонам водоразделов и балок на выщелоченных черноземах встречаются разнотравно-ковыльные степные группировки с преобладанием *Stipa capillata*, *St. pennata*, *Koeleria gracilis* с редко разбросанным разнотравьем (*Veronica spicata*, *Galium verum*, *Thalictrum minus* и др.). Леса, состоящие из березы (*Betula verrucosa*), а местами и осины (*Populus tremula*), встречаются как в виде небольших массивов в понижениях на водоразделах, так и в виде балочных лесов, по террасам Оби – сосновые боры и смешанные леса (Винокуров, Цимбалей, 2016; Ландшафтная карта…, 2016).

Опорная точка № 2 была расположена в подзоне богаторазнотравных-типчаково-ковыльных степей степной зоны на обыкновенных черноземах, где зональная степная растительность почти полностью уничтожена распашкой. По неудобьям сохранились богаторазнотравно-дерновиннозлаковые степи, где основу травостоя составляют дерновинные злаки (*Stipa capillata*, *St. rubens*, *Festuca sulcata*, *Koeleria gracilis*, *Helictotrichon desertorum*) со значительной примесью степного разнотравья (*Medicago falcata*, *Peucedanum morisonii*, *Galium verum*, *Veronica incana*, *V. spicata*, *Salvia tesquicola* и др.), и можно встретить осиново-березовые колки, солонцово-солончаковые комплексы, по днищу Касмалинской ложбины древнего стока – сосновые боры и смешанные леса (Винокуров, Цимбалей, 2016; Ландшафтная карта…, 2016).

Опорная точка № 3 находилась в северо-западной части подзоны средней лесостепи лесостепной зоны, где большая часть зональной лесостепной растительности замещена пашнями. По долинам, логам и балкам распространены луговые разнотравно-злаковые степи и злаково-разнотравные остепненные луга, осиново-березовые балочные леса, настоящие и заболоченные луга, по террасам Оби – сосновые боры и смешанные леса (Винокуров, Цимбалей, 2016; Ландшафтная карта…, 2016).

Общие сведения о ландшафтной структуре территории исследования были собраны в ходе экспедиционных работ Московского университета с 1969 г. и отражены в Атласе Алтайского края и последующих монографиях В.А. Николаева (1979, 1999). Детальные ландшафтные исследования проводили при проектировании Кулундинского канала и других проектов (Винокуров, 1980; Кулундинский канал…, 1985; Цимбалей, 1985)

Согласно ландшафтному районированию Ю.И. Винокурова и Ю.М. Цимбалея (Ландшафтная карта…, 2016) территории точек мониторинга относятся к двум провинциям: Верхнеобской и Южноприалейской. Так РТ и ОТ № 1 и 3 были размещены в Верхнеобской провинции, где выделяют южнолесостепную (РТ) среднелесостепную (ОТ № 1 и 3) подпровинции приобского и верхнеобского районов соответственно. ОТ № 2 была расположена в Южноприалейской провинции засушливостепной подпровинции среднеалейского района.

На рекогносцировочной точке тип местности был представлен пологими слаборасчлененными склонами плато с разнотравно-злаковыми луговыми степями на черноземах выщелоченных и обыкновенных в сочетании с осиново-березовыми колками и балочными лесами на серых лесных почвах (Ландшафтная карта…,2016). Местность ОТ № 2, согласно ландшафтному районированию, характеризуется высокими (древние) речными террасами плоскими, пологонаклонными, местами расчлененными долинно-балочными системами со злаково-разнотравными луговыми степями и лугами на выщелоченных черноземах в сочетании с березовыми колками на серых лесных почвах. Тип местности ОТ № 2 – пологие слаборасчлененные склоны плато с разнотравно-типчаково-ковыльными степями на черноземах южных и типчаково-полынными группировками на солонцах, а ОТ № 3 – высокие (древние) речные террасы бугристо-грядовые, перевеянные с сосновыми борами и березово-сосновыми травяными закустаренными лесами на дерново-слабоподзолистых почвах.

2.2. Условия проведения мониторинга пыльцевых зерен в атмосферных осадках холодного периода

Мониторинг пыльцевых зерен в атмосфере чаще всего ограничен периодом вегетации (пыления растений) и охватывает лишь часть частиц, которая циркулирует в воздухе во взвешенном состоянии или оседает в следствии сухого осаждения. Для всесторонней оценки как поступления адвективнх (заносных) пыльцевых зерен в атмосферу, так и их вымывания на подстилающую поверхность, необходимы наблюдения за пыльцой, осаждающейся с атмосферными осадками, особенно в холодный период, когда нивелируется влияние локальной составляющей, за счет наличия устойчивого снежного покрова. В этой связи были проанализированы и обоснованы условия отбора проб, лабораторной пробоподготовки и микроскопирования для выделения адвективной составляющей в пробах твердых атмосферных осадков (снеге).

В рамках мониторинга отбор проб твердых атмосферных осадков необходимо проводить в холодный период года, когда осадки выпадают в твердом виде, а территория исследования и сопредельные с ней районы в радиусе 250–300 км покрыты устойчивым снежным покровом. Снежный покров является лимитирующим фактором, т.е. ограничивающим как локальный (в точке отбора проб), так и региональный (до двух-трех сотен километров) вторичный подъем пыльцевых зерен (Гричук, 1989) с подстилающей поверхности и возможное их последующее осаждение или вымывание с атмосферными осадками.

Пробы твердых атмосферных осадков следует отбирать каждый случай их выпадения в пробоотборники, вмещающие не менее максимального среднесуточного количества осадков, конструкции которых соответствуют требованиям РМР. Периодичность отбора проб должна совпадать с каждым случаем выпадения осадков (с начала выпадения до их окончания) в текущие или смежные сутки, что позволит выделить отдельно мокрое осаждение (с осадками), а также получить высокую временную детализацию. Пробоотборник нужно

устанавливать выше максимально возможной высоты снежного покрова для территории исследования непосредственно перед началом выпадения осадков и снимать сразу после их окончания с целью исключения возможного вторичного пыльцевого загрязнения пробы. С этой же целью пред установкой пробоотборник предварительно отмывают дистиллированной водой. После его снятия осадки следует пересыпать в подготовленные контейнеры для дальнейшей транспортировки и лабораторной пробоподготовки. При маркировке образцов необходимо указывать координаты места отбора, дату отбора, время начала и окончания выпадения осадков, при этом дополнительно стоит фиксировать основные параметры: температуру, влажность, скорость и направление ветра.

Пробоподготовку полученных образцов следует выполнять в лабораторных условиях под вытяжным шкафом с целью исключения их возможного вторичного загрязнения пыльцевыми зернами. В лаборатории пробы необходимо таить при комнатной температуре в герметично закрытых контейнерах, после чего проводить их концентрирование. Выбор оптимальной методики концентрирования является важным моментом в подготовке проб для последующего микроскопического анализа. Так чаще всего для концентрирования используют фильтрационный или седиментационный методы с соблюдением методических рекомендаций, исключающих вторичное загрязнение проб биологическими частицами (Руководство…, 1992).

Особенностью фильтрационного метода является многоступенчатость, с привлечением дополнительного оборудования. В ходе данного метода талую воду пропускают через мембранный фильтр с диаметром пор, позволяющим задерживать пыльцевые зерна в фильтровальной установке. Далее осадок, оставшийся на фильтре, смывают дистиллированной водой, а полученную суспензию помещают в подготовленные (отмытые дистиллированной водой) емкости, а для сокращения развития микрофлоры добавляют 40%-ый формалин, но все же в ходе смывания осадка с фильтра возможна частичная потеря пыльцевых зерен.

При проведении пробоподготовки предпочтительнее использовать седиментационный метод, который не требует использования дополнительного оборудования, но является более продолжительным. При таком методе пробоподготовки на начальном этапе в талую воду стоит добавить 40%-ый формалин и отстаивать пробу с целью осаждения всех взвешенных частиц, в темном прохладном месте до 7 дней. После чего пробу следует концентрировать с помощью ручной трубки-сифона, это позволит отрегулировать скорость откачки воды из пробы и исключить возможность изъятия пыльцевых зерен. Таким образом полученный концентрированный осадок готов к дальнейшему микроскопированию и до момента начала анализа хранится в подготовленных емкостях малого объема. При данном методе пробоподготовки потери пыльцевых зерен минимальны вследствие меньшего числа этапов пробоподготовки.

Определение пыльцевых зерен осуществляют с применением световой и/или сканирующей микроскопии. Световая микроскопия позволяет определять морфологические особенности пыльцы, однако при этом не всегда удается достоверно диагностировать видовую принадлежность, поскольку отличия в строении пыльцевых зерен менее наглядны, чем морфологические признаки видов внутри рода (Swenson and Gemeinholzer, 2016). При проведении световой микроскопии необходимо использовать увеличение от 400 до 1000 раз, что позволит проводить высокую детализацию морфологических особенностей до уровня семейства или рода. Для количественной характеристики пыльцевых зерен в определенном объеме пробы при световой микроскопии возможно использовать счетную камеру Нажотта, при этом препараты необходимо просматривать регулярно расположенными непрерывными трансектами перпендикулярно продольной оси образца.

Для повышения точности идентификации пыльцевых зерен стоит применять сканирующую электронную микроскопию, имеющую большую степень увеличения (до нескольких сотен тысяч раз), что, в свою очередь, позволит более детально проанализировать морфологические особенности пыльцы и существенно повысить степень идентификации до видов. При определении таксономической

принадлежности следует пользоваться атласами и определителями (Куприянова, Алешина, 1972, 1978; Дзюба, 2005; Карпович и др., 2015).

Таким образом, мониторинг и определение пыльцевых зерен в пробах твердых атмосферных осадков холодных периодов должны реализовываться при соблюдении условий, представленных в структурной схеме (рисунок 2.3).

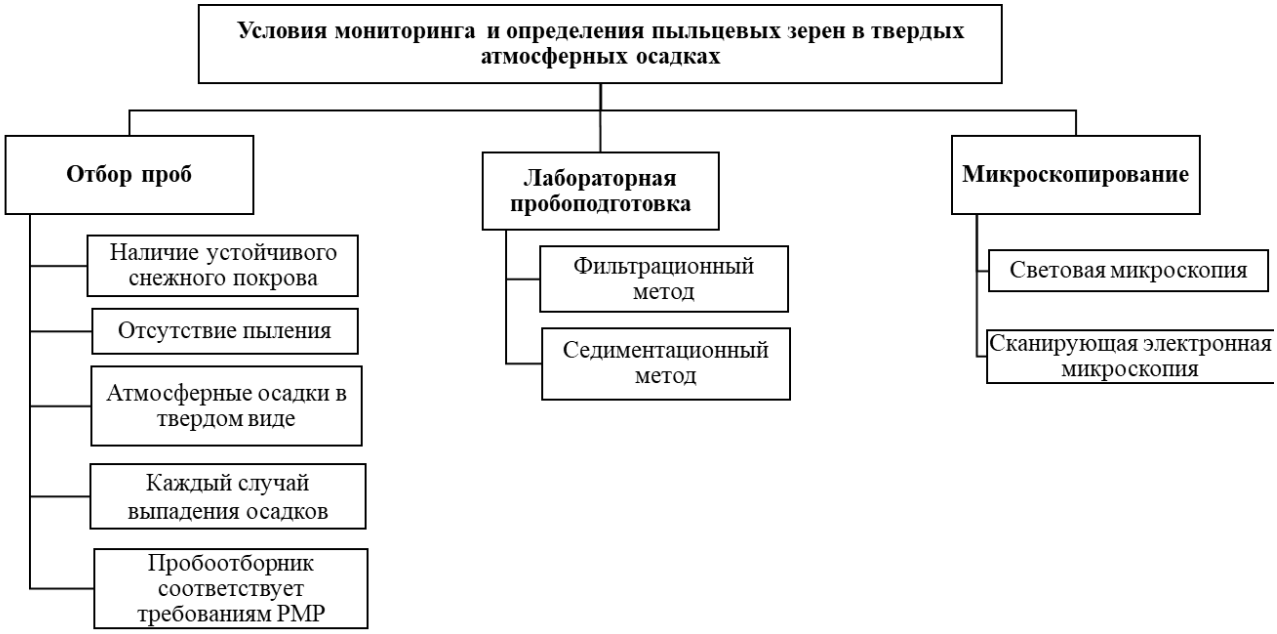

Рисунок 2.3 – Условия мониторинга и определения пыльцевых зерен в твердых атмосферных осадках

В рамках мониторинга отбор проб необходимо выполнять на территориях с устойчивым снежным покровом как в точке отбора, так и в радиусе 250–300 км, аккумуляция которого происходит в течение всего холодного периода, когда отсутствует вегетация, что полностью исключает поступление вторичной региональной пыльцевой компоненты. Отбор проб каждого случая выпадения твердых атмосферных осадков нужно реализовывать с использованием пробоотборников, вмещающих не менее максимального среднесуточного количества осадков, конструкции которых соответствуют требованиям РМР, что позволит выделить адвективную пыльцевую компоненту в атмосферных осадках. Предпочтительным является выполнение пробоподготовки седиментационным способом для исключения возможных потерь пыльцевых зерен из образцов. Идентификацию пыльцы стоит выполнять при помощи световой микроскопии, так как это более доступный вариант, позволяющий достоверно определять видовую

принадлежность, но для повышения точности стоит использовать сканирующий электронный микроскоп.

2.3. Реализация мониторинга

Мониторинг на юго-востоке Западной Сибири в течение семи холодных периодов проводили на четырех точках в период с устойчивым снежным покровом и отсутствием вегетации (пыления). Важным этапом было определение начала периода отбора проб, для этого оценивали не только текущие условия, но и был выполнен анализ натурных наблюдений и реанализов, показавшие, что снежный покров на всех точках мониторинга начинал формироваться преимущественно в третьей декаде октября (рисунок 2.4), при этом он периодически разрушался, что могло привести к вторичному загрязнению пробы пыльцевыми зернами. В этой связи датой начала отбора проб считали время, когда на территории исследования однозначно сформировался устойчивый снежный покров, а датой окончания – когда атмосферные осадки начинали выпадать в виде дождя, и шло интенсивное разрушение снежного покрова.

Мониторинг пыльцы в пробах атмосферных осадков был начат в 2014 г. на РТ, расположенной в городских условиях (г. Барнаул), что не противоречит правилам установки пробоотборников РМР и продолжался в течение пяти холодных периодов (таблица 2.1). В целях расширения сети мониторинга в 2019 г. с учетом разнообразия ландшафтных условий (в степной и лесостепной зонах) дополнительно были выбраны три опорные точки наблюдений, где в течение холодных периодов не происходило нарушение снежного покрова, при этом ОТ № 3 была выбрана по аналогии с природными условиями, характерными для РТ.

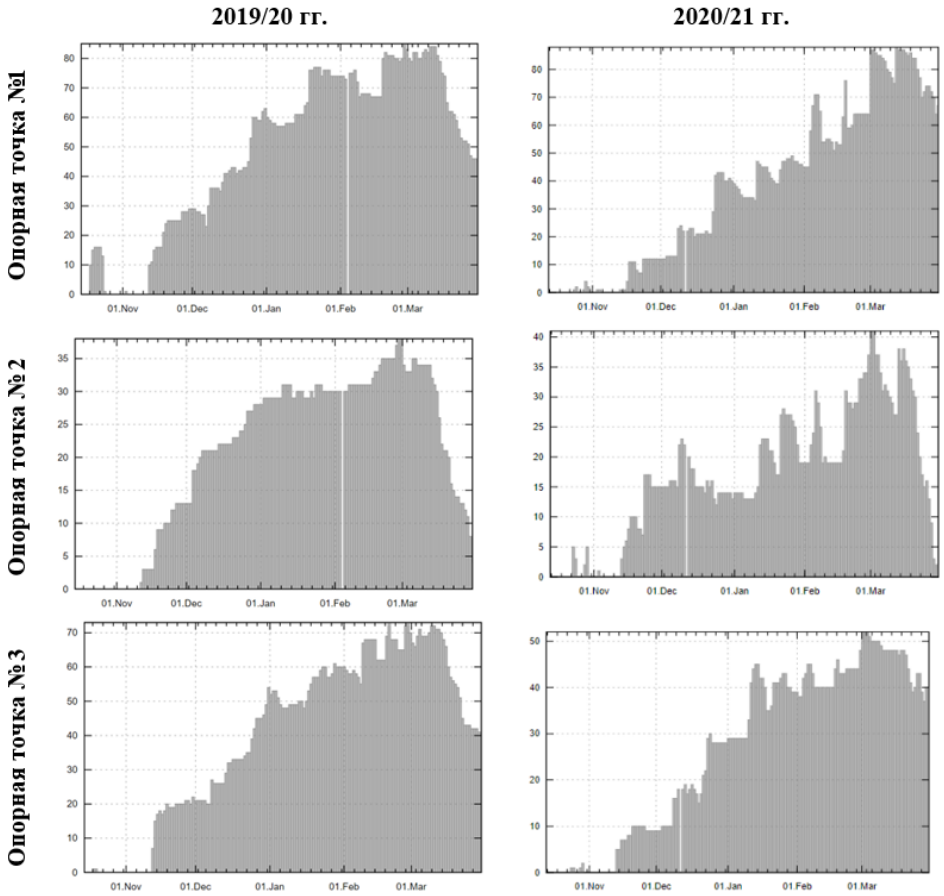

Рисунок 2.4 – Высота снежного покрова (см) на опорных точках за VI и VII холодные периоды (European centre…, 2021)

Таблица 2.1 – Количество проб атмосферных осадков, отобранных в ходе мониторинга

Период	Точка / Дата	РТ	ОП №1	ОП №2	ОП №3
I	10.11.14-20.03.15	28	-	-	-
II	27.11.15-04.03.16	54	-	-	-
III	14.10.16-15.03.17	83	-	-	-
IV	09.11.17-12.03.18	40	-	-	-
V	07.11.18-18.03.19	48	-	-	-
VI	08.11.19-13.03.20	-	31	39	48
VI	10.11.20-18.03.21	-	39	27	23
					Итого: 460

«-» пробы не отбирали

В результате мониторинга твердых атмосферных осадков на РТ за пять холодных периодов было отобрано 253 пробы (таблица 2.1) сотрудниками ХАЦ

ИВЭП СО РАН в рамках выполнения госбюджетных НИР ИВЭП СО РАН: № АААА-Б18-218022690054-9 и № АААА-А17-117041210242-1. На трех опорных точках отбор проб снега в течение двух холодных периодов выполняли при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90078, в результате чего было получено 207 образцов. В совокупности за весь период мониторинга (с 2014 по 2021 гг.) на четырех точках было отобрано 460 проб твердых атмосферных осадков, которые в дальнейшем были доставлены в лабораторию для первичной пробоподготовки и последующего микроскопического анализа на наличие пыльцевых зерен.

В лаборатории пробы таяли в герметичных контейнерах, а затем концентрировали двумя методами. Фильтрационный метод применяли для проб, отобранных на рекогносцировочной точке в течение пяти холодных периодов, а для проб опорных точек использовали преимущественно седиментационный метод. Микроскопирование образцов рекогносцировочной точки выполняли при помощи микроскопа Laboval 4 (Carl Zeiss, Германия). Пробы опорных точек были просмотрены под микроскопом Carl Zeiss Axio Lab A.1, оборудованным цветной цифровой камерой Axiocam 208 col, позволяющей выполнять фотофиксацию выделенных частиц, по необходимости использовали в консультации с профильными специалистами. При определении пыльцевых зерен использовали увеличение до 1000 раз, а для количественной характеристики – счетную камеру Нажотта (объем 0,2 мл).

Часть образцов просматривали при помощи сканирующего электронного микроскопа (SEM S-3400N Hitachi Science Systems Ltd, Япония, степень увеличения до 300 000, разрешающая способность до 3,0 мкм), что позволило более точно идентифицировать пыльцу. Для этого полученные препараты предварительно инсталлировали на алюминиевые держатели образцов и напыляли золото-палладиевой смесью в установке ионного напыления (SC7620 Mini Sputter Coater Quorum Technologies Ltd, Великобритания). Для идентификации видовой принадлежности использовали традиционные атласы (Куприянова, Алешина, 1972,

1978; Дзюба, 2005; Карпович и др., 2015 и др.), а также международные базы данных (Pollen atlas, 2021; Palynological Database, 2021).

Таким образом, для выделения адвективной пыльцевой составляющей в твердых атмосферных осадках мониторинг на юго-востоке Западной Сибири проводили в течение семи холодных периодов на четырех точках с соблюдением следующих условий: наличие устойчивого снежного покрова и отсутствие вегетации, отбор каждого случая выпадения твердых атмосферных осадков в пробоотборники, соответствующие требованиям РМР; комбинация как фильтрационного и седиментационного методов пробоподготовки, так и микроскопирования (световая и сканирующая). В итоге было отобрано и проанализировано на наличие пыльцевых зерен 460 проб твердых осадков.

ГЛАВА 3. ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ В ПЫЛЬЦЕВЫХ СПЕКТРАХ ТВЕРДЫХ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

3.1. Таксономическое разнообразие пыльцы в осадках

Микроскопический анализ проб, отобранных на четырех точках мониторинга в течение семи холодных периодов (с 2014 по 2021 гг.) показал, что только в трети от всех проанализированных образцов, т.е. в 143 из 460 проб, были идентифицированы пыльцевые зерна деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp., *Salix* sp., *Populus* sp., *Alnus* sp.) и трав (*Artemisia* sp., *Taraxacum* sp., *Plantago* sp., сем. Chenopodiaceae, Asteraceae, Poaceae, Fabaceae) (рисунок 3.1), при этом пыльцы экзотических таксонов не было выделено. Жизненные формы *Salix* sp. и *Alnu*s sp. могут отличаться в зависимости от условий местообитания (Карпова, 2015; Недосеко и Викторов, 2018), для удобства изложения информации нами были отнесены к деревьям. Определенные таксоны (*Betula* sp., *Pinus* sp., *Salix* sp., *Populus* sp., *Artemisia* sp., *Plantago* sp., сем. Chenopodiaceae, Poaceae) ввиду антигенного состава пыльцевых зерен являются аллергенами в период вегетации (Taylor et al., 2004), что указывает на потенциальную возможность пыльцевых зерен этих таксонов выступать в роли аллергенов и в холодный период, тем самым представлять риск для здоровья человека.

Определенное таксономическое разнообразие в пробах осадков юго-востока Западной Сибири сопоставимо с имеющимися результатами определения пыльцы в других объектах криосферы Алтая – снеге, фирне, льдах (Nakazawa et al., 2007, 2013, 2018; Papina et al., 2013, 2015). При этом общее количество выделенных таксонов было в четыре раза больше по сравнению с данными аналогичных исследований, проводимых в течение холодного периода в Центральной Якутии (2014/15 гг.), где было идентифицировано всего три таксона (*Betula* sp., *Pinus* sp., Asteraceae) (Курятникова и др., 2020).

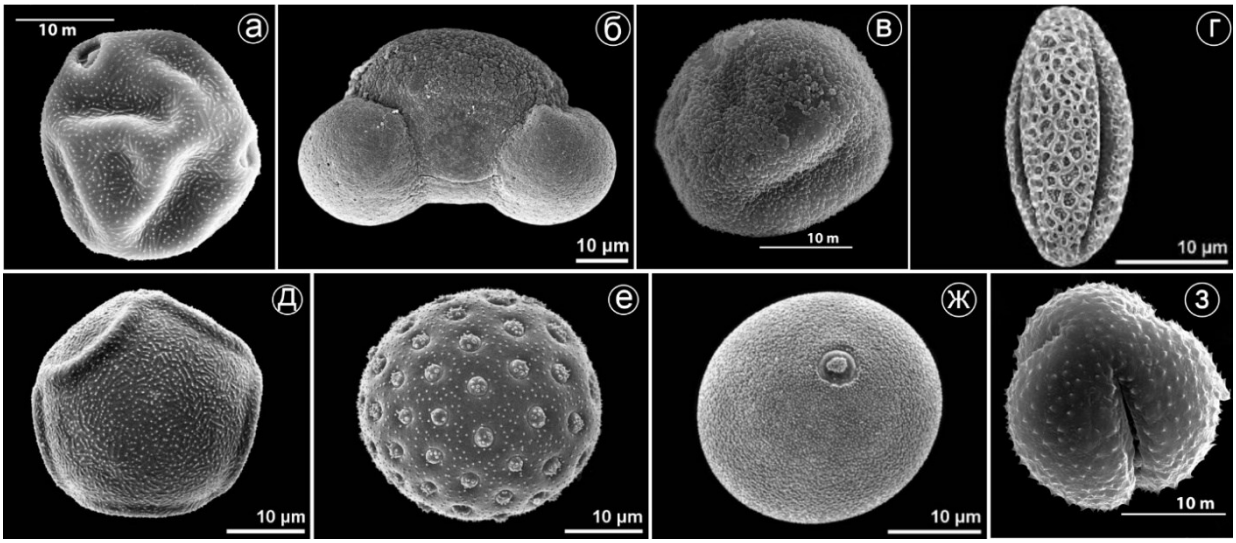

Рисунок 3.1 – Микрофотографии некоторых идентифицированных пыльцевых зерен: (а) *Betula* sp.; (б) *Pinus* sp.; (в) *Populus* sp.; (г) *Salix* sp.; (д) *Alnus* sp.; (е) Chenopodiaceae; (ж) Poaceae; (з) *Artemisia* sp. (SEM S-3400N Hitachi Science Systems Ltd)

Качественный состав спектров, выделенных в пробах каждой точки мониторинга, характеризовался изменениями, проявляющимися как в вариациях спектров между точками мониторинга, так и от периода к периоду. Однако были выделены общие черты, среди которых одной из важнейших являлось преобладание пыльцы деревьев с доминированием березы (*Betula* sp.) и сосны (*Pinus* sp.) (рисунок 3.2). Обилие пыльцы деревьев объясняется тем, что данные таксоны являются широко распространенными в Голарктическом царстве и относятся к ветроопыляемым, в результате чего они продуцируют большое количество пыльцевых зерен, способных переноситься на значительные расстояния (Сладков, 1967; Федорова, Вронский, 1980). В.П. Гричук и Е.Д. Заклинская (1948) относят пыльцу этих растений к региональной компоненте спорово-пыльцевых спектров, поэтому ее часть могла поступить в изучаемые пробы из удаленных источников. Пыльцевые зерна других деревьев (*Alnu*s sp., *Populus* sp., *Salix* sp.) были представлены единичными экземплярами, появление которых носило эпизодический характер, и они встречались только в некоторых сезонных спектрах.

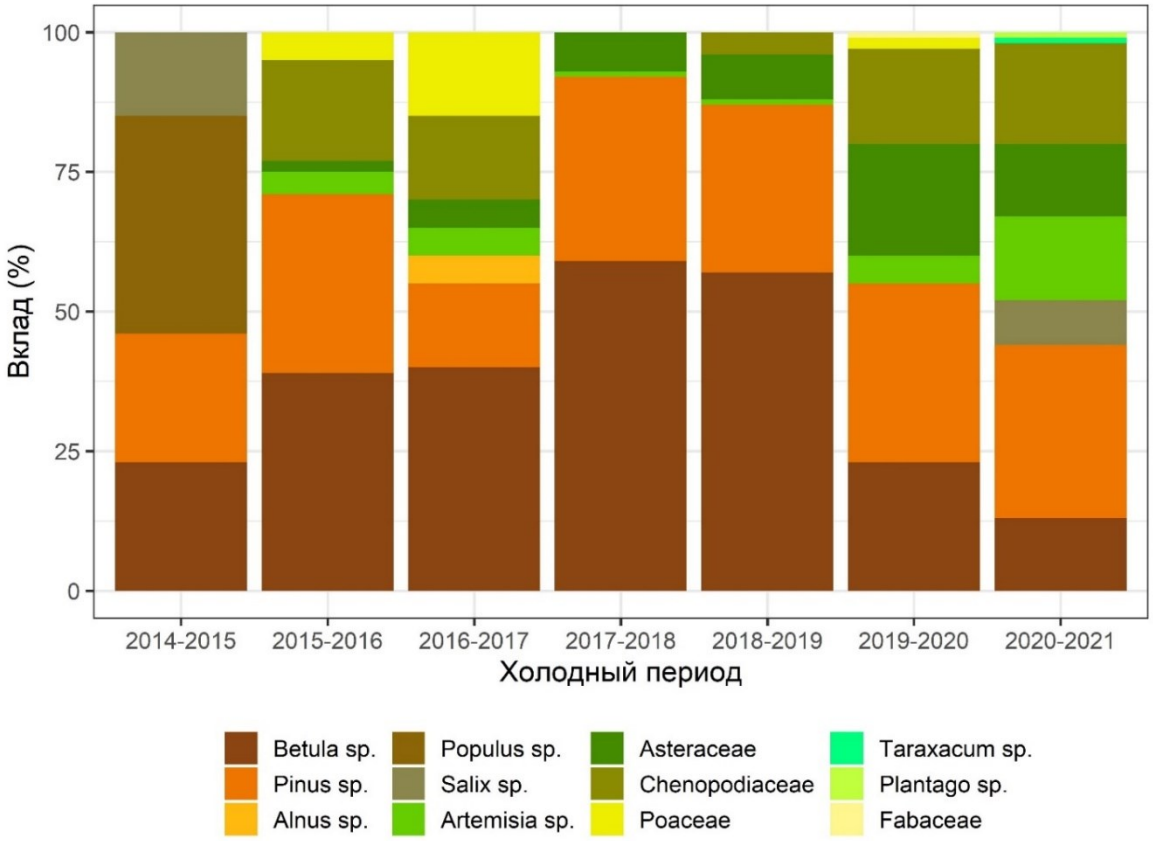

Рисунок 3.2 – Вклад (%) таксонов в сезонные пыльцевые спектры за весь период мониторинга на всех точках мониторинга

Пыльца трав была представлена более разнообразно по сравнению с деревьями, но ее вклад в формирование сезонных спектров был существенно меньше, что объясняется относительно небольшой ее летучестью (в пределах ареала) и морфологическими особенностями (отсутствие воздушных мешков, скульптурированная поверхность), не позволяющими ей длительное время находиться во взвешенном состоянии в атмосфере и переноситься на значительные расстояния (Заклинская, 1950). Среди пыльцевых зерен трав доминирующими являлись представители семейства маревых (Chenopodiaceae) и астровых (Asteraceae), которые широко распространены (Горбунов, 1980; Кирпичников, 1981). Пыльца злаков (Poaceae) выступает основной причиной аллергии во всем мире ввиду большого содержания антигенов (до 28) с высокой молекулярной массой (Garcia-Mozo, 2017), так же была выделена в пробах как рекогносцировочной точки, так и опорных, со значительной вариацией по периодам (см. рисунок 3.2). Пыльца других трав (*Taraxacum* sp., *Plantago* sp.,

сем. Fabaceae) была определена в единичных пробах, отобранных только на опорных точках, и ее появление было непостоянно.

3.2. Пыльцевые зерна в пробах твердых атмосферных осадков рекогносцировочной точки

Микроскопический анализ твердых атмосферных осадков, отобранных в течение пяти холодных периодов на рекогносцировочной точке, показал, что в 57 из 253 проб были идентифицированы пыльцевые зерна деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp., *Populus* sp., *Alnus* sp., *Salix* sp.) и трав (*Artemisia* sp., сем. Chenopodiaceae, Asteraceae, Poaceae). Все выделенные пыльцевые зерна являлись адвективными, т.к. могли быть занесены с воздушными массами, обусловившими выпадение осадков, в которых они были идентифицированы. Это подтверждают данные ранее проведенного аэропалинологического мониторинга, согласно которому пыльцевые зерна в воздухе РТ фиксируются только с апреля по сентябрь (Ненашева, 2013).

В общем пыльцевом спектре РТ за пять лет существенно превалировала пыльца деревьев – 78%, при доминировании березы (*Betula* sp.) – 43% и сосны (*Pinus* sp.) – 28% (рисунок 3.3 а), преобладающих не только в суммарном спектре, но и в спектре каждого периода отдельно (рисунок 3.3 б). Следует отметить, что пыльцевые зерна *Betula* sp. встречались в пробах, полученных в течение всех месяцев каждого периода, в то время как пыльца других деревьев – *Populus* sp., *Salix* sp., *Alnus* sp. была определена только в пробах марта. Пыльцевые зерна тополя (*Populus* sp.) – 4% и ивы (*Salix sp.)* – 2% были выделены в единичных пробах холодного периода 2014/15 гг., а пыльца ольхи (*Alnus* sp.) была единично выделена в другой холодный период. Данные таксоны являются раннецветущими и могли уже пылить на территориях, расположенных западнее и юго-западнее территории исследования, т.е. их пыльца могла быть занесена как в результате вторичного подъема, так и первичного продуцирования.

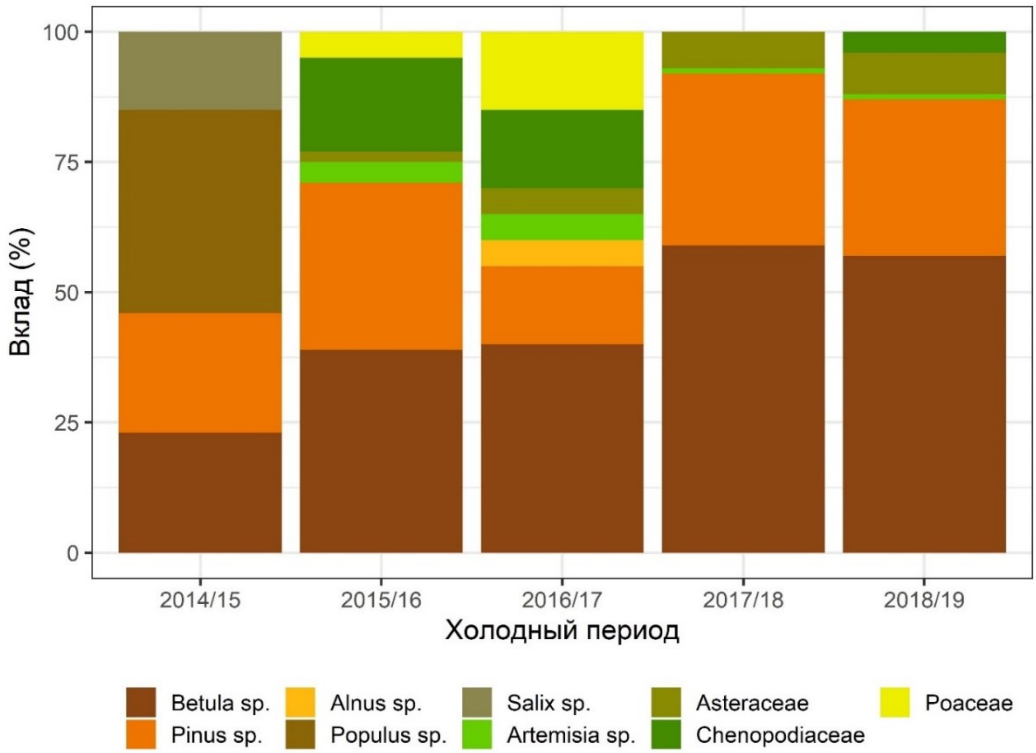

Рисунок 3.3 – Вклад (%) выделенных таксонов в сезонные пыльцевые спектры рекогносцировочной точки за пять холодных периодов

В общем спектре пыльца трав составила 22% и была определена только в пробах, отобранных в течение четырех холодных периодов (за исключением 2014/15 гг.). Среди трав преобладали пыльцевые зерна представителей семейства маревых (Chenopodiaceae) – 11% (см. рисунок 3.3 а), определенные в пробах, отобранных в течение холодных периодов. Пыльца семейства астровых (Asteraceae) была выделена в пробах четырех сезонов, кроме первого, и составляла всего 4% от общего спектра (см. рисунок 3.3), злаки (Poaceae) были определены в пробах только трех холодных периодов (2015/16 гг., 2016/17 гг. и 2017/18 гг.). Идентифицированные таксоны в большинстве случаев относят к насекомоопыляемым, с тяжелой скульптурированной пыльцой, это не позволяет ей переноситься на значительные расстояния.

Первый холодный период (2014/15 гг.) существенно выделялся среди остальных, т.к. было отобрано всего 28 проб, и лишь в трех пробах марта 2015 г. (рисунок 3.4 а) были выделены пыльцевые зерна деревьев – *Betula* sp., *Pinus* sp., *Salix* sp., *Populus* sp. (рисунок 3.4 б).

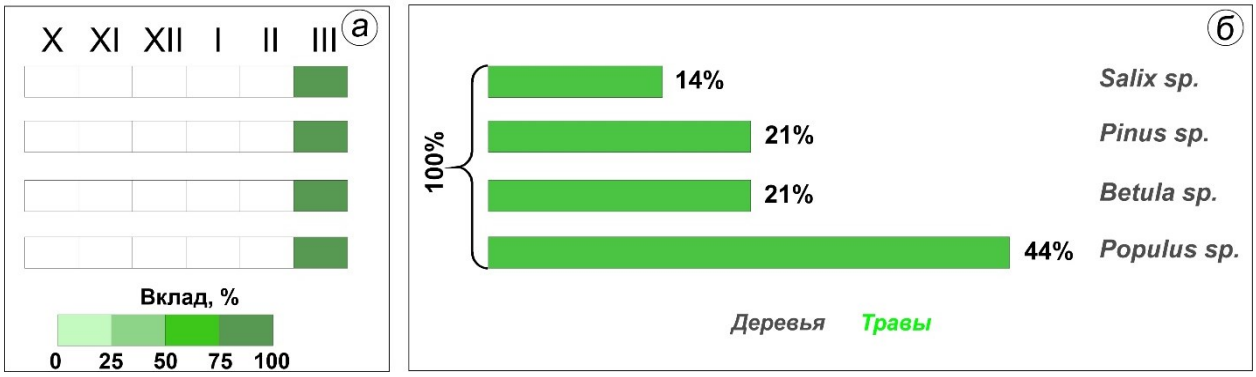

Рисунок 3.4 – Таксономическое разнообразие сезонного пыльцевого спектра холодного периода 2014/15 гг.

а) распределение таксонов по месяцам; б) вклад (%) таксонов в спектр

Максимальная доля в выделенном спектре приходилась на пыльцу *Populus* sp. – 44%, в два раза меньший вклад внесли пыльцевые зерна *Betula* sp. и *Pinus* sp. – по 21% соответственно (рисунок 3.4 б), а минимальный вклад в спектр – ива (*Salix* sp.) 14%, которая больше не встречалась в пробах рекогносцировочной точки (таблица 3.1), но была идентифицирована в образцах опорной точки № 2.

Таблица 3.1 – Вклад (%) пыльцы в пробах твердых атмосферных осадков рекогносцировочной точки за пять холодных периодов

Период / Таксон	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**
Деревья					
Alnus sp.	0	0	5	0	0
Betula sp.	23	39	40	59	57
Pinus sp.	23	32	15	33	30
Populus sp.	39	0	0	0	0
Salix sp.	15	0	0	0	0
Всего пыльцы деревьев	**100**	**71**	**60**	**92**	**87**
Травы					
Artemisia sp.	0	4	5	1	1
Asteraceae	0	2	5	7	8
Chenopodiaceae	0	18	15	0	4
Poaceae	0	5	15	0	
Всего пыльцы трав	**0**	**29**	**40**	**8**	**13**
Итого	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**

В течение II холодного периода (2015/16 гг.) было отобрано 54 пробы твердых атмосферных осадков общим объемом 106 мм, но, несмотря на это, сезонный пыльцевой спектр этого периода значительно отличался от спектров других периодов. Так почти в 20% всех проанализированных проб была идентифицирована пыльца деревьев, представленная березой и сосной, вклад которой составил 71% от сезонного спектра (рисунок 3.5.).

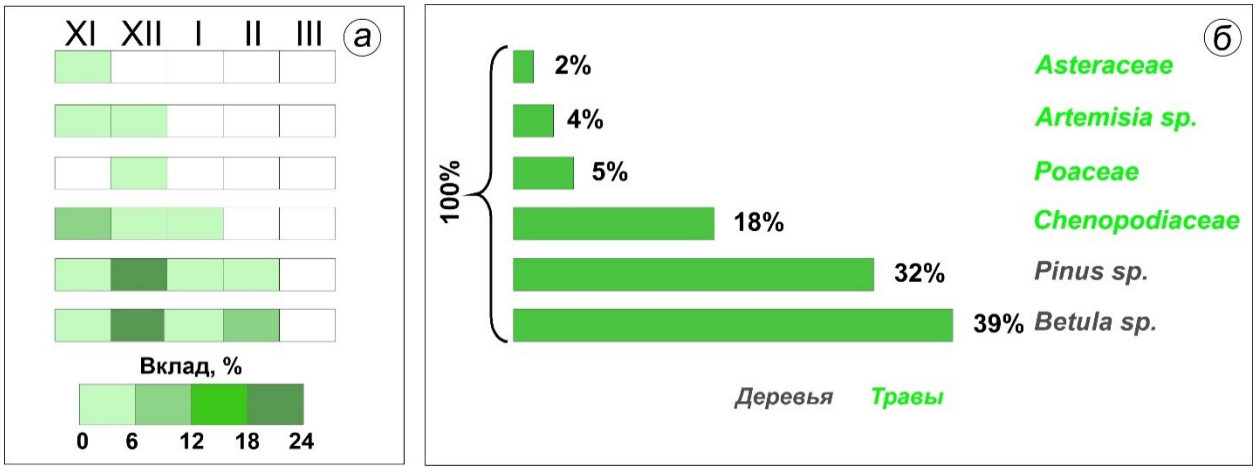

Рисунок 3.5 – Таксономическое разнообразие сезонного пыльцевого спектра холодного периода 2015/16 гг. рекогносцировочной точки

а) распределение таксона по месяцам; б) вклад таксона в спектр

Травы были представлены более разнообразно *(Artemisia* sp., сем. Chenopodiaceae, Asteraceae и Poaceae) по сравнению с деревьями и составляли 29%. В общем в спектре существенно превалировала пыльца березы (*Betula* sp.) – 39% и сосны *(Pinus* sp.) – 32% (рисунок 3.5 б), определенная в пробах, отобранных с ноября по февраль, при этом четверть всех пыльцевых зерен была идентифицирована в декабре. Из трав преобладала пыльца маревых (Chenopodiaceae) – 18%, а максимальное их количество было определено в осадках ноября – 11% (рисунок 3.5 а). Полынь (*Artemisia* sp.) внесла всего 4% в сезонный спектр (пробы ноября и декабря). Пыльца астровых (Asteraceae) – 2% и злаковых (Poaceae) – 5% была представлена единичными зернами, идентифицированными в пробах, отобранных в конце ноября и середине декабря.

За третий холодный период (2016/17 гг.) было отобрано 83 пробы, что является максимальным количеством за весь период мониторинга на РТ. Однако

лишь в 15 из них были выделены пыльцевые зерна деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp., *Alnus* sp.) и трав (*Artemisia* sp., сем. Chenopodiaceae, Asteraceae и Poaceae) (рисунок 3.6), а такое большое таксономическое разнообразие выделяет этот спектр среди других.

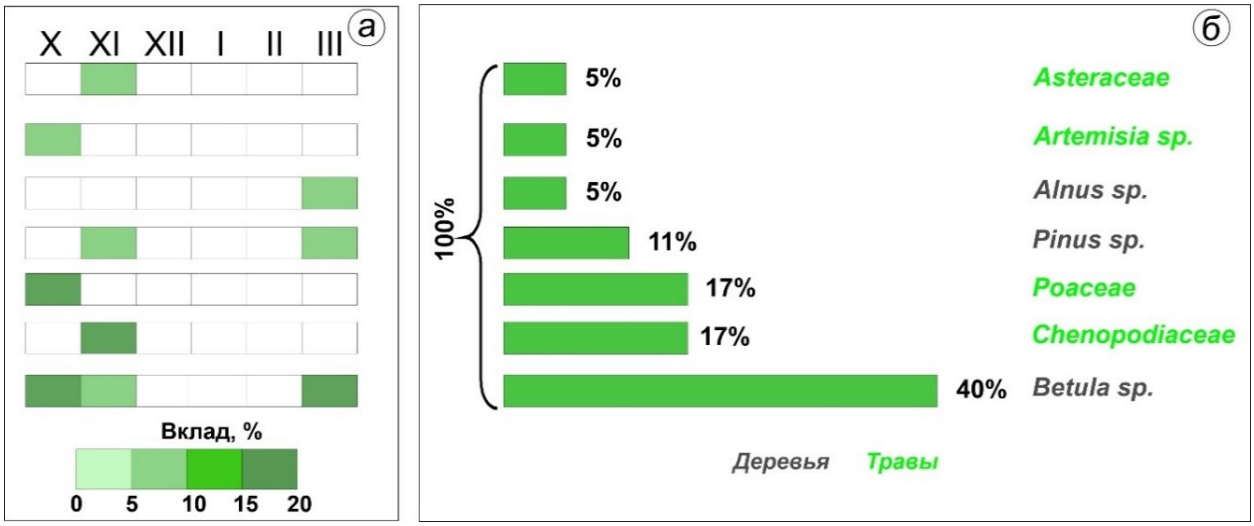

Рисунок 3.6 – Таксономическое разнообразие сезонного пыльцевого спектра холодного периода 2016/17 гг. рекогносцировочной точки

а) распределение таксона по месяцам; б) вклад таксона в спектр

Максимальный вклад в формирование сезонного пыльцевого спектра внесла береза (*Betula* sp.), составив 40%, а пыльцы сосны (11%) было почти в 3 раза меньше, чем в спектре второго (32%), четвертого (33%) и пятого (30%) периодов, и в 2 раза меньше, чем в спектре первого (23%) периода. В одной пробе, отобранной в марте, были выделены пыльцевые зерна ольхи (*Alnus* sp.), которые больше не встречались. Большинство всей идентифицированной пыльцы было определено в пробах, отобранных в начале и конце холодного периода (рисунок 3.6 а), это предположительно связано с тем, что территории, над которыми формировались воздушные массы, обусловившие выпадение осадков, были открыты от снежного покрова и могли выступать источниками вторичного подъема пыльцевых зерен.

Пыльцевые зерна в пробах IV холодного периода (2017/18 гг.) были определены в 11 из 40 отобранных проб, причем спектр данного периода отличало самое бедное таксономическое разнообразие, представленное пыльцой деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp.) и трав (*Artemisia* sp., сем. Asteraceae) (рисунок 3.7).

Рисунок 3.7 – Таксономическое разнообразие сезонного пыльцевого спектра холодного периода 2017/18 гг. рекогносцировочной точки

а) распределение таксона по месяцам; б) вклад таксона в спектр

Пыльца деревьев составила 93% сезонного спектра и существенно преобладала береза – 60%, что является максимумом среди сезонных спектров рекогносцировочной точки мониторинга. Пыльца сосны дала треть от спектра – 33% и это сопоставимо с данными для других периодов, а пыльцевые зерна трав были представлены бедно (*Artemisia* sp., Asteraceae) и выделены лишь в единичных пробах начала периода.

Пыльцевой спектр V холодного периода 2018/19 гг. схож со спектром предыдущего при более существенном доминировании пыльцы деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp.), составляющих 88% (рисунок 3.8 б).

Рисунок 3.8 – Таксономическое разнообразие сезонного пыльцевого спектра холодного периода 2018/19 гг. рекогносцировочной точки

а) распределение таксона по месяцам; б) вклад таксона в спектр

Пыльцевые зерна березы определили 58% спектра и были выделены в начале и середине периода (рисунок 3.8 а). Сосна внесла примерно такой же вклад, как и в других сезонных спектрах (30%), и была идентифицирована в пробах, полученных на протяжении всего периода. Травы определяли 12% от спектра и были представлены полынью (*Artemisia* sp.), выделенной в единичной пробе декабря и внесшей минимальный вклад, а также маревыми (Chenopodiaceae) и астровыми (Asteraceae), вклад которых составил 7 и 4% соответственно, причем эти зерна были идентифицированы в начале и конце периода.

Таким образом, в 57 из 253 проб твердых атмосферных осадков, отобранных в течение пяти холодных периодов на рекогносцировочной точке, были выделены пыльцевые зерна деревьев, давшие суммарный вклад в общий пыльцевой спектр – 78%, а пыльца трав – 22%. Наибольший вклад внесли пыльцевые зерна березы (43%) и сосны (28%), а таксономическое разнообразие деревьев было представлено 5 таксонами. Практически половина выделенной пыльцы трав относилось к представителям семейства маревых (Chenopodiaceae), которые характерны для пустынно-степных сообществ, это позволяет предположить, что данные зерна заносились с территорий, на которых произрастает данная растительность.

Временное распределение пыльцевых зерен на РТ по периодам показало, что пыльца была определена в пробах каждого периода в течение всего времени мониторинга, однако ее максимальное разнообразие приходилось на образцы, отобранные в начале и конце периодов. Такое появление пыльцы в течение холодных периодов возможно связано с тем, что в это время большая часть территорий, расположенных западнее и юго-западнее была еще открыта от снега и могла выступать источником вторичного подъема и поступления пыльцы.

Присутствие пыльцевых зерен в течение всего времени мониторинга предположительно обусловлено как циркуляционными условиями, так и особенностями морфологического строения пыльцевых зерен и ареалов распространения выделенных таксонов. Пыльца сосны переносится на расстояния до нескольких тысяч километров и встречается далеко от своего ареала, например, в Арктике (Polunin, 1951), Гренландии, на поверхности ледника Франка-Иосифа

(Кренке, Федорова, 1961), а березы часто (хотя и в меньших количествах, чем сосна) встречается в поверхностных пробах, отобранных далеко за пределами ее ареала, и эта пыльца отмечается почти во всех анализируемых образцах почв независимо от района исследования.

С целью вычленения адвективной пыльцевой составляющей, поступающей с атмосферными осадками в теплый период 2014 г., когда уже отмечалось пыление местной растительности, был проведен отбор проб осадков при помощи пробоотборника Таубера и пыльцы, циркулирующей непосредственно в воздухе (ловушка Буркарда). Анализ спектров показал, что выделенное таксономическое разнообразие при сухом и мокром осаждении более чем в 80% случаев совпадало. В этой связи вычленить адвективную составляющую для теплого периода, когда фиксирует массовое пыление местной растительности, очень сложно и реализуемо только в период отсутствия вегетации на территории исследования (Ryabchinskaya et al., 2015).

3.3. Пыльцевые зерна в пробах твердых атмосферных осадков опорных точек

Микроскопический анализ 207 проб твердых атмосферных осадков, отобранных на опорных точках за два холодных периода 2019/20 и 2020/21 гг., показал, что в 86 пробах были идентифицированы пыльцевые зерна деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp., *Salix* sp.) и трав (*Artemisia* sp., *Taraxacum* sp., *Plantago* sp., сем. Asteraceae, Chenopodiaceae, Fabaceae, Poaceae), а их концентрации в некоторых пробах превышали 600 шт./литр. Выделенное таксономическое разнообразие в спектрах ОТ было богаче по сравнению с разнообразием РТ, что связано с присутствием большего числа трав за счет присутствия *Taraxacum s*p., *Plantago* sp., сем. Fabaceae.

Распределение пыльцевых зерен в спектрах имело как общие черты, так и изменялось по временному (периоды отбора) и пространственному признакам

(между опорными точками) (таблица 3.2). В целом за два сезона количество определенной пыльцы деревьев было значительно больше, однако спектры двух холодных периодов опорной точки № 1 разнились между собой. Так в спектре VI периода существенно преобладала пыльцы деревьев – 67%, а в спектре следующего периода ситуация сменилась на противоположную – 63% составила пыльца трав, а 37% – деревьев, в спектрах двух других опорных точек различия между периодами не превышали 10 %.

Таблица 3.2 – Вклад (%) пыльцы в спектры проб твердых атмосферных осадков на опорных точках за два холодных периода

Точка / Таксон	ОТ № 1		ОТ № 2		ОТ № 3	
Период	VI	VII	VI	VII	VI	VII
	Деревья					
Betula sp.	40	4	10	16	21	16
Pinus sp.	27	33	39	21	34	42
Salix sp.	0	0	0	20	0	0
Сумма пыльцы деревьев	**67**	**37**	**49**	**57**	**55**	**58**
	Травы					
Artemisia sp.	3	29	5	8	3	13
Taraxacum sp.	0	0	0	3	0	0
Plantago sp.	0	4	0	0	0	0
Asteraceae	19	12	15	18	26	6
Chenopodiaceae	8	17	26	15	16	23
Fabaceae	3	0	0		0	
Poaceae	0	0	5		0	
Сумма пыльцы трав	**33**	**63**	**51**	**43**	**45**	**42**
ИТОГО	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**

В пробах твердых атмосферных осадков, отобранных на ОТ № 1 за VI и VII холодные периоды, были выделены пыльцевые зерна деревьев (*Betul*a sp., *Pinus* sp.) и трав *(Artemisia* sp., *Plantago* sp., сем. Asteraceae, Chenopodiaceae, Fabaceae) (рисунок 3.9 а).

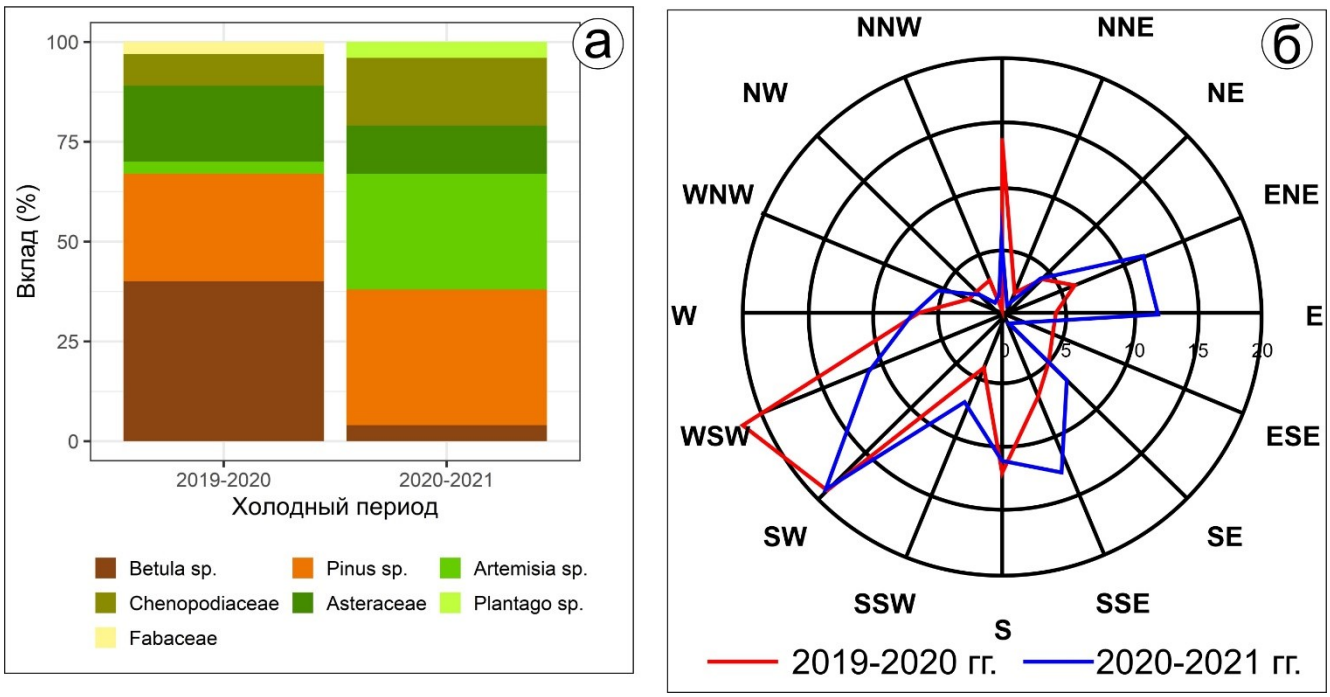

Рисунок 3.9 – Вклад (%) выделенных таксонов в сезонные пыльцевые спектры (а) и роза ветров (б) за весь период мониторинга на опорной точке № 1

Вклад каждого таксона значительно варьировал (рисунок 3.9 а), пыльца березы (*Betula* sp.) в VI периоде определила 39% сезонного спектра, а в пробах следующего периода эти пыльцевые зерна были выделены лишь в марте и их количество было почти в 10 раз меньше (4%). Пыльцевые зерна полыни (*Artemisia* sp.) в спектре VII периода существенно преобладали по сравнению VI периодом (изменения с 3% до 29%), а пыльца подорожника (*Plantago* sp.) была выделена единично в ноябре 2020 г., как и пыльцевые зерна бобовых (Fabaceae) в образцах января VII холодного периода. Такие вариации связаны с особенностями синоптических условий, а именно с изменениями превалирующего поступления юго-западных воздушных масс в течение холодных периодов, что наглядно отражает роза ветров (рисунок 3.9 б).

На опорной точке № 2, расположенной в степной зоне, за шестой и седьмой холодные периоды было отобрано 66 проб твердых атмосферных осадков, в 30 из которых выделена пыльца деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp., *Salix* sp.) и трав (*Artemisia* sp., *Taraxacum* sp., Asteraceae, Chenopodiaceae, Poaceae) (рисунок 3.10 а).

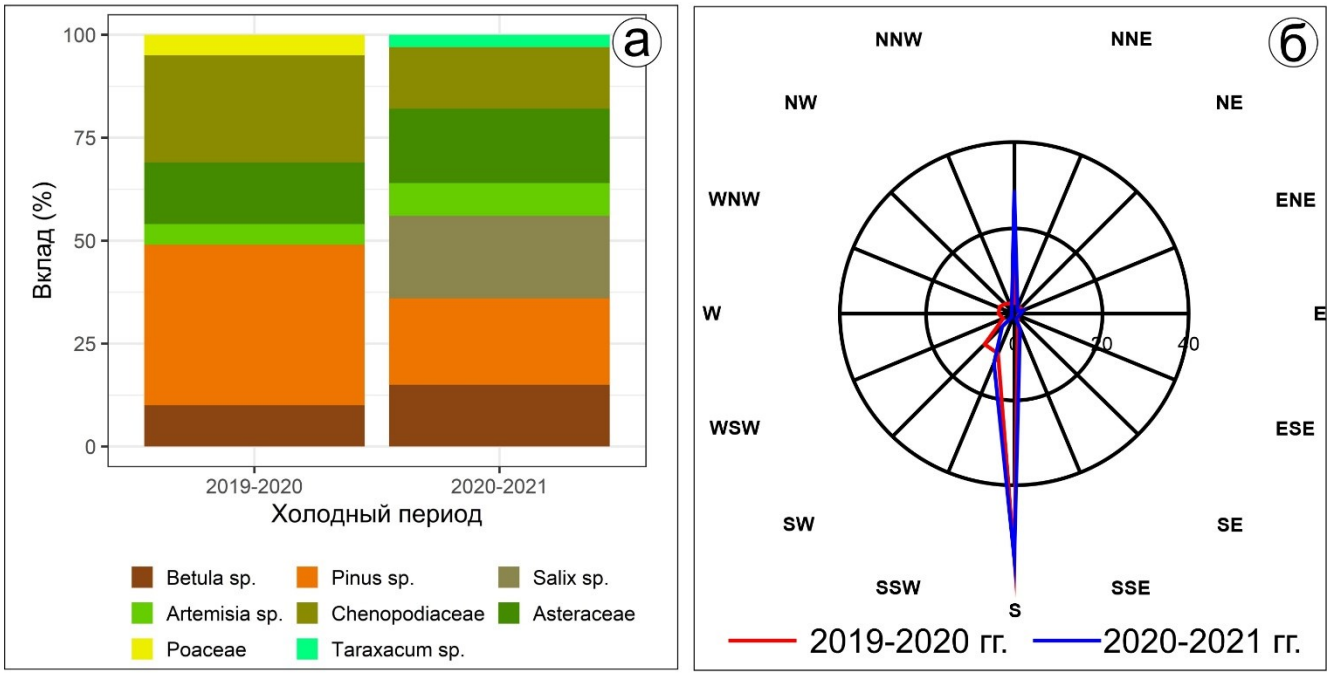

Рисунок 3.10 – Вклад (%) выделенных таксонов в сезонные пыльцевые спектры (а) и роза ветров (б) за весь период мониторинга на опорной точке № 2

Среди пыльцы трав были определены злаки (Poaceae) (2019/20 гг.) и одуванчик (*Taraxacum* sp.) (2020/21 гг.), вклад которых составил 5 и 3% соответственно, однако пыльцевые зерна данных растений не были выделены в пробах двух других ОТ и в спектре РТ. Большая часть среди пыльцы трав принадлежала полыни, астровым и маревым. Стоит отметить, что в даты, когда в пробах ОТ № 2 была выделена пыльца ивы, одуванчика и злаков, на других опорных точках осадки не выпадали, что связано с особенностью синоптической ситуации в период их поступления, но в целом на данной ОТ в течение двух холодных периодов преобладали ветры южных направлений (рисунок 3.10 б). Важно отметить, что максимальное таксономическое разнообразие пыльцевых зерен было определено в пробах, отобранных в начале и конце холодных периодов.

Пыльцевой спектр ОТ № 3, расположенной в аналогичных с РТ условиях, был сформирован всего пятью представителями (*Betula* sp., *Pinus* sp., *Artemisia* sp., сем. Asteraceae, Chenopodiaceae), определенными в пробах всех опорных точек за два последних холодных периода мониторинга. Суммарный вклад пыльцы деревьев, представленных березой (*Betula* sp.) и сосной (*Pinus* sp.), составил примерно равное значение (55% и 58%) в спектре каждого из периодов, но при этом

существенно преобладала сосна (рисунок 3.11). В спектре холодного периода 2019/20 гг. количество пыльцы сосны составило 34%, а в следующем периоде оно уже увеличилось достигло 42% (рисунок 3.11 а). Пыльцы березы в спектре VII периода было на 5% меньше, чем в спектре VI периода, где ее вклад был равен 21%.

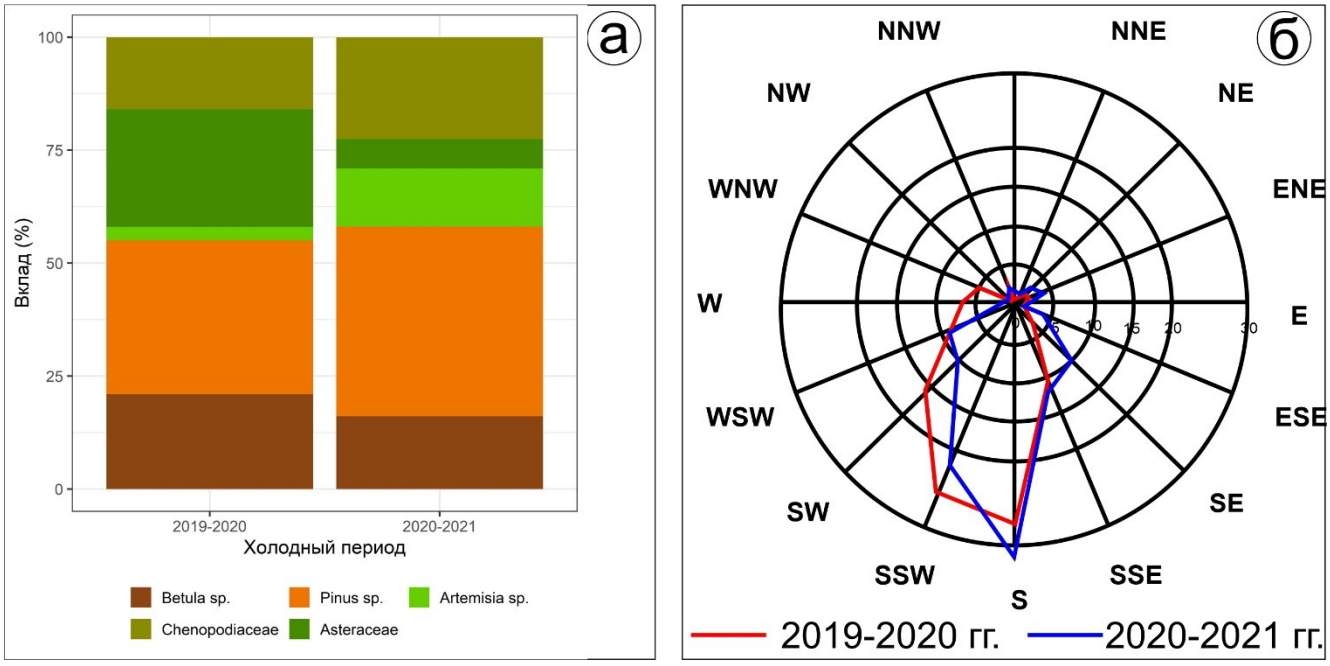

Рисунок 3.11 – Вклад (%) выделенных таксонов в сезонные пыльцевые спектры (а) и роза ветров (б) за весь период мониторинга на опорной точке № 3

Пыльца трав была представлена всего лишь тремя таксонами: *Artemisia* sp., сем. Asteraceae, Chenopodiaceae, а значительные вариации (до 10%) наблюдались при оценке вклада полыни в каждый сезонный спектр. Увеличение вклада маревых от сезона к сезону составило 7%, а вот вклад астровых снизился в 4 раза (с 26% до 6%), что, скорее всего, связано с межгодовыми изменениями в поступлении воздушных масс (рисунок 3.11 б).

В целях анализа причин, определяющих изменения в пыльцевых спектрах двух сезонов мониторинга на трех опорных точках в XLSTAT был реализован Principal Component Analysis (PCA). Для этого были использованы данные только семи таксонов, которые неоднократно встречались в спектрах опорных точек и были определены в спектрах РТ. Анализ изменений в пыльцевых спектрах с использованием метода главных компонент показал, что таксоны группируются по четырем основным компонентам: PC 1 – появление пыльцы ивы (*Salix* sp.) и

полыни (*Artemisia* sp) связанно с заносом каждого таксона из специфического (своего) региона; PC 2 – вариации пыльцы представителей семейства астровых (Asteraceae) в спектрах объясняется большим количеством источников ее продуцирования (самое большое семейство); PC 3 – распределение пыльцевых зерен сосны в спектрах связано с их морфологическими особенностями (наличие воздушных мешков), обусловливающих возможный дальний перенос; PC 4 – значительное присутствие пыльцы березы связано с широким ареалом распространения и значительном количеством продуцируемой пыльцы.

Таблица 3.3 – Метод главных компонент (Факторные нагрузки)

Количество пыльцевых зерен	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
Betula sp.	0,4721	0,4470	0,2022	0,5470
Pinus sp.	-0,2456	0,0008	0,8428	0,2831
Salix sp.	0,7883	-0,3074	-0,0925	0,1259
Asteraceae	-0,1044	0,7302	-0,2710	0,3641
Artemisia sp.	0,7933	-0,2829	0,1760	0,0365
Chenopodiaceae	-0,4385	-0,4290	-0,1781	-0,1697
Poaceae	-0,2831	-0,4089	-0,4569	-0,1369

Пыльцевые зерна ввиду хорошей сохранности и сезонного характера распространения используют в качестве геоиндикаторов изменений состояний природных систем, в частности, криолитозоны (Nakazawa et al., 2007, 2013, 2018; Papina et al., 2013, 2015; Васильчук, 2018). Подземные льды, ледники, снежный покров, снег и др. (Котляков, Кренке, 1979), входящие в криолитозону, формируются преимущественно за счет поступления атмосферных осадков в холодный период, в связи с чем пыльца в них может заноситься вследствие их переноса с адвективными воздушными массами и/или региональным, глобальным поступлением. Пыльцу полыни (*Artemisia* sp.), сосны (*Pinus* sp.) и семейства березовых (Betulaceae) уже использовали в качестве маркеров при выделении сезонных слоев ледников массива Белухи. Было показано, что слои, в которых присутствовала пыльца полыни (*Artemisia* sp.) были сформированы осенью, пыльцы сосны (*Pinus* sp.) – летом, пыльцы семейства березовых (Betulaceae) –

весной. Для выделения слоев подсчитывали 1000 пыльцевых зерен, а затем рассчитывали процентный вклад того или иного таксона (Nakazawa et al., 2007). Однако полученные в ходе мониторинга количественные данные пыльцевых зерен в пробах твердых атмосферных осадков (снега), отобранных на юго-востоке Западной Сибири, показали, что ее число даже в одном случае выпадения осадков может достигать 640 шт./л и иметь значительное таксономическое разнообразие. Эти результаты ставят под сомнение ранее выполненные палеореконструкции условий окружающей среды по данным спорово-пыльцевого анализа в регионе и указывают на необходимость проведения их верификаций.

Результаты микроскопического анализа сезонного снежного покрова, который является интегральным показателем атмосферных осадков за холодный период, так же подтверждают данную необходимость. Так в пробах снежной толщи ОТ № 2, отобранных в марте 2021 г., были идентифицированы пыльцевые зерна деревьев (*Betula* sp., *Pinus* sp.) и трав (*Artemisia* sp., Asteraceae, Chenopodiaceae). Определенное таксономическое разнообразие в значительной мере совпадало со спектрами твердых атмосферных осадков холодного периода 2020/21 гг. этой ОТ, причем максимальное разнообразие приходилось на слои, сформированные в начале и конце холодного периода (Kuryatnikova et al., 2021).

Таким образом, результаты впервые проведенного микроскопического анализа 460 проб твердых атмосферных осадков, отобранных в период с устойчивым снежным покровом, исключающим поступление локальной пыльцевой составляющей, на юго-востоке Западной Сибири показали, что в 143 пробах присутствовали пыльцевые зерна 12 таксонов, при этом в остальных (317 шт.) пыльца не была обнаружена. Анализ пыльцевых спектров, выделенных для каждой точки мониторинга, не показал значительных изменений для результатов степной и лесостепной зон, что, скорее всего, обусловлено не большим удалением друг от друга точек мониторинга, а именно их расположением в границах одного естественно-синоптического района, где развивались преимущественно единые синоптические процессы. Это подтверждает преобладание пыльцы деревьев как в суммарном спектре при значительном

доминировании березы (*Betula* sp.) и сосны (*Pinus* sp.), так и в большинстве сезонных спектров точек мониторинга. Основная часть пыльцевых зерен была определенна в пробах, отобранных в начале и конце холодных периодов, когда воздушные массы, обуславливающие выпадение атмосферных осадков, а с ними и пыльцы, могли приходить либо с территорий еще свободных от снежного покрова, либо уже освободившихся от него. Полученные в ходе мониторинга результаты показали необходимость проведения верификаций ранее выполненных по данным спорово-пыльцевых спектров палеореконструкций условий окружающей среды как для территории исследования, так и сопредельных регионов.

ГЛАВА 4. АДВЕКТИВНЫЕ ПЫЛЬЦЕВЫЕ ЗЕРНА, КАК ТРАССЕРЫ АТМОСФЕРНЫХ МЕЖГЕОСИСТЕМНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

4.1. Синоптический анализ атмосферного поступления пыльцы с осадками

В ходе мониторинга твердых атмосферных осадков, отобранных в течение первого холодного периода (2014/15 гг.) на юго-востоке Западной Сибири впервые на РТ, были идентифицированы пыльцевые зерна. Важно отметить, что в ранее опубликованных как отечественных, так и зарубежных исследованиях не приводились сведения о присутствии пыльцы в твердых атмосферных осадках, отобранных в течение холодных периодов.

Для определения атмосферного поступления пыльцевых зерен, выпадавших с атмосферными осадками, был выполнен детальный анализ синоптических обстановок на даты их осаждения и предшествующий им период, в первую очередь, на основе данных карт барической топографии (Арктический и антарктический…, 2015) для разных изобарических высот. Пошаговое выполнение анализа представлено на примере марта 2015 г., когда в пробах твердых осадков были выделены пыльцевые зерна ивы (*Salix* sp.). Перенос воздушных масс, обусловивших выпадение этих осадков, а с ними и пыльцы ивы (*Salix* sp.) 13 марта 2015 г. на юго-востоке Западной Сибири, был связан с усилением Арктической депрессии. Накануне на севере Евразии в средней тропосфере располагалась многоцентровая депрессия, один из основных центров которой находился у южной оконечности Гренландии, а второй – над полуостровом Таймыр. По южной периферии барических образований происходило смещение высотных ложбин, обеспечивающих движение воздушных масс, формирующихся над Атлантикой, на север европейской территории России и далее на Сибирь. При этом ось высотной фронтальной зоны, находясь над Фенноскандией, изменяла юго-западное направление на западное, способствуя развитию адвекции, а затем уже на северо-западное над Западной Сибирью (рисунок 4.1 а). В средней тропосфере на севере

Атлантики и над полуостровом Таймыр наблюдались циклоны, причем в их систему входил небольшой по площади циклон с центром над Землей Франца-Иосифа. Европейская часть России, Фенноскандия и север Европы были под влиянием антициклона, при этом второй значимый антициклон, входивший в систему Сибирского антициклона, распространялся над Алтае-Саянским регионом (рисунок 4.1 в) (Malygina et al., 2018).

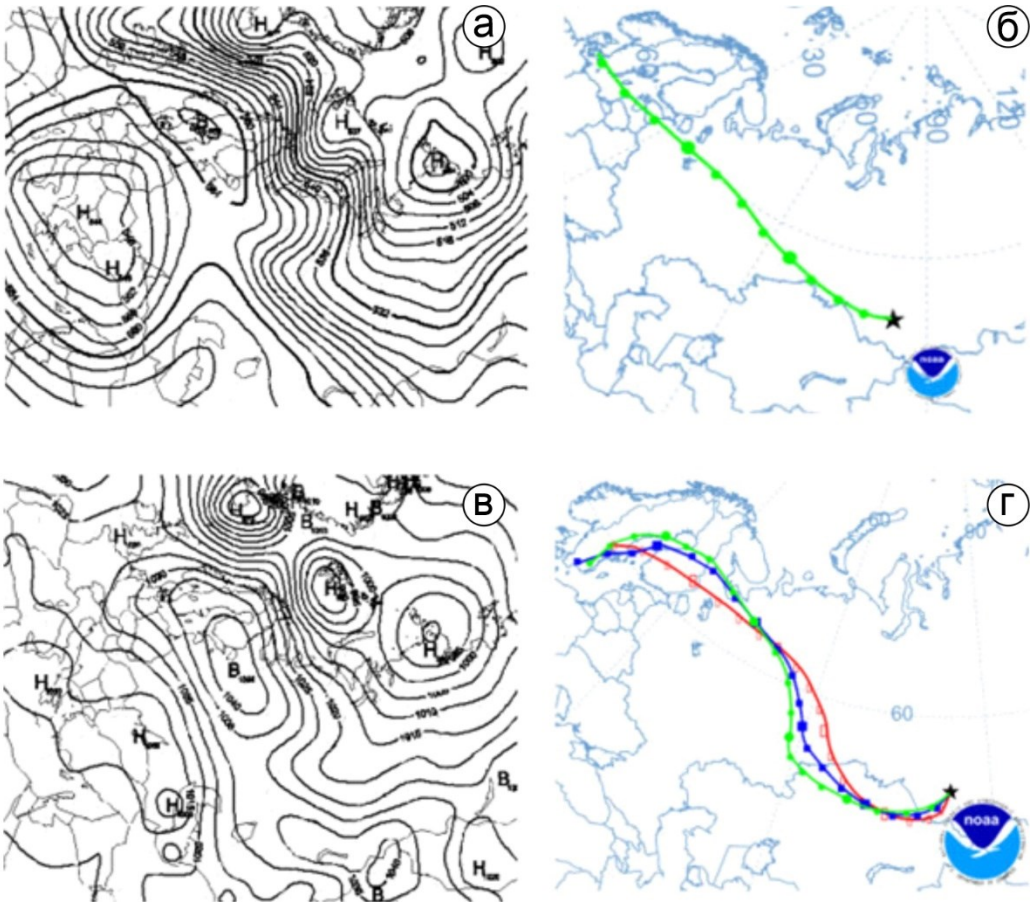

Рисунок 4.1. – Карты барической топографии: АТ-500 мб (а) и АТ-1000 мб (в) и обратные траектории движения воздушных масс 13 марта 2015 г. на высотах 3000 м (б), 500 м (г – зеленая линия), 300 м (г – синяя линия) и 100 м (г – красная линия)

В нижней тропосфере отмечалось частое прохождение серии фронтов, обусловленных циклоническими образованиями, что, в свою очередь, приводило к выпадению осадков на севере европейской части России и в Сибири. Холодный фронт и фронт окклюзии проходили 13 марта 2015 г. через юг Западной Сибири, обусловив осаждение твердых атмосферных осадков в количестве до 5 мм/сутки.

Важно отметить, что движение воздушных масс в приземном слое было юго-западным, которое сменилось на западное и северо-западное после прохождения фронтов (Malygina et al., 2018). Общее время развития описанного процесса составило порядка 5 суток, что практически совпадает с длительностью естественного синоптического процесса (ЕСП) во втором естественно синоптическом районе, где располагалась РТ мониторинга.

В ходе анализа синоптической ситуации было реализовано и траекторное моделирование в HYSPLIT с применением параметров, наиболее часто используемых при аэробиологических исследованиях: временной интервал от 72 до 240 часов; стандартные высоты – 100, 300, 500, 1000 и 1500 м над землей (Fernández-Rodríguez et al., 2014; Hernandez-Ceballos et al., 2014), включая дополнительную высоту в 3000 м (Mohanty et al., 2017). Выбор данных высот обусловлен возможностью охвата как локального (100 и 300 м), регионального (500-1000 м), так и глобального (1500 и 3000 м) переноса пыльцевых зерен. Начало построения обратных траекторий движения воздушных масс соответствовало моменту начала анализируемого события выпадения осадков, исходным местом которого являлось расположение рекогносцировочной точки. Таким образом были рассчитаны обратные траектории движения воздушных масс, пути смещения которых показали аналогичное с результатами синоптического анализа движение (с северо-запада на юго-восток) как на высоте 3000 метров (рисунок 4.1. б), так и в приземном слое (рисунок 4.1. г).

По данным синоптического анализа в первую очередь юг Фенноскандии стал основной территорий, с которой поступала адвективная пыльца ивы (*Salix* sp.), выделенная в осадках, отобранных на рекогносцировочной точке 13 марта 2015 г., вследствие возможного вторичного подъема пыльцевых зерен. Для подтверждения данного предположения были проанализированы карты распространения снежного покрова (рисунок 4.2) как на дату выпадения осадков, так и предшествующий им период, результаты которого показали следующее.

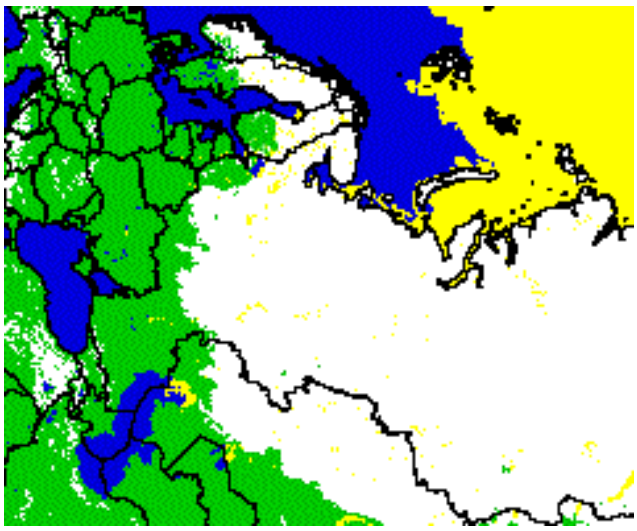

Рисунок 4.2 – Карта распространения снежного и ледового покровов на 13 марта 2015 г. (National centers for…, 2021)

Южная часть Фенноскандии на момент формирования над ней воздушных масс, обусловивших выпадение пыльцы с осадками, уже освободилась от снега и могла выступать источником вторичного подъема пыльцевых зерен, что было связано со следующим. Над прогретой земной поверхностью формировались теплые воздушные массы, и при натекании на них холодных масс возникала адвекция, способствующая вовлечению и дальнейшему переносу пыльцы с воздушными массами, суть подобных процессов была ранее детально описаны (Ахметшина, 2006). Принципиально важным является и то, что по данным рабочей группы Европейской программы лесных генетических ресурсов (European forest genetic…, 2021) ива (*Salix* sp.) имеет широкий ареал распространения на территории Фенноскандии, что дополнительно подтверждает высказанное ранее предположение о возможности ее поступления.

В связи с тем, что синоптический анализ выполняли в целях определения путей переноса воздушных масс, обуславливающих осаждение пыльцы с осадками, которая преимущественно циркулирует в пределах пограничного слоя атмосферы, были проанализированы данные реанализа ERA по изменению высот ПСА на пути движения воздушных масс с места начала их формирования над Фенноскандией. Результаты анализа показали, что высота ПСА варьировала от нескольких десятков над территориями формирования, способствуя поднятию пыльцы с восходящими

потоками, до тысяч метров по пути их следования. При этом изменение высот ПСА практически зеркально отражалось в изменениях высот рассчитанных обратных траекторий движения воздушных масс и подтверждалось данными синоптического анализа.

Пыльца ивы (*Salix* sp.) была выделена и в осадках, выпадавших на РТ мониторинга и в период с 18 по 20 марта 2015 г., связи с чем, как и в предыдущем случае, был выполнен синоптический анализ, который показал следующее. Накануне меридиональная атмосферная циркуляция существенно усилилась в первом естественно-синоптическом районе, в связи с чем в средней тропосфере над центральными и восточными районами Европы сформировался антициклон, охватывающий Фенноскандию и Кольский полуостров, который в нижней тропосфере прослеживался практически до Алтая-Саянского региона (рисунок 4.3. а).

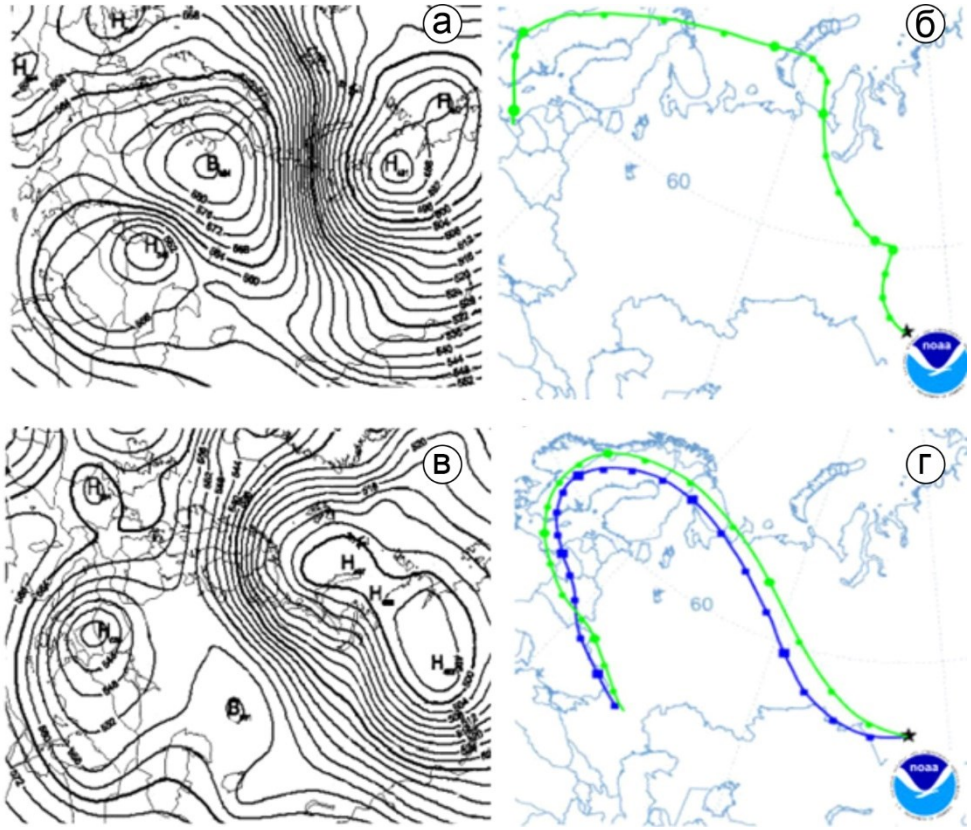

Рисунок 4.3. – Карта барической топографии АТ-500 мб (а) и обратная траектория движения воздушных масс 18 марта 2015 г. на высоте 3000 м (б); карта барической топографии АТ-500 мб (в) и обратные траектории движения воздушных масс 20 марта 2015 г. на высоте 3000 м (г – зеленая линия) и 1500 м (г – синяя линия)

При этом из района Исландского минимума смещался циклон, углубление западной ложбины которого привело к увеличению барических градиентов во фронтальной зоне над Западной Сибирью, и, как следствие, к устойчивому северо-западному смещению. Практически аналогичный путь показала обратная траектория движения воздушных масс на высоте 3000 м (рисунок 4.3. б). Несмотря на то, что эта траектория проходила несколько севернее, чем ранее рассчитанная для первого эпизода осаждения пыльцы ивы (*Salix* sp.) с осадками, все же она захватывала Фенноскандию, особенно ее южную часть.

Дальнейшее углубление Арктической депрессии определило развитие атмосферного процесса, а именно циклона, располагающегося в средней тропосфере, который распространил свое влияние почти на всю часть российской Арктики (рисунок 4.3. в). Одновременно происходило разрушение Европейского антициклона в результате чего воздушные массы над Фенноскандией и севером европейской территории России приобрели меридиональное направление движения. В это время Сибирский циклон заполнился и углубился, что привело к усилению адвекции североатлантических воздушных масс на центральные и восточные районы Западной Сибири, а по южной периферии высотной фронтальной зоны происходил перенос из Фенноскандии.

Рассчитанные обратные траектории для высот 1500 и 3000 м (рисунок 4.3. в) показали, что воздушные массы проходили над южными территориями Фенноскандии, уже освободившимися от снежного покрова (рисунок 4.2), на которых произрастают виды рода *Salix* (по данным EUFORGEN Networks), что так же подтверждает поступление адвективной пыльцы с данной территории. Важно отметить, что проанализированные данные по изменению высот ПСА так же были отражены в высотных вариациях обратных траекторий движения воздушных масс, а длительность данного синоптического процесса, как и в предыдущем случае, была практически ЕСП, что указывает на необходимость учета этих параметров при траекторном моделировании.

Для остальных дат первого холодного периода мониторинга, в которых были выделены пыльцевые зерна в атмосферных осадках также был проведен

синоптический анализ и траекторное моделирование, и их результаты показали, что направления рассчитанных обратных траекторий движения воздушных масс в каждом случае были аналогичны направлениям, определенным в ходе синоптического анализа. Анализ синоптических обстановок является довольно трудоемким процессом, требующим привлечения высококвалифицированных специалистов, а полученные данные траекторного моделирования и синоптического анализа показывают практически идентичные результаты. В этой связи для анализа последующих случаев за основу было взято траекторное моделирование с учетом высот ПСА и продолжительность ЕСП, результаты которого верифицировали с привлечением синоптических данных для повышения достоверности.

4.2. Алгоритм определения атмосферного поступления пыльцевых зерен с осадками

На основе данных, полученных в ходе проведенного синоптического анализа по определению путей движения воздушных масс, обуславливающих выпадение пыльцевых зерен с твердыми атмосферными осадками, предложен алгоритм, в основу которого положено траекторное моделирование, выполняемое в Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model – HYSPLIT Model (Air resources…, 2021). Данная модель позволяет устанавливать связь между источником и рецептором как в виде прямых, так и обратных рассчитанных траекторий, находится в свободном доступе и является наиболее часто используемой при аэробиологических исследованиях.

В HYSPLIT модели при расчетах траекторий в качестве исходных данных задают координаты, время старта (для прямых траекторий) либо время прихода (для обратных траекторий), общее время движения и высоту переноса. Источники метеопараметров выбирают из доступных архивов и реанализов European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (European centre…, 2021) National Centers for

Environmental Prediction (National weather service…, 2021), Japan Meteorological Agency Climate Data Assimilation System (Japan meteorological agency…, 2021) Наиболее точные данные траекторного моделирования удается получать с использованием метеорологических параметров, имеющих высокое пространственное (до десятых долей градуса) и временное (час) разрешение, поэтому в рамках предлагаемого алгоритма необходимо выбирать данные, соответствующие этим критериям.

При реализации траекторного моделирования нужно использовать координаты точки мониторинга, т.к. именно на ней происходил отбор проб осадков, в которых идентифицировали пыльцевые зерна, а также их дату и время начала выпадения. В связи с особенностями поставленной задачи стоит рассчитывать обратные траектории, что так же указывается в модели до начала проведения расчетов.

На основе выполненного детального синоптического анализа для дат, когда в атмосферных осадках рекогносцировочной точки были определены пыльцевые зерна, было показано, что высоты переноса воздушных масс, обуславливающих эти выпадения, соответствуют ПСА. Выбор именно высоты ПСА в качестве входного параметра при моделировании дополнительно обусловлен тем, что большинство всех процессов по переносу биологических частиц происходит в пределах пограничного слоя атмосферы (Linskens and Jorge, 1986; Brunet et al., 2017; Nissanka et al., 2018). Данные о высотах ПСА можно получать из различных источников, но наиболее предпочтительным являются реанализы семейства ERA (European centre…, 2022), имеющие часовое разрешение. Важно отметить, что последняя версия модели HYSPLIT при расчетах траекторий может учитывать изменения в ПСА, однако это дополнительно необходимо указывать, и, в первую очередь, при реализации алгоритма.

Продолжительность построения траектории по результатам ранее выполненного анализа должна быть не менее продолжительности ЕСП для того естественно-синоптического района, в котором располагается точка мониторинга. Так средняя продолжительность ЕСП для первого естественно-синоптического

района составляет 3 суток, а для территорий, находящихся на большем удалении от Атлантического океана, она возрастает и во втором районе составляет порядка 5 суток (Савичев, 1980). В связи с тем, что мониторинг проводили на юго-востоке Западной Сибири, т.е. территории, относящейся ко второму естественно-синоптическому району, общее время движения траекторий в рамках алгоритма должно составлять не менее 120 часов.

После введения всех заданных параметров в модель HYSPLIT происходит их обработка и интерполяция во внутреннюю сетку модели, а затем и вычисляется необходимая траектория. Визуализация рассчитанных траекторий в HYSPLIT выполняется как в виде единичных обратных траекторий движения воздушных масс, так и частотных, которые отражают направление множества отдельных траекторий с учетом их процентного вклада. Все единичные траектории можно сохранять в двух форматах (pdf и kmz), позволяющих анализировать как изменения высот движения, так и проводить их комплексный пространственный анализ, а затем и сводить в единый каталог на основе Google Earth. Сохранение данных траекторного моделирования в двух форматах является важным условием успешной реализации предлагаемого алгоритма.

Следующим этапом алгоритма является верификация рассчитанных обратных траекторий движения воздушных масс на основе синоптического анализа по данным натурных наблюдений, полученных непосредственно в ходе отбора проб, а также метеостанций, расположенных в непосредственной близости от мест мониторинга. Дополнительно стоит анализировать карты барической топографии для разных изобарических высот в зависимости от высоты, для которой была построена обратная траектория. При проведении такого анализа важно учитывать данные средних скоростей и направлений ветра, изменений высот геопотенциала, температурный и влажностной режимы и ряд других метеопараметров, содержащихся в реанализах (Physical sciences laboratory…, 2021; European centre…, 2021).

Предпоследним этапом алгоритма определения атмосферного поступления пыльцевых зерен с осадками в холодный период является оценка распространения снежного покрова по данным (European centre…, 2021) имеющим ежедневное

разрешение. Важно отметить, что снежный покров является лимитирующим фактором в поступлении пыльцы в зимний период, т.к. исключает локальное поступление пыльцевой компоненты, а результаты такой оценки позволяют детально отслеживать динамику распространения снежного покрова и выделять как те районы, которые могли выступать потенциальными источниками пыльцевых зерен, т.к. их подстилающая поверхность была открыта, так и те, которые не были таковыми, в связи с наличием снежного покрова на их территории.

На заключительном этапе для всех определенных таксонов пыльцевых зерен в атмосферных осадках проводят сравнительно-географический анализ разноплановой информации относительно мест их произрастания, включая карты ареалов распространения, ботанические описания и ряд других характеристик. Полученные данные сопоставляют с таксономическим разнообразием выделенных пыльцевых спектров, в результате чего-либо подтверждают возможность поступление пыльцевых зерен, либо отвергают таковую.

Таким образом, предложенный алгоритм определения атмосферного поступления пыльцевых зерен с осадками в холодный период поэтапно включает следующее: траекторное моделирований с введением граничных временных (ЕСП) и пространственных (ПСА) параметров, верификацию рассчитанных траекторий по данными комплексного синоптического анализа, оценку влияния лимитирующего фактора (распространение устойчивого снежного покрова) и сравнительно-географический анализ выделенных таксонов в пыльцевых спектрах и данными их распространения.

На основе разработанного алгоритма было рассчитано 460 обратных траекторий движения воздушных масс для всех дат, когда осадки в твердом виде выпадали на четырех точках мониторинга в течение семи холодных периодов. Комплексный анализ полученных данных показал, что воздушные массы, обусловившие выпадение атмосферных осадков, в которых не была определена пыльца (317 проб), формировались над закрытыми снегом территориями, что препятствовало вторичному подъему пыльцы с подстилающих поверхностей. При этом воздушные массы, обусловившие осадки, а с ними и поступление пыльцевых

зерен в 143 случаях, формировались над территориями либо еще свободными от снежного покрова, либо над теми, где он уже разрушился, траектории движения этих воздушных масс на основе Google Earth сведены в единый каталог (рисунок 4.4).

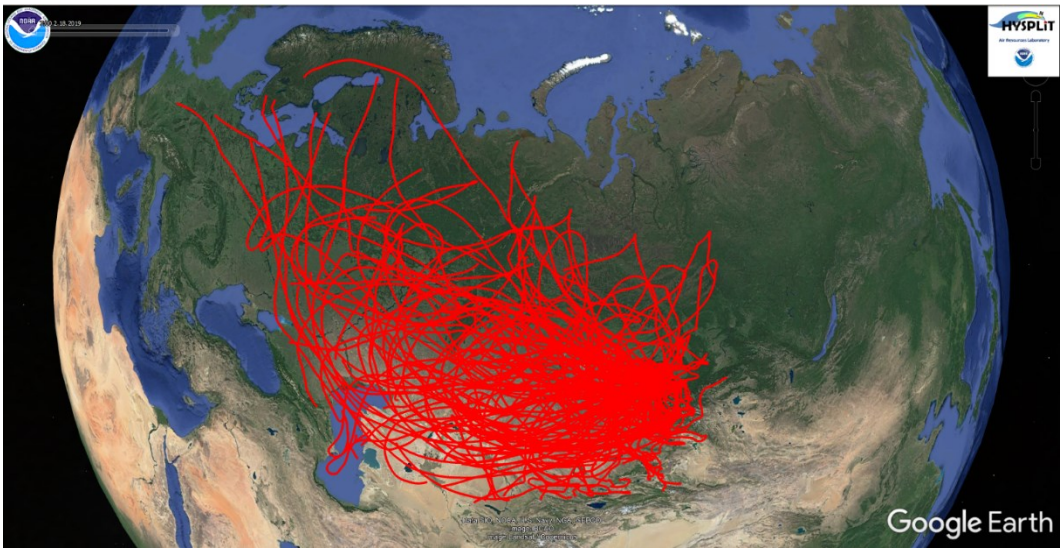

Рисунок 4.4 – Обратные траектории движения воздушных масс (HYSPLIT) на даты выпадения атмосферных осадков

В каждом конкретном случае, когда в осадках были определены пыльцевые зерна, удавалось выделить направления их атмосферного поступления, но провести их группировку не представлялось возможным, т.к. от даты к дате для одного и того же таксона в большинстве случаев они отличались. Но все же для пыльцы полыни (*Artemisia* sp.) и ивы (*Salix* sp.) были определены схожие направления поступления, на возможность чего ранее указывали данные статистического анализа.

4.3. Адвективные пыльцевые зерна полыни (*Artemisia* sp.) и ивы (*Salix* sp.) в осадках, как атмосферные трассеры на юго-востоке Западной Сибири в холодный период

Одной из наиболее всесторонне изученных среди пыльцевых зерен является пыльца полыни (*Artemisia* sp.), что объясняется рядом причин. Во-первых, эта пыльца

является очень сильным аллергеном, что обусловило проведение аэропалинологических наблюдений за ее концентрацией в воздухе (Stepalska et al., 2017; Cristofori et al., 2020). Во-вторых, данные пыльцевые зерна достаточно легко определяются (ввиду морфологических особенностей) в различных пробах, что объясняет их активное применение в качестве индикаторов при оценках состояний природных систем и изучении процессов, происходящих в них, включая палеоклиматические и палеоэкологические реконструкции (Nakazawa et al., 2005; Festi et al., 2017).

Пыльцевые зерна полыни в пробах РТ были преимущественно выделены в ноябре-декабре, а ее вклад в сезонные спектры достигал 5%. В пробах ОТ, пыльца *Artemisia* sp. была определена в 20% проб, при этом в VI периоде она была выделена только в декабре, а в VII периоде – в пробах каждого месяца (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Распределение пыльцы полыни (*Artemisia* sp.) по месяцам

Точка	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
	2014-2015 гг.				
РТ	-	-	-	-	-
	2015-2016 гг.				
РТ	*Artemisia* sp.	*Artemisia* sp.	-	-	-
	2016-2017 гг.				
РТ	*Artemisia* sp.	-	-	-	-
	2017-2018 гг.				
РТ	*Artemisia* sp.	-	-	-	-
	2018-2019				
РТ	*Artemisia* sp.	-	-	-	-
	2019-2020 гг.				
ОТ № 1	-	*Artemisia* sp.	-	-	-
ОТ № 2	-	*Artemisia* sp.	-	-	-
ОТ № 3	-	*Artemisia* sp.	-	-	-
	2020-2021 гг.				
ОТ № 1	*Artemisia* sp.	-	*Artemisia* sp.	*Artemisia* sp.	*Artemisia* sp.
ОТ № 2	-	-	*Artemisia* sp.	*Artemisia* sp.	-
ОТ № 3	*Artemisia* sp.	*Artemisia* sp.	-	*Artemisia* sp.	-

«-» пыльцевые зерна не выделены

Определение источников воздушных масс, с которыми поступала пыльца полыни, было реализовано на основе разработанного алгоритма и представлено на примере 28 ноября 2015 г., когда в пробах осадков впервые была выделена данная пыльца. Для этой даты была рассчитана обратная траектория движения воздушных масс (HYSPLIT) с учетом высоты ПСА и продолжительностью не менее ЕСП

(рисунок 4.5. а), которая показала, что адвективные воздушные массы формировались над южными территориями Центрального Казахстана, а потом смещались на северо-восток, т.е. в направлении точки мониторинга, что подтверждают и данные синоптического анализа.

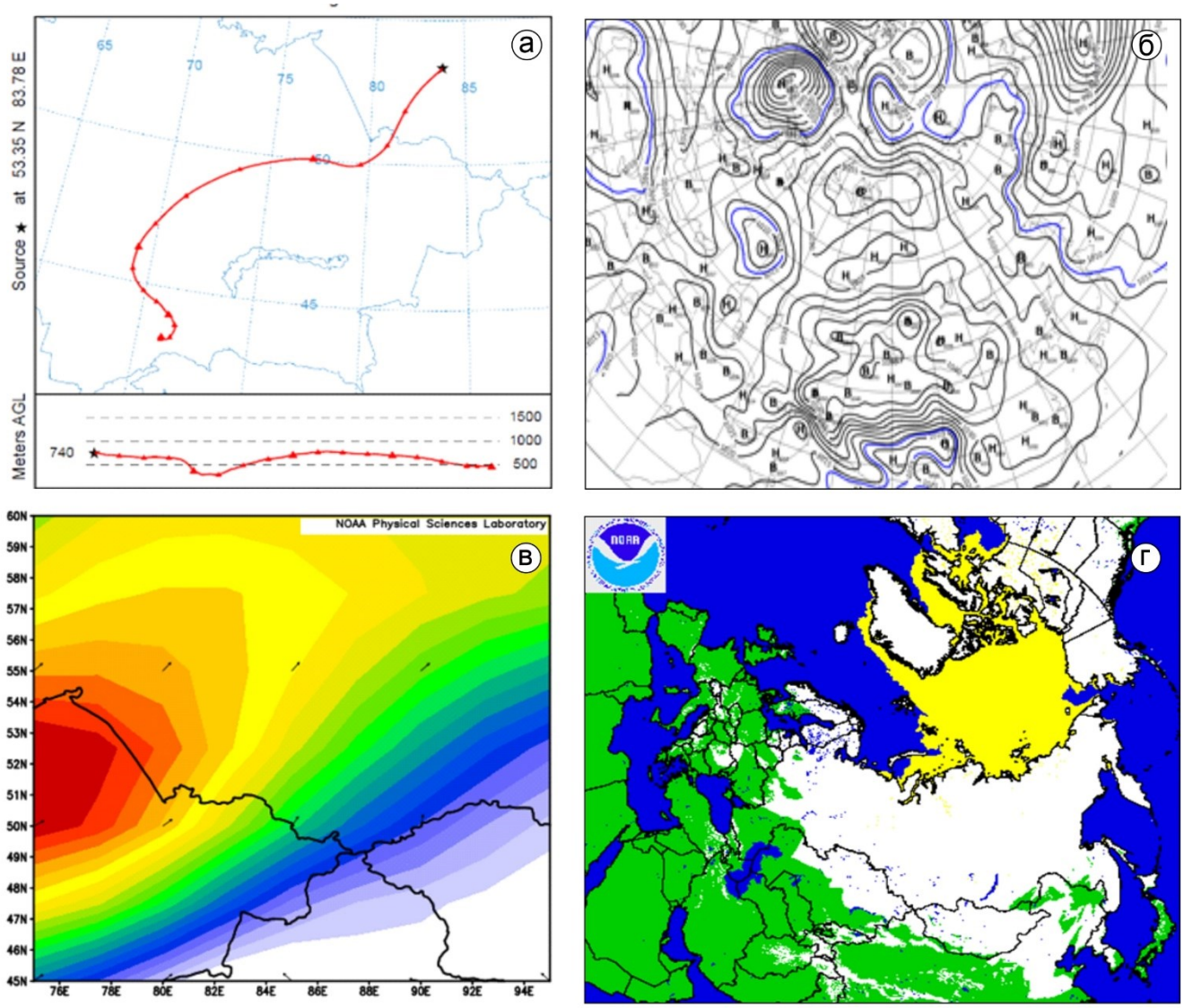

Рисунок 4.5 – Обратная траектория движения воздушных масс (HYSPLIT) (а), карта барической топографии АТ-1000 (б) средние скорости и направления ветра (в) и карта распространения снежного покрова (European Centre for…, 2021) (г) на 28 ноября 2015 г.

Рассчитанная траектория была верифицирована результатами комплексного синоптического анализа по данным карт барической топографии (рисунок 4.5. б), средних скоростей и направлений ветра (рисунок 4.5. в). Далее на дату выпадения

осадков и предшествующий период были оценены карты распространения снежного покрова, данные которых показали, что территория места отбора проб и сопредельные с ней были покрыты снежным покровом, а район, где формировались воздушные массы был свободен от него (рисунок 4.5. г), что способствовало возможному вторичному подъему и переносу пыльцы.

Анализ информации о распространении полыни показал, что она играет большую роль при формировании растительности степи, которая увеличивается при движении от лесостепи к полупустыням, где полынь является доминантой. На территории Центрального Казахстана прослеживается весьма значительное участие полыней в растительном покрове (Поляков, 1961; Исаченко, Рачковская, 1961; Рачковская, 2016). Помимо этого, все полыни являются ветроопыляемыми травами с продолжительным периодом пыления (с июля по сентябрь – до первых заморозков), а после окончания единичные пыльцевые зерна еще длительное время могут находиться во взвешенном состоянии в воздушном пространстве. Это указывает на то, что определенная пыльца могла быть занесена как в результате вторичного подъема с еще свободной от снежного покрова подстилающей поверхности, так и с территорий, расположенных южнее точки мониторинга, где она еще могла циркулировать в воздухе. В совокупности это позволило определить, что выделенные в пробе снега 28 ноября 2015 г. адвективные пыльцевые зерна полыни поступали с воздушными массами, сформированными над Центральным Казахстаном, который на момент их формирования был еще свободен от снежного покрова.

Разработанный алгоритм был реализован для всех остальных дат, в пробах которых были выделены пыльцевые зерна полыни (*Artemisia* sp.). Построенные траектории были верифицированы по данным синоптического анализа и объединены на основе Google Earth (рисунок 4.6), а также проведен сравнительно-географический анализ. В результате чего было показано, что основной территорией, с которой поступали пыльцевые зерна полыни с осадками на юго-восток Западной Сибири, являлся Центральный Казахстан вне зависимости от точки и времени отбора проб (Курятникова и др., 2022), что позволяет использовать

данные пыльцевые зерна в качестве трассеров атмосферного межгеосистемного взаимодействия.

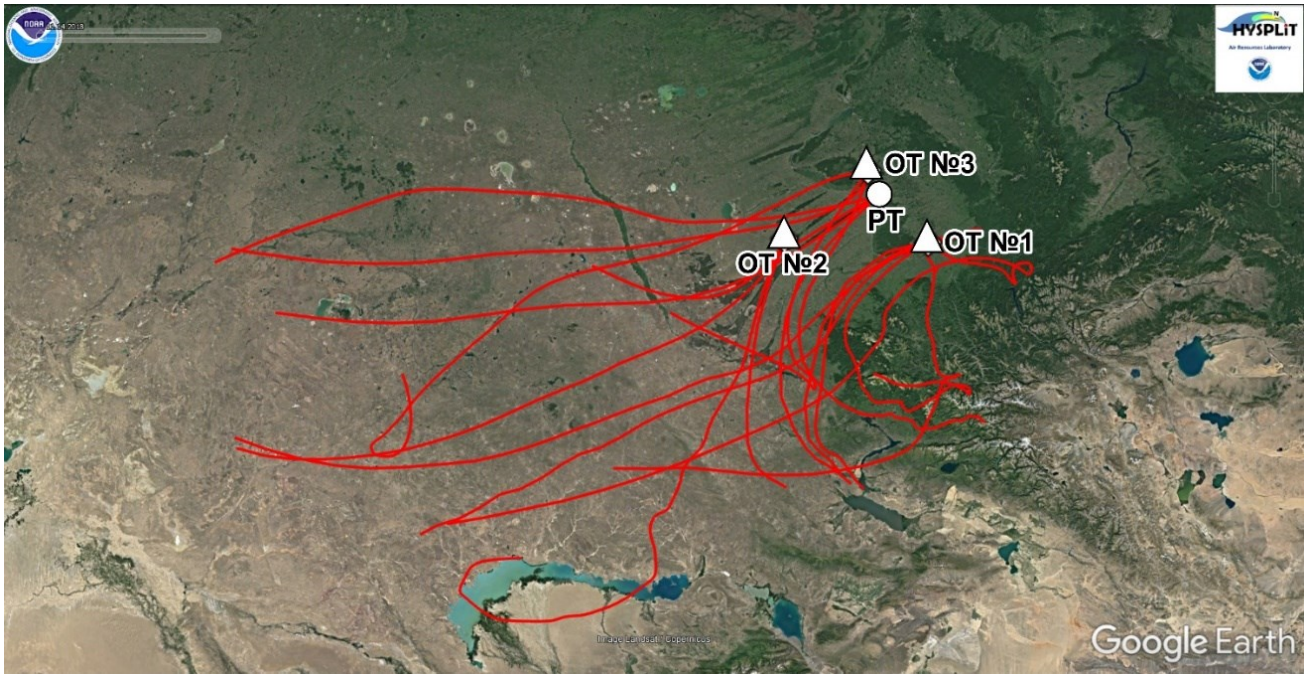

Рисунок 4.6 – Обратные траекторий движения воздушных масс (Air resources …, 2022) для дат, когда в пробах атмосферных осадков была идентифицирована пыльца полыни (*Artemisia* sp.) на РТ и ОТ

Пыльцевые зерна ивы (*Salix* sp.) были выделены в пробах твердых атмосферных осадков, отобранных в марте 2015 г. на РТ и в пробах февраля-марта 2021 г. ОТ № 2. Необходимо отметить, что в те даты, когда в пробах, полученных на ОТ № 2 в 2021 г. была определена пыльца ивы, на ОТ № 1 и № 3 атмосферные осадки не выпадали, что объясняется региональными особенностями развития синоптического процесса, при котором происходило выпадение осадков. Эти факты в совокупности с результатами статической обработки послужили основанием для выбора данных пыльцевых зерен в качестве трассеров переноса воздушных масс в холодный период. В пользу пыльцы ивы послужило и то, что она довольно хорошо определяется, ввиду своих морфологических особенностей.

Для всех дат, когда в пробах, отобранных в ходе мониторинга, была выделена пыльца ивы, рассчитывали обратные траектории движения воздушных масс для высот ПСА и продолжительностью не менее ЕСП, которые показали, что воздушные массы, обуславливающие выпадение осадков, а с ними и пыльцы

формировались над южными территориями Фенноскандии, которая, согласно картам распространения снежного покрова, уже была свободна от снежного покрова. Верификация рассчитанных траекторий как для стандартных высот, так и для высот ПСА, была выполнена по данным анализа карт барической топографии АТ-500 и АТ-1000, которые показали, что преобладающим направлением ветра в приземном слое было юго-западное, которое после прохождения холодных фронтов кратковременно изменялось на западное и северо-западное.

Комплексный анализ направлений движений воздушных масс по данным траекторий, карт барической топографии и распространения снежного покрова показал, что воздушные массы формировались над южными территориями Фенноскандии, которые на этот период уже не были открыты от снега. При этом количество видов *Salix* в мире оценивают до 530, с наибольшей концентрацией в северной части Евразии и Северной Америки, а так же в горах Китая (Fang, 1987; Skvortsov, 1999; Hörandl et al., 2002; Argus, 2007; Isebrands and Sebrands, 2020). Согласно данным, представленным Европейской программой лесных генетических ресурсов (European forest genetic…, 2022), ива широко распространена на территории Фенноскандии, что дополнительно подтверждает возможность наличия ее пыльцевых зерен на подстилающей поверхности, а открытые от снега территории скорее всего являлись источником вторичного подъема пыльцевых зерен с юга Фенноскандии.

Алгоритм был успешно реализован и для дат 2020/21 гг., в пробах которых, отобранных на ОТ № 2, были так же определены пыльцевые зерна *Salix* sp. Рассчитанные обратные траектории показали, что воздушные массы, обуславливающие выпадение атмосферных осадков в феврале-марте 2021 г., как и в марте 2015 г., формировались над югом Фенноскандии (рисунок. 4.7 а).

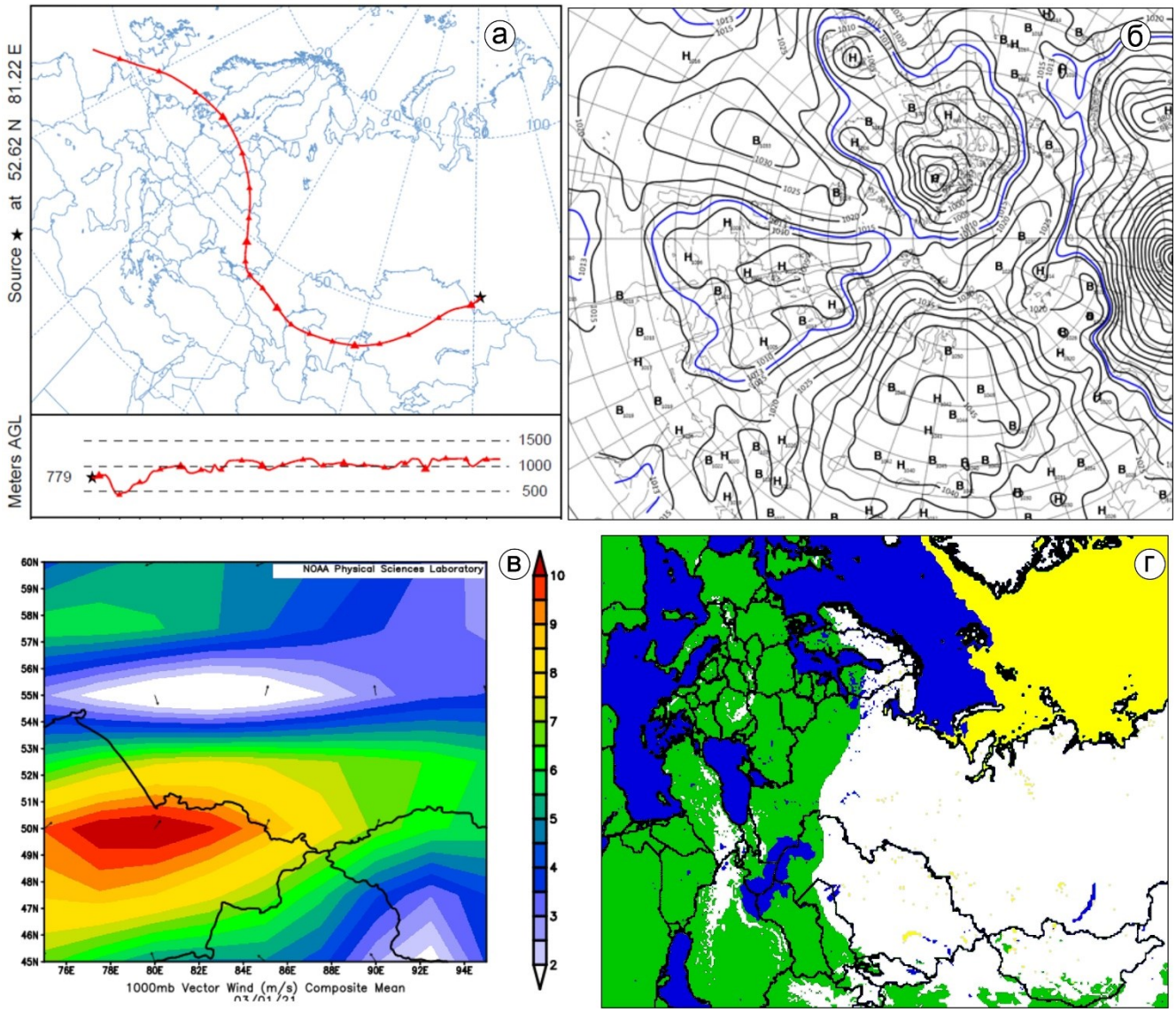

Рисунок 4.7 – Обратная траектория движения воздушных масс (HYSPLIT модель) карта барической топографии АТ-1000 (б), средние скорости и направления ветра (в) и карта распространения снежного покрова (г) на 01.03.2021 г.

Направления движения воздушных масс, определенные на основе траекторного моделирования, были верифицированы результатами синоптического анализа (рисунок. 4.7 б-в), который подтверждает, что воздушные массы, обуславливающие атмосферные осадки, приходили с северо-запада. Данные о распространении снежного покрова (рисунок 4.7 г) показали, что территория опорной точки мониторинга и сопредельные с ней районы были покрыты снежным покровом, однако территория Фенноскандии в момент формирования воздушных масс уже начала освобождаться от него.

Разработанный и успешно реализованный алгоритм, базирующийся на траекторном моделировании, показал, что все адвективные пыльцевые зерна *Salix* sp., выделенные в пробах твердых атмосферных осадков, в независимости от периода и точки отбора, поступали только с территории юга Фенноскандии, а пыльцы *Artemisia* sp. – Центрального Казахстана, свободных от снежного покрова в момент формирования над ними воздушных масс, обуславливающих выпадение атмосферных осадков, а с ними и пыльцы. Пыльцевые зерна полыни (*Artemisia* sp.) и ивы (*Salix* sp.) в спектрах осадков юго-востока Западной Сибири встречались не массово по сравнению с пыльцой сосны и березы, довольно хорошо идентифицировались и поступали с воздушными массами, сформированными над одними и теми же территориями, что подтверждает целесообразность их использования в качестве трассеров атмосферного взаимодействия между геосистемами регионального уровня. Важно отметить, что одновременного выделения пыльцы ивы и полыни в пробах осадков не отмечалось, что выступает еще одним фактом в пользу того, что данная пыльца является надежным атмосферным трассером горизонтальных связей региональных геосистем. Полученные результаты необходимо учитывать как при оценках изменений состояний природных объектов, так и при расчетах экологических рисков, например, потенциально возможного атмосферного поступления загрязняющих веществ с территорий, где происходило формирование воздушных масс, обусловивших выпадение с осадками пыльцы ивы (Фенноскандия) и полыни (Центральный Казахстан) на юго-востоке Западной Сибири.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Данные большинства наблюдений за пыльцевыми зернами, проводимых, на станциях аэропалинологического мониторинга, не позволяют оценивать полный объем поступления пыльцы из атмосферы, т.к. при их выполнении не учитывают вымывание пыльцы со снегом, которое для биоаэрозолей существенно превалирует как над сухим осаждением, так и дождем. Поэтому при мониторинге адвективной пыльцевой составляющей в твердых атмосферных осадках необходимо соблюдать следующие условия: наличие устойчивого снежного покрова и отсутствие вегетации; событийный отбор твердых атмосферных осадков (снега) при помощи пробоотборника, соответствующего требованиям РМР; проведение лабораторной пробоподготовки седиментационным методом; комбинаровать световой и сканирующей микроскопии.

2. Результаты впервые проведенного микроскопического анализа 460 проб твердых атмосферных осадков, отобранных в ходе мониторинга на юго-востоке Западной Сибири с соблюдением вышеописанных условий, показали наличие в 143 пробах пыльцевых зерен 12 таксонов, а в остальных образцах (317 шт.) пыльца не была обнаружена. Основная часть пыльцевых зерен содержалась в пробах осадков, отобранных в начале и конце холодных периодов, когда воздушные массы, обуславливающие их выпадение, приходили либо с территорий еще свободных от снежного покрова, либо уже освободившихся от него.

3. Анализ пыльцевых спектров, выделенных для каждой из четырех точек мониторинга, не показал существенных изменений таксономического разнообразия для степной и лесостепной зон юго-востока Западной Сибири, что связано с незначительным удалением точек мониторинга друг от друга. Полученные результаты таксономического разнообразия показали целесообразность проведения верификаций, ранее выполненных

палеореконструкций по данным спорово-пыльцевых спектров как для территории исследования, так и сопредельных регионов.

4. Разработанный и успешно реализованный алгоритм, базирующийся на траекторном моделировании, показал, что все адвективные пыльцевые зерна *Salix* sp., выделенные в пробах твердых атмосферных осадков, в независимости от периода и места отбора поступали только с территории юга Фенноскандии, а *Artemisia* sp. – Центрального Казахстана. Данные пыльцевые зерна были встречены не часто, довольно хорошо идентифицировались, но одновременного выделения пыльцы ивы и полыни в пробах осадков не отмечали, что обусловливает использование пыльцы этих таксонов в качестве одних из атмосферных трассеров горизонтальных связей региональных геосистем.

5. Полученные в ходе выполнения работы результаты стоит учитывать, как при оценках изменений состояний природных объектов, так и при расчетах экологических рисков, например, потенциально возможного атмосферного поступления загрязняющих веществ с территорий, где происходило формирование воздушных масс, обусловивших выпадение атмосферных осадков.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЕСП	Естественный синоптический период
ОТ	Опорная точка
ПСА	Пограничный слой атмосферы
РТ	Рекогносцировочная точка
HYSPLIT	Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model
NCEP/NCAR	National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research
PMP	Pollen monitoring program

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Александрова, В.Д. Растительный покров и природные кормовые угодья Алтайского края / В.Д. Александрова, Н.П. Гуричева, Л.И. Иванина // Природное районирование Алтайского края. – М.: Изд–во АН СССР, 1958. – С. 135–160.

2) Арктический и антарктический научно-исследовательский институт [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.aari.ru/ – Загл. с экрана. – (Дата обращения 20.05.2021).

3) Атлас Алтайского края. – Москва, Барнаул: ГУГК, 1978. – Т. 1. – 222 с.

4) Ахметшина, А.С. Инверсии температуры воздуха как фактор, влияющий на уровень загрязнения пограничного слоя атмосферы : на примере г. Томска : дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36 / Ахметшина Анна Сергеевна. – Томск, 2015. – 210 с.

5) Аэрозоли Сибири / И. С. Андреева и др.; отв. ред. К. П. Куценогий. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 548 с.

6) Васильчук, А.К. Палиноспектры пластовой ледяной залежи в долине реки Еркутаяха, Южный Ямал / А.К. Васильчук // Арктика и Антарктика. – 2018. – № 1. – С. 86–96.

7) Винокуров, Ю.И. Ландшафтные индикаторы инженерно- и гидрогеологических условий Предалтайских равнин / Ю.И. Винокуров. – Новосибирск: Наука, 1980. – 192 с.

8) Винокуров, Ю.И. Ландшафтная индикация в эколого-географических исследованиях / Ю.И. Винокуров, Ю.М. Цимбалей Ю.М. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. – 258 с.

9) Вронский, В.А. «Пыльцевой дождь» над акваторией Азовского моря / В.А. Вронский // Океанология. – 1970. – № 10 (4). – С.732–733.

10) Герасимов, И.П. Экологические проблемы в прошлой, настоящей и будущей географии мира / И.П. Герасимов – М.: Наука, 1985. – 238 с.

11) Головко, В.В. Экологические аспекты аэропалинологии : Аналит. обзор / В.В. Головко .– СО РАН. Ин-т химической кинетики и горения; ГПНТБ. Новосибирск, – 2004. – 107 с.

12) ГОСТ Р 14.09 –2005 Руководство по оценке риска в области экологического менеджмента. – М. : Стандартинформ, 2010. – 35 с.

13) ГОСТ 56828.38 – 2018 Наилучшие доступные технологии. Окружающая среда. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2018. – 30 с.

14) ГОСТ Р 54139 – 2010 Экологический менеджмент. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Изменение климата. – М. : Стандартиформ, 2012. – 11 с.

15) ГОСТ 12.0.003–2015 Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М. : Стандартинформ, 2019. – 9 с.

16) Грегори, Ф. Микробиология атмосферы / Ф. Грегори, М. : Мир, 1964. – 372 с.

17) Гричук, В.П. История флоры и растительности Русской равнины в плейстоцене / В.П. Гричук. – М. : Наука, 1989. – 183 с.

18) Дзюба, О.Ф. Атлас пыльцевых зерен (неацетолизированных и ацетолизированных), наиболее часто встречающихся в воздушном бассейне Восточной Европы / О.Ф. Дзюба. – М., 2005. – 70 с.

19) Елькина, Н.А. Состав и динамика пыльцевого спектра воздушной среды г. Петрозаводск : автореф. дис. … канд. биол. наук : 03.00.16 / Елькина Надежда Александровна. – СПб., 2008. – 24 с.

20) Заклинская, Е.Д. Опыт определения дальности воздушной транспортировки спор папоротника Driopteris filix masculinum / Е.Д. Заклинская // Конф. по спорово-пыльцевому анализу: труды. – М., 1950. – С. 211–225.

21) Зарина, Л.М. Геоэкологический практикум: Учебно–методическое пособие / Л.М. Зарина, С.М. Гильдин. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2011. – 60 с.

22) Ивлев, Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей / Л. С. Ивлев – Л. : Изд-во Лен. Ун-та, 1982. – 368 с.

23) Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль – М. : Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с.

24) Исаченко, Т. И. Основные зональные типы степей Северного Казахстана / Т.И. Исаченко, Е.И. Рачковская // Тр. БИН АН СССР. Серия 3. Геоботаника. – 1961. – №. 13. – С. 133–397.

25) Исаченко, А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование / А.Г. Исаченко. – М. : Высшая школа, 1991. – 366 с.

26) Калинин, В.М. Экологический мониторинг природных сред / В.М. Калинин, Н.Е. Рязянова. – М.: НИЦ Инфра-М, 2015. – 203 с.

27) Карпова Е. Ольха – дерево души / Е. Карпова, А.Кузнецов // ЛесПромИнформ. – 2015. – № 2 (108). – 114–122.

28) Карпович, И.В. Атлас пыльцевых зерен / И.В. Карпович, Е.С. Дребезгина, Е.Н. Еловикова, Г.И. Леготкина, Е.Н. Зубова, Р.З. Кузяев, Р.Г. Хисматуллин. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2015. – 318 с.

29) Кирпичников, М.Э. Семейство сложноцветные (Asteraceae, или Compositae) / М.Э. Кирпичников // Жизнь растений: в 6 т. / гл. ред. А. Л. Тахтаджян. – М. : Просвещение, 1981. – Т. 5. Ч. 2 : Цветковые растения / под ред. А. Л. Тахтаджяна.– С. 462–476. – 512 с.

30) Котляков, В.М. Нивально-гляциальные системы Памир и Гиссаро-Алая / В.М. Котляков, А.Н. Кренке // Материалы гляциологических исследований. – 1979. – №35. – С. 25-33.

31) Кренке, Н.А. Пыльца и споры, осевшие на ледниках Земли Франца Иосифа / Н.А. Кренке, Р.В. Федорова – Материалы гляциологических исследований. – 1961. – № 2.

32) Кулундинский канал. Ландшафтно–индикационная оценка природных условий в зоне влияния и прогноз их изменений. / отв. ред. В.В. Воробьев, Ю.И. Винокуров. – Иркутск: Изд-во Института географии СО АН СССР, 1985. – 194 с.

33) Куминова А.В. Растительный покров Алтая / А.В. Куминова. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Академии наук СССР, 1960. – 450 с.

34) Куприянова, Л.А. Пыльца и споры двудольных растений флоры европейской части СССР / Л.А. Куприянова, Л.А. Алешина, Л. : Наука, 1978. – Т.1. – 174 с.

35) Куприянова, Л.А. Пыльца и споры растений флоры СССР. / Л.А. Куприянова, Л.А. Алешина. – Л. : Наука, 1972. – Т.1. – 171 с.

36) Ландшафтная карта Алтайского края [Карта]. – Масштаб: 1:500 000 / науч. ред. Ю.И. Винокуров. – Барнаул: ИВЭП СО РАН, 2016.

37) Лукьянов, А.Н. Глобальная атмосферная лагранжевая модель рассеивания частиц / А.Н. Лукьянов, А.В. Ганьшин, Р.В. Журавлев, Ш.Ш. Максютов, А.В. Варлагин // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2015. – № 51 (5). – С. 570–577.

38) Малыгина, Н.С. Макроциркуляционные процессы и атмосферные осадки в Алтайском регионе / Н.С. Малыгина, А.Г. Зяблицкая, Н.К. Кононова, Т.В. Барляева, О.В. Останин, Т.С. Папина //Известия Алтайского государственного университета. – 2014. – № 3 (83). – 151–155.

39) Мальгина, Е.А. К вопросу формирования спорово-пыльцевых спектров в условиях пустынь Средней Азии / Е.А. Мальгина // Труды Института географии АН СССР. – 1959. – Т.77 (21). – С. 113–139.

40) Мальгина, Е.А. Опыт сопоставления распространения пыльцы некоторых древесных пород с их ареалами в пределах Европейской части СССР / Е.А. Мальгина // Труды Института географии АН СССР, 1959. – Т.46 (3). – С. 256–270.

41) Недосеко, О.И. Жизненные формы рода Salix L. России / О.И. НЕдосеко, В.П. Викторов // Russian Journal of Ecosystem Ecology. – 2018. – № 3 (2). – 1–15.

42) Ненашева, Г.И. Аэропалинологический мониторинг аллергенных растений г. Барнаула / Г.И. Ненашева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. – 132 с.

43) Николаев, В.А. Проблемы регионального ландшафтоведения / В.А. Николаев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 160 с.

44) Николаев, В.А. Ландшафты азиатских степей / В.А. Николаев. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 288 с.

45) Поляков, П.П. Род Полынь – Artemisia L. / П.П. Поляков // Флора СССР. Т. 26. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 425–631.

46) Посевина, Ю.М. Палиноэкологический мониторинг атмосферного воздуха г. Рязани : дис.... канд. биол. наук : 03.02.08 / Посевина Юлия Михайловна. – Рязань, 2011. – 150 с.

47) Рачковская, Е.И Опустыненные полынно-дерновиннозлаковые степи Центрального Казахстана / Е.И. Рачковская // Растительность России. – 2016. – № 28. – С. 108–124.

48) Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / под ред. В.А. Абакумова и др. – СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. – 318 с.

49) Савина, Л.Н. Сохранность пыльцы лиственницы в лесных почвах и отражение состава лиственничных лесов Монголии в рецентных спектрах / Л.Н. Савина, Т.А. Буренина // Палеоботанические исследования в лесах Северной Азии. – Новосибирск: Наука, 1981. – С. 62–83.

50) Савичев, А.И. Синоптические методы анализа атмосферных процессов / А.И. Савичев. – Л. : ЛПИ, 1980. – 100 с.

51) Семенченко, Б. А. Физическая метеорология / Б. А. Семенченко. – М. : Аспект Пресс, 2002. – 417 с.

52) Силантьева, М.М. Конспект флоры Алтайского края / 2-е изд., доп. и перераб. / М.М. Силантьева. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. – 520 с.

53) Сладков, А.Н. Введение в спорово-пыльцевой анализ / А.Н. Сладков. – М., 1967. – 270 с.

54) Сляднев, А.П. Важнейшие черты климата Алтайского края / А.П. Сляднев, Я.И. Фельдман // Природное районирование Алтайского края. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – С. 9–61.

55) Сляднев, А.П. Методы оценки агроклиматических ресурсов на примере Алтайского края / А.П. Сляднев // Почвенная климатология Сибири. – Новосибирск: Наука, 1973. – С. 179–214.

56) Соболева, Н. П. Ландшафтоведение: учебное пособие / Н. П. Соболева, Е. Г. Язиков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 184 с.

57) Сочава, В.Б. Введение в учение о геосистемах / В.Б. Сочава. – Новосибирск : Наука, 1978. – 317с.

58) Суржиков, Д.В. Опыт применения статистико-математических технологий для оценки влияния атмосферных загрязнений на здоровье населения в крупном промышленном центре / Д.В. Суржиков, В.В. Кислицина, В.А. Штайгер, Р.А. Голиков // Гигиена и санитария. – 2021. – №100 (7). – С. 663–667.

59) Федорова, Р. В. О закономерностях рассеивания пыльцы и спор в воздухе (для целей палеогеографических исследований) / Р.В. Федорова, В.А. Вронский // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 1980. – №50. – С. 153–165.

60) Федорова, Р.В. Количественные закономерности распространения пыльцы древесных пород воздушным путем / Р.В. Федорова // Труды Института географии АН СССР. – 1952. – № 7 (52). – С.91–103.

61) Федорова, Р.В. Распространение пыльцы березы воздушным путем / Р.В. Федорова // Труды Института географии АН ССС: Материалы по геоморфологии и палеостратиографии. Работы по спорово-пыльцевому анализу. – №.77(22). – С.139–144.

62) Федорова, Р.В. Рассеивание воздушным путем пыльцы некоторых травянистsx растений / Р.В. Федорова // Доклады Академии наук СССР. Серия географическая. – 1956. – №1. – С. 37–45.

63) Харламова, Н.Ф. Климат / Н.Ф. Харламова // Энциклопедия Алтайского края: В 2 т. – Барнаул: Пикет, 1995. – Т. 1. – С. 32–38.

64) Харламова, Н.Ф. Оценка и прогноз современных изменений климата Алтайского региона / Н.Ф. Харламова. – Барнаул: изд-во АлтГУ, 2013. – 156 с.

65) Харламова, Н.Ф. Пространственно-временные характеристики снежного покрова Алтайского края / Н.Ф. Харламова, О.С. Казарцева // Ломоносовские чтения на Алтае. – 2003. – С. 1403–1406.

66) Харламова, Н.Ф. Характеристика высоты снежного покрова в Алтайском регионе за период с 1966-2011 г. / Н.Ф. Харламова, О.В. Казарцева // Известия Алтайского республиканского отделения РГО. – 2014. – С. 38–41.

67) Цимбалей, Ю.М. Ландшафтно–индикационные исследования в зоне Кулундинского канала для целей мелиорации: автореферат дис. ... канд. геогр. наук / Цимбалей Юрий Матвеевич. – Иркутск, 1985. – 17 с.

68) Ahas, R Changes in European spring phenology / R. Ahas, A. Aasa, A. Menzel, V.G. Fedotova, H. Scheifinger // International Journal of Climatology. – 2002. – V.22 (14). – P. 1727–1738.

69) Air resources laboratory [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php. – Загл. с экрана. – (Дата обращения 20.05.2021).

70) Argus, G.W. Salix (Salicaceae) distribution maps and a synopsis of their classification in North America, north of Mexico / G.W. Argus // Harvard Papers in Botany. – 2007. – V.12. – P. 335–368.

71) Beggs, P.J. Aerobiology in the International Journal of Biometeorology, 1957–2017 / P.J. Beggs, B. Sikoparija, M. Smith // International Journal of Biometeorology. – 2017. – V. 61. – P. 51–58.

72) Blanco-Alegre, C. Towards a model of wet deposition of bioaerosols: The raindrop size role / C. Blanco-Alegre, A. Castro, A.I. Calvo, Fe. Oduber, D. Fernandez-Gonzalez, R. M. Valencia-Barrera, A. M. Vega-Maray, T. Molnar, R. Fraile // Science of The Total Environment. – 2021. – V. 767. – P. 145426.

73) Brackett, N.F. New Frontiers: Precise Editing of Allergen Genes Using CRISPR / N.F. Brackett, A. Pomes, M.D. Chapman // Frontiers in Allergy. – 2022. – V. 2. – P. 821107.

74) Brunet, Y. Short-Scale Transport of bioaerosols / Y. Brunet, N. Wery, A. Gales // Microbiology of aerosols. – 2017. – P. 137–154.

75) Burrows, S.M. Bacteria in the global atmosphere –part 2: modeling of emissions and transport be-tween different ecosystems / S.M. Burrows, T. Butler, P. Jöckelet, H. Tost, A. Kerkweg, U. Pöschl, M. G. Lawrence // Atmos. Chem. Phys. – 2009. – V. 9. – P. 9281–9297.

76) Buters, J.T.M. Pollen and spore monitoring in the world / J. T. M. Buters, C. Antunes, A. Galveias, K.C. Bergmann, M. Thibaudon, C. Galan, C. Schmidt-Weber, J. Oteros // Clinical and Translational Allergy. – 2018. – V. 8. – P. 9.

77) Carinanos, P. Comparison of two pollen counting methods of slides from a Hirst type volumetric trap / P. Carinanos, J. Emberlin, C. Galan, E. Dominguez-Vilches // Aerobiologia. – 2000. – V. 16. – P. 339–346.

78) Carvalho, E. Performance of the Coriolis air sampler, a high-volume aerosol-collection system for quantification of airborne spores and pollen grains / E. Carvalho, C. Sindt, A. Verdier, C. Galan, L. O'Donoghue, S. Parks, M. Thibaudon // Aerobiologia. – 2008. – V. 24. – P. 191–201.

79) Comtois, P. Pollen counts statistics and its relevance to precision / P. Comtois, P. Alcazar, D. Neron // Aerobiologia. – 1999. – V. 15. – P. 19–28.

80) Cristofori, A. The late flowering of invasive species contributes to the increase of Artemisia allergenic pollen in autumn: an analysis of 25 years of aerobiological data (1995–2019) in Trentino-Alto Adige (Northern Italy) / A. Cristofori, E. Bucher, M. Rossi, F. Cristofolini, V. Kofler, F. Prosser, E. Gottardini // Aerobiologia. – 2020. – V. 36. – P. 669–682.

81) Despres, V.R. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review / V. R. Despres, J.A. Huffman, S.M. Burrows, C. Hoose, A.S. Safatov, G. Buryak, J. Fröhlich-Nowoisky, W. Elbert, M.O. Andreae, U. Pöschl, R. Jaenicke // Tellus B. – 2012. – V. 64. – P. 15598.

82) Emerson, E. Revisiting particle dry deposition and its role in radiative effect estimates / E. Emerson, A. Hodshire. H. Debolt, K. Bilsback, J. Pierce, G. McMeeking, D. Farmer // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2020. – V. 117 (42). – P. 26076–26082.

83) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5. – Загл. с экрана. – (Дата обращения 20.05.2021).

84) European forest genetic resources programme [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.euforgen.org/ – Загл. с экрана. – (Дата обращения 20.05.2021).

85) Fang, Y. Airborne Pollen Concentration in Nanjing, Eastern China, and its Relationship With Meteorological Factors. Journal of Geophysical Research / Y. Fang, C. Ma, M. Bunting, A. Ding, H. Lu, W. Sun // Atmospheres. – 2018. – V. 123 (10). – P. 842–856.

86) Fang, Z.F. On the distribution and origin of Salix in the world / Z.F. Fang // Acta Phytotaxonomica Sinica. – 1987. – V.25. – P. 307–312.

87) Fernandez-Rodriguez, S. Identificationof potential sources of airborne Olea pollen in the Southwest IberianPeninsula / S. Fernandez-Rodriguez, C.A. Skjoth, R. Tormo-Molina, R. Brandao, E. Caeiro, I. Silva-Palacios, A. Gonzalo-Garijo, M. Smith // International Journal of Biometeorology. – 2014. – V. 58. – P. 337–348.

88) Festi, D. Linking pollen deposition and snow accumulation on the Alto dell'Ortles glacier (South Tyrol, Italy) for sub-seasonal dating of a firn temperate core / D. Festi, L. Carturan, W. Kofler, G. dalla Fontana, F. de Blasi, F. Cazorzi, E. Bucher, V. Mair, P. Gabrielli, K. Oeggl // Cryosphere. – 2017. – V. 11. – P. 937–948.

89) Fitter, A.H. Rapid changes in flowering time in British plants / A.H. Fitter, R.S.R. Fitter // Science. – 2002. – V. 296 (5573). – P. 1689–1691.

90) Frei, T. Trends in prevalence of allergic rhinitis and correlation with pollen counts in Switzerland / T. Frei, E. Gassner // International Journal of Biometeorology. – 2005. – V. 52(8). – P. 841–847.

91) Fröhlich-Nowoisky, J. Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions / J. Fröhlich-Nowoisky, C. Kampf, B. Weber // Atmospheric Research. – 2016. – V.182. – P. 346–376.

92) Galan, C. Heat requirement for the onset of the Olea europaea L. pollen season in several sites in Andalusia and the effect of the expected future climate change / C. Galan, H. Garcia-Mozo, L. Vazquez, L. Ruiz, C.D. de la Guardia, M.M. Trigo // International Journal of Biometeorology. – 2005. – V. 49 (3). – P. 184–188.

93) Garcia-Mozo, H. Poaceae pollen as the leading aeroallergen worldwide: A review / H. Garcia-Mozo // Allergy. – 2017. – V. 72 (12). – P. 1849–1858.

94) Ghimire, S. Linking the conventional and emerging detection techniques for ambient bioaerosols: a review / S. Ghimire, L. Tripathee, P. Chen, S. Kang // Reviews in Environmental Science and Biotechnology. – 2019. – V. 18. – P. 495–523.

95) Hernandez-Ceballos, M.A. Improvement in the accuracy of back trajectories using WRF to identify pollen sources in southern Iberian Peninsula / M.A. Hernández-Ceballos, C.A. Skjoth, H. Garcia-Mozo, J.P. Bolivar, C. Galan // International Journal of Biometeorology. – 2014. – V. 58 (10). – P.2031–2204.

96) Hofmann, F. Maize pollen deposition in relation to distance from the nearest pollen source under common cultivation - results of 10 years of monitoring (2001 to 2010) / F. Hofmann, M. Otto, W. Wosniok // Environmental Sciences Europe. – 2014. – V.26. – P. 1 – 24.

97) Hörandl, E. Weiden in Österreich und angrenzenden Gebieten / E. Hörandl, F. Florineth, F. Hadacek // Arbeitsbereich Ingenieurbiologieu. Landschaftsbau. Wien: Univ. Bodenkultur Wien, 2002. – 164 p.

98) Hu, W. Biological Aerosol Particles in Polluted Regions / W. Hu, Z. Wang, S. Huang // Curr Pollution Rep. – 2020. – V.6. – P. 65–89.

99) IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, et al. (eds.). — Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. – 2014. – 1454 p.

100) Isebrands, J.G. Poplars and willows: trees for society and the environment /J.G. Isebrands, J. Richardson. – Rome: FAO UN and CABI, 2014. – 699 p.

101) Jaafari, J. Associations between short term exposure to ambient particulate matter from dust storm and anthropogenic sources and inflammatory biomarkers in healthy young adults / J. Jaafari, K. Naddafi, M. Yunesian, R. Nabizadeh. // Science of the Total Environment. – 2021. – V 761 – P. 144503–144517.

102) Japan meteorological agency [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html – Загл. с экрана. – (Дата обращения 20.05.2021).

103) Jato, V. May the definition of pollen season influence aerobiological results? / V. Jato, F.J. Rodriguez-Rajo, P. Alcazar, P. de Nuntiis, C. Galan, P. Mandrioli // Aerobiologia. – 2022. – V. 22. – P. 13–25.

104) Jyethi, D. S. Air Quality: Global and Regional Emissions of Particulate Matter, SOx, and NOx / D. S. Jyethi // Book: Plant Responses to Air Pollution; [editor by U. Kulshrestha, P. Saxena]. – Singapore: Springer Science+Business Media, 2016. – P. 5–19.

105) Käpylä, M. An evaluation of the microscopical counting methods of the tape in Hirst-Burkard pollen and spore trap / M. Käpylä, A. Penttinen // Grana. – 1981. – V. 20. – P. 131–141.

106) Kasprzyk, I. The occurrence of Ambrosia pollen in Rzeszow, Krakow and Poznan, Poland: investigation of trends and possible transport of Ambrosia pollen from Ukraine / I. Kasprzyk, D. Myszkowska, L. Grewling, A. Stach, B. Sikoparija, C.A. Skjoth, M. Smith // International Journal of Biometeorology. – 2011. – V. 55 (4). – P. 633–644.

107) Kasprzyk, I. Alder pollen concentrations in the air during snowfall / I. Kasprzyk, K. Borycka // International Journal of Biometeorology. – 2019. – V. 63. – P. 1–8.

108) Kawecki, T.J. Conceptual issues in local adaptation / T.J. Kawecki, D. Ebert // Ecology Letters. – 2004. – V. 7 (12). – P. 1224–1241.

109) Kuryatnikova, N. Pollen in layers of seasonal snow in the South of Western Siberia / N. Kuryatnikova, N. Malygina, D. Pershin // Ukrainian Journal of Ecology. – 2021. – V. 11 (3). – 401–405.

110) Leuschner, R.M. Comparison between pollen counts at ground and at roof level in Basel (Switzerland) / R.M. Leuschner // Aerobiologia. – 1999. – V. 15. – P. 143–147.

111) Li, W. Overview of primary biological aerosol particles from a Chinese boreal forest: insight into morphology, size, and mixing state at microscopic scale / W. Li,

L. Liu, L. Xu, J. Zhang, Q. Yuan, X. Ding, W. Hu, P. Fu, D. Zhang // Science of The Total Environment. – 2020. – V. 719. – P. 137520.

112) Lindsley, W. G., B. J. Green, F. M. Blache re, S. B. Martin, B. Law, P. Jensen, and M. Schafer. 2017b. Sampling and characterization of bioaerosols. In Niosh manual of analytical methods. Cincinnati: National Institute for Occupational Safety and Health.

113) Linskens, H.F. Pollens transport in großen Hohen. Beobachtungen wahrend der Fahrt mit einem Gasballon / H.F. Linskens, W. Jorge // Allergologie. – 1986. – V. 9. – P. 55–58.

114) Liu, L. Ragweed pollen production and dispersion modelling within a regional climate system, calibration and application over Europe / L. Liu, F. Solmon, R. Vautard, L. Hamaoui-Laguel, C.Z. Torma, F. Giorgi // Biogeosciences. – 2016. – V. 13. – P. 2769–2786.

115) Malygina, N.S. Sources of Biological Aerosols in Winter Precipitation in the South of Western Siberia / N.S. Malygina, G.S. Zinchenko, N.A. Ryabchinskaya, E.Yu. Mitrofanova // Russian Meteorology and Hydrology. – 2018. – V. 43(4). – P. 264–270.

116) Monin, A.S. Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere / A.S. Monin, A.M. Obukhov // Trudy Geofizicheskogo Instituta Akademiya Nauk SSSR. – 1954. – № 151. – С. 163–187.

117) Myszkowska, D. Unusually high birch (Betula spp.) pollen concentrations in Poland in 2016 related to long-range transport (LRT) and the regional pollen occurrence / D. Myszkowska, K. Piotrowicz, M. Ziemianin, M. Bastl, U. Berger, A. Dahl, K. Dabrowska-Zapart, A. Gorecki, Laffersova, B. Majkowska-Wojciechowska, M. Malkiewicz, M. Nowak, M. Puc, O. Rybnicek, A. Saarto, I. Sauliene, J. Scevkova, A. Kofol Seliger, B. Sikoparija, K. Piotrowska-Weryszko, E. Czarnobilskaal // Aerobiologia. – 2021. – V. 37. – P. 543–559.

118) Nagarajan, S. Long-distance dispersion of the rust pathogens / S. Nagarajan, D.V. Sing // Annual review of phytopathology. – 1990. – V. 28. – P. 139–153.

119) Nakazawa, F. DNA analysis for section identification of individual Pinus pollen grains from Belukha glacier, Altai Mountains, Russia. Environmental Research Letters / F. Nakazawa, J. Uetake, Y. Suyama, R. Kaneko, N. Takeuchi, K. Fujita, H. Motoyama, S. Imura, H. Kanda // Environmental Research Letters. – 2013. – V. 8. – P. 014032.

120) Nakazawa, F. Species identification of Pinus pollen found in Belukha glacier, Russian Altai Mountains, Using a Whole-Genome Amplification Method /F. Nakazawa, Y. Suyama, S. Imura, H. Motoyama // Forests. – 2018. – V. 9. – P. 444.

121) Nakazawa, F. The alteration in the pollen concentration peak in a melting snow cover / F. Nakazawa, K. Suzuki // Bullettin of Glaciological Research. – 2007. – V. 25. – P. 1–7.

122) Nakazawa, F. Dating of seasonal snow/firn accumulation layers using pollenanalysis / F. Nakazawa, K. Fujita, N. Takeuchi, T. Fujiki, J. Uetake, V. Aizen, M. Nakawo // Journal of Glaciology. – 2005. – V. 51 (174). – P. 483–490.

123) National Centers for Environmental Information [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.ncei.noaa.gov/ – Загл. с экрана. – (Дата обращения 20.05.2021)

124) National Weather Service [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.weather.gov/. – Загл. с экрана. – (Дата обращения 20.05.2021).

125) Newnham, R.M. Pollen season and climate: is the timing of birch pollen release in the UK approaching its limit? / R.M. Newnham, T.H. Sparks, C.A. Skjoth, K. Head, B. Adams-Groom, M. Smith // International Journal of Biometeorology. – 2013. – V. 57 (3). – P. 391–400.

126) Nissanka, I. Parameterized Vertical Concentration Profiles for Aerosols in the Marine Atmospheric Boundary Layer / I. Nissanka, H. Park, L. Freire, M. Chamecki, J. Reid, D. Richter // Journal of Geophysical Research Atmospheres. – 2018. – V. 123. – P. 1–15.

127) Palynological Database [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.paldat.org/ – Загл. с экрана. – (Дата обращения 20.05.2021).

128) Papina, T. Biological proxies recorded in a Belukha ice core, Russian Altai / T. Papina, T. Blyakharchuk,A. Eichler, N. Malygina, E. Mitrofanova, M. Schwikowski // Climate of the Past Discussions. – 2013. – V. 9. – P. 2589–2627.

129) Papina, T.S. Isotopic composition and pollen spectra of precipitation and ice at the edge part of Korumdu Glacier (North Chu ridge, Altai Mountains) / T.S. Papina, N.S. Malygina, T.A. Blyakharchuk, G.I. Nenasheva, N.A. Ryabchinskaya, A.N. Eyrikh // Ice and Snow. – 2015. – V. 55 (1). – P. 40–48.

130) Physical sciences laboratory [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.esrl.noaa.gov/psd/data – Загл. с экрана. – (Дата обращения 20.05.2021).

131) Pollen atlas [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://pollenatlas.net/homepage. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 20.05.2021).

132) Polunin, N.V. Arctic aerobiology. Pollen grains and other spores observed on sticky slides exposed in 1947 / N.V. Polunin // Nature. – 1951. – V. 168(4278). – P. 718–721.

133) Pöschl, U. Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon / U. Pöschl, S.T. Martin, B. Sinha, Q. Chen, S.S. Gunthe, J.A. Huffman, S. Borrmann, D. K. Farmer, R.M. Garland, G. Helas, J.L. Jimenez, S.M. King, A. Manzi, E. Mikhailov, T. Pauliquevis, M.D. Petters, A.J. Prenni, P. Roldin, D. Rose, J. Schneider H. Su, S.R. Zorn, P. Artaxo, M.O. Andreae // Science. – 2010. – V. 329. – P. 1513–1516.

134) Rousseau, D.D. Long-distance pollen transport from North America to Greenland in spring / D.D. Rousseau, P. Schevin, J. Ferrier, D. Jolly, T. Andreasen, S.E. Ascanius, S.E. Hendriksen, U. Poulsen // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. – 2008. – V. 113. – G02013.

135) Ryabchinskaya, N. Identification sources of pollen spectra in dry and wet atmospheric deposition in the forest-steppe zone of Altai Krai (Russia) / N. Ryabchinskaya, G. Nenasheva, N. Malygina // Geophysical Research Abstracts. – 2015. – V. 17. – EGU2015-647-1.

136) Seinfeld, J. H. Atmospheric chemistry and physics. From Air Pollution to Climate Change / J.H. Seinfeld, S. H. Pandis. – New York: John Wiley& Sons Inc., 1998. – 1326 p.

137) Sikoparija, B. The effect of changes to the method of estimating the pollen count from aerobiological samples / B. Sikoparija, T. Pejak-Sikoparija, P. Radisic, M. Smith, C. Galan // Journal of Environmental Monitoring. – 2011. – V. 13. – P. 384–390.

138) Skjoth, C. A. The long-range transport of birch (Betula) pollen from Poland and Germany causes significant pre-season concentrations in Denmark / C.A. Skjoth, J. Sommer, A. Stach, M. Smith, J. Brandt // Clinical and Experimental Allergy. – 2021. – V. 37. – P. 1204–1212.

139) Skvortsov, A.K. Willows of Russia and adjacent countries. Taxonomical and Geographical Revision / A.K.Skvortsov // University of Joensuu Faculty of Mathematics and Natural Sciences Report. Biology. – 1999. – V.39(1). – P. 306.

140) Sofia, G. Climate change: consequences on the pollination of grasses in Perugia (Central Italy) A 33-year-long study / G. Sofia, T. Emma, T. Veronica, F. Giuseppe // International Journal of Biometeorology. – 2017. – V. 61 (1). – P. 149–158.

141) Sofiev, M. A Numerical Model of Birch Pollen Emission and Dispersion in the Atmosphere. Description of the Emission Module / M. Sofiev, P. Siljamo, H. Ranta, T. Linkosalo, S. Jaeger, A. Rasmussen, A. Rantio-Lehtimaki, E. Severova, J. Kukkonen // International Journal of Biometeorology. – 2013. – V. 57. – P. 45–58.

142) Steiner, A. L. Pollen as atmospheric cloud condensation nuclei / A.L. Steiner, S.D. Brooks, C. Deng, D.C.O. Thornton, M.W. Pendleton, V. Bryant // Geophysical Research Letters. – 2015. – V.42. – P. 3596–3602.

143) Stepalska, D. Co-occurrence of Artemisia and Ambrosia pollen seasons against the background of the synoptic situations in Poland / D. Stepalska, D. Myszkowska, P. Katarzyna, K. Piotrowicz, K. Borycka, K. Chlopek, I. Kasprzyk, B. Majkowska-Wojciechowska, M. Malkiewicz, M. Nowak, K. Piotrowska-Weryszko, M. Puc, E. Weryszko-Chmielewska // International Journal of Biometeorology. – 2017. – V. 61.–P. 747–760.

144) Swenson, S.J. Testing the effect of pollen exine rupture on metabarcoding with Illumina sequencing / S.J. Swenson, B. Gemeinholzer // PLoS ONE. – 2021. – V. 16. – P. e0245611.

145) Tackenberg, O. Modelling long-distance dispersal if plant diaspores by wind / O. Tackenberg // Ecological Monographs. – 2003. – V. 73. – P. 173–189.

146) Taylor, P.E. Thunderstorm asthma / P.E. Taylor, H. Jonsson // Current Allergy and Asthma Report – 2004. – V. 4. – P. 409413

147) Theuerkauf, M. Pollen productivity estimates stronglydepend on assumed pollen dispersal / M. Theuerkauf, A. Kuparinen, H. Joosten // Holocene. – 2013. – V.23. – P. 14–24.

148) Tignat-Perrier, R. Seasonal shift in airborne microbial communities / R. Tignat-Perrier, A. Dommergue, A. Thollot, O. Magand, P. Amato, M. Joly, K. Sellegri, T. Vogel, C. Larose // Science of The Total Environment. – 2020. – V. 716. – P. 137129.

149) Tormo, R., Phenological records as complement to aerobiological data / R. Tormo, I. Silva, A. Gonzalo, A. Moreno, R. Perez, S. Fernandez // International Journal of Biometeorology. – 2010. – V.55. – P. 51–65.

150) Velasco-Jimenez, M.J. Comparative study of airborne pollen counts located in different areas of the city of Cordoba (south-western Spain) / M.J. Velasco-Jimenez, P. Alcazar, E. Domınguez-Vilches, C. Galan // Aerobiologia. – 2013. – V. 29 (1). – P. 113–120.

151) Walther, G.R. Ecological responses to recent climate change / G.R. Walther, E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T.J.C. Beebee, J.M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg, F. Bairlein // Nature. – 2002. – V. 416 (6879). – P. 389–395.

152) WHO. World health statistics 2003. – World Health Organization, 2003 –173 p.

153) WHO. World health statistics 2015. – World Health Organization, 2015 –250 p.

154) Williams, C.G. Northern Hemisphere forests are substantial pollen contributors to atmospheric bioaerosols / C.G. Williams, V.R. Despres // Forest Ecology and Management. – 2017. – V. 401. – P. 187–191.

155) Wright, S.J. Understanding strategies for seed dispersal by wind under contrasting atmospheric conditions / S.J. Wright, A. Trakhtenbrot, G. Bohrer, M. Detto, G.G. Katul, N. Horvitz, H.C. Muller-Landau, F.A. Jones, R. Nathan // PNAS. – 2008. – V. 105(49). – P. 19084–19089.

156) Zhang, J. Sperm cells are passive cargo of the pollen tube in plant fertilization / J. Zhang, Q. Huang, S. Zhong, A. Bleckmann, J. Huang, X. Guo, Q. Lin, H. Gu, J. Dong, T. Dresselhaus, L.J. Qu // Nature Plants. – 2017. – V. 3. – P. 1–5.

157) Zhang, R. Development of a regional-scale pollen emission and transport modeling framework for investigating the impact of climate change on allergic airway disease / R. Zhang, T. Duhl, M.T. Salam, J.M. House, R.C. Flagan, E.L. Avol, F.D. Gilliland, A. Guenther, S.H. Chung, B.K. Lamb, T.M. VanReken // Biogeosciences. – 2014. – V. 11. – P. 1461–1478.