

УДК 551.510.41

Динамика фракционного распределения аэрозолей в приземном воздухе бореальной зоны Западной Сибири (по наблюдениям в обсерватории «Фоновая»).

Часть 1. Сравнение периодов летней вегетации и зимнего покоя древесных растений

М.П. Тентюков^{✉ 1,2}, Д.А. Тимушев³, Д.В. Симоненков¹, Б.Д. Белан¹,
К.А. Шукуров⁴, А.В. Козлов^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина
167001, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., 55

³Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
167000, г. Сыктывкар, ул. Оплеснина, 4

⁴Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

Поступила в редакцию 07.05.2024;
после доработки 13.09.2024;
принята к печати 10.10.2024

Представлены результаты сравнительной характеристики фракционного состава приземного аэрозоля в период летней вегетации и зимнего покоя древесных растений бореальной зоны Западной Сибири. Приведена статистика распределения аэрозольных частиц по размерам во время летней вегетации и зимнего покоя древесных растений на обсерватории «Фоновая» СО РАН (Томская область) в период с 01.07.2022 г. по 30.06.2023 г. Анализ соотношений аэрозольных фракций выявил парадоксальную ситуацию: счетная концентрация аэрозольных частиц диаметром 0,3–2,0 мкм оказалась существенно выше зимой, чем летом. Предложена феноменологическая модель, описывающая данный эффект как проявление сил радиометрической природы.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, бореальные леса, время жизни аэрозоля, хвойные деревья, листопадные деревья, полог леса, радиометрический фотофорез, устойчивость аэрозоля; atmospheric aerosol, boreal forest, aerosol lifetime, coniferous, radiometric photophoresis, deciduous, forest canopy, aerosol stability.

Введение

В настоящее время активно ведутся исследования влияния механизма обратной связи в системе «лес–аэрозоли–климат» в рамках гипотезы, впервые высказанной в работе [1]. Согласно данной гипотезе глобальное повышение температуры воздуха и концентрации CO₂ в атмосфере влекут за собой усиление активности фотосинтеза и увеличение биомассы растительных организмов. Отмечается, что в бореальных лесах это должно привести

к росту эмиссии неметановых биогенных летучих вторичных органических аэрозолей [2]. Однако ферменты, осуществляющие фотосинтез, работают эффективно только в теплый период года. При этом исследователи упускают из виду такой важный дополнительный источник вторичных аэрозолей, как продукты метаболических реакций, синтезируемые некоторыми растительными организмами в зимний период [3]. К ним относятся хвойные растения, занимающие около 80% площади бореальных лесов России [4], а также эпифитные лишайники.

В настоящее время приходит понимание, что и сами лишайники могут влиять на химический состав атмосферы. Так, летучие органические соединения (экзометаболиты), выделяемые лишайниками во внешнюю среду, обладают высокой химической активностью [5]. Попадая во внешнюю среду,

* Михаил Пантелеймонович Тентюков (mpt@iao.ru);
Дмитрий Анатольевич Тимушев (timushev@gmail.com);
Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Борис
Денисович Белан (bld@iao.ru); Карим Абдухакимович
Шукуров (karim.shukurov@ifaran.ru); Артем Владимирович
Козлов (artem@iao.ru).

они способствуют формированию вторичных органических аэрозолей и их росту [5, 6]. В связи с этим отметим, что влияние экзометаболитов хвойных растений и эпифитных лишайников на распределение приземного аэрозоля по размерам в период зимнего покоя растений на данный момент мало изучено.

Цель работы — исследовать особенности динамики распределения счетной концентрации приземного аэрозоля в разные фазы вегетативного развития листопадных и хвойных деревьев.

Материалы и методы

Методика измерения счетной концентрации аэрозолей

Для непрерывных измерений распределения аэрозольных частиц по размерам использовался аэрозольный спектрометр Grimm 1.108 [7], установленный в обсерватории «Фоновая» (ИОА СО РАН, Томск). Измерения счетной концентрации аэрозолей (N , дм^{-3}) в диапазоне диаметров (d) от 0,3 до 20 $\mu\text{м}$ в 15 интервалах производились ежедневно в течение 10 мин с предварительной 3-минутной продувкой изокINETически из воздушного потока аэродинамической трубы с высоты 4,9 м.

Статистическая оценка временной динамики фракционного спектра приземного аэрозоля

Статистические параметры распределения размерных фракций приземного аэрозоля рассчитывались по выборке, составленной на основе непрерывного ряда измерений в пределах временного интервала от 01.07.2022 г. до 30.06.2023 г. Эта выборка охватывает всю фазу зимнего покоя растений зимой 2022/23 г.; ее объем составил 8760 почасовых наблюдений. Для работы с выборкой, а также оценки связи спектра размеров приземного аэрозоля с метеорологическими данными была написана сервисная программа.

Обоснование выбора температурных пределов фотосинтеза

При температурах от 0 до +10 °C ферменты, осуществляющие фотосинтез, работают неэффективно, и это снижает скорость фотосинтеза. При этом температурные пределы, в которых возможен фотосинтез, различны для растений разных климатических зон. Так, минимальная температура для фотосинтеза растений умеренной и средней полосы ~0 °C, тогда как для тропических растений она составляет +5...+10 °C. Поэтому в рамках данной работы временные пределы теплого и холодного периодов в жизненном цикле растений привязаны к датам с определенной температурной отметкой. Начало теплого периода фотосинтеза для района исследований отсчитывалось с даты установления среднесуточной температуры выше 0 °C, а его окончание — ниже 0 °C. Начало холодного определяли

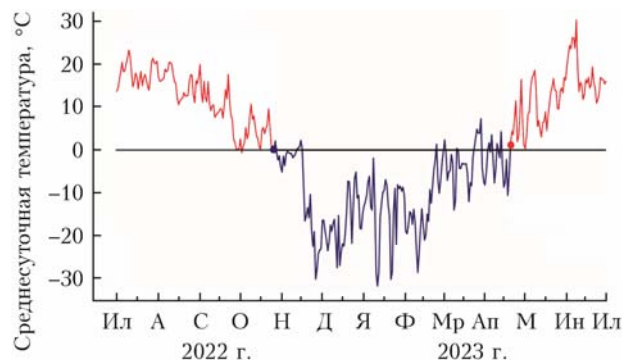


Рис. 1. Временной интервал теплого (серая кривая) периода фотосинтеза с отметкой его начала 20.04.2023 г. и холодного (черная кривая) с отметкой его начала 26.10.2022 г.; здесь и далее Я — январь, Ф — февраль, Мр — март, Ап — апрель, М — май, Ин — июнь, Ил — июль, А — август, С — сентябрь (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.12>)

с даты установления среднесуточных температур ниже 0 °C, а его окончание — когда среднесуточная температура устойчиво выше 0 °C (рис. 1).

Статистическая обработка

При работе с выборками использовали медиану, удобство которой заключается в том, что она мало чувствительна к попаданию в выборку отдельных экстремальных значений. Медиана является асимптотически нормальной случайной величиной и описывается функцией распределения Вейбула [8]. Указанная функция лучше характеризует данные, для которых трудно предположить наличие нормального, логарифмически нормального, или какого-либо другого закона распределения. Медиану можно применять, даже если в исследуемой совокупности содержится некоторое количество «нулевых» проб (до 25%).

Медиана устойчивее среднего арифметического в условиях эксцессивных (островершинных) распределений и, главное, не зависит от закона распределения случайной величины, поскольку ее положение не изменяется при любых вычислительных преобразованиях изучаемого параметра. Последнее весьма важно в нашей ситуации, когда заведомо нельзя предположить единый тип распределения частиц для каждой размерной фракции аэрозолей. Для визуализации сезонной динамики распределения фракций приземного аэрозоля использовались столбчатые и линейные диаграммы. Первые строились по медианным значениям, вторые — с использованием плавающего среднего. Последнее позволило сгладить резкие пики и выявить общие тенденции в сезонной динамике распределения аэрозольных частиц по размерным фракциям.

Траекторный анализ переноса воздушных масс

Над точкой наблюдения он осуществлялся с использованием семисуточных обратных траекторий,

рассчитанных по уточненной методике [9] с помощью траекторной модели NOAAHYSPPLIT_4 [10] и на основе сеточного архива метеоданных NCEP GFS1p0 с разрешением 1° по долготе и широте. При расчете учитывались только те участки траекторий переноса воздушных масс, которые (участки) попадали в региональный атмосферный пограничный слой (АПС) до их прибытия к нижней тропосфере над обсерваторией «Фоновая». Иными словами, если участок траектории в том или ином регионе располагался выше АПС, то в расчете вероятности переноса он не участвовал. Расчет осуществлялся для всех уровней над поверхностью от 100 до 2100 м с шагом 100 м для нижней тропосферы. Обратные траектории стартовали в обратном модельном времени (финишировали в реальном времени) на указанных уровнях во все часы (00:00 UTC, 01:00 UTC и т.д.) в период с 01.07.2022 г. по 30.06.2023 г. По полученному массиву обратных траекторий с использованием методики [11] рассчитывались поля среднемесячной вероятности переноса воздушных частиц в региональном АПС, которые позволяют судить о потен-

циальных источниках аэрозоля для нижней тропосферы над стационаром «Фоновая».

Результаты и обсуждение

Сравнительный анализ соотношения фракций приземного аэрозоля в теплый и холодный периоды фотосинтеза

Результаты статистической обработки выборки приведены в табл. 1. Обращает на себя внимание сильный разброс значений коэффициента вариации для аэрозольных частиц с d от 0,3 до 3,0 мкм. Для теплого периода коэффициенты вариации колеблются от 118 до 214%, тогда как для холодного — 93–124%. Такие значения для холодного периода — результат отсутствия выбросов биогенных летучих вторичных органических аэрозолей, связанных с листопадными деревьями. В то же время относительно резкое увеличение коэффициента вариации для аэрозольных частиц с $d > 3,0$ мкм связано с зимним влиянием локальных источников [12].

Если сравнить средние значения счетной концентрации приземного аэрозоля (рис. 2), то можно

Таблица 1

Статистические параметры фракционного состава приземного аэрозоля по размерам в теплый и холодный периоды фотосинтеза

Параметр	d , мкм														
	0,3–0,4	0,4–0,5	0,5–0,65	0,65–0,8	0,8–1,0	1,0–1,6	1,6–2,0	2,0–3,0	3,0–4,0	4,0–5,0	5,0–7,5	7,5–10,0	10,0–15,0	15,0–20,0	> 20,0
<i>Теплый период фотосинтеза (01.07–25.10.2022 г. + 20.04–30.06.2023 г.)</i>															
n_0	4467	4467	4467	4467	4467	4467	4457	4467	4467	4467	4467	4467	4467	4467	4467
$\bar{x}$	30488	7074	1620	326	158	60	43	25	6	3	1	0	0	0	0
δ	49352,5	11966,2	3177,5	698,7	304,5	96,1	50,8	30,9	9,6	5,1	2,8	0,6	0,2	0,1	0,0
min	365	65	17	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q_1	7114	1410,5	321,5	72	40	19	19	9	1	0	0	0	0	0	0
Me	14841	3219	708	143	73	31	30	16	3	1	1	0	0	0	0
Q_3	30487,5	6881	1618,5	326	160	64	51	31	7	3	1	0	0	0	0
max	640730	227244	107333	27885	10036	2790	1066	622	185	67	31	11	4	1	2
v	162	169	196	214	193	161	118	124	162	173	189	—	—	—	—
n_1	2296	2269	2211	27885	2122	2071	2065	1963	1472	1157	849	269	78	14	1
n_2	51,4	50,7	49,5	624,2	47,5	46,3	46,3	43,9	32,9	25,9	19,0	6,0	1,7	0,3	0,02
<i>Холодный период фотосинтеза (26.10.2022–19.04.2023 г.)</i>															
n_0	4218	4218	4218	4218	4218	4218	4218	4218	4218	4218	4218	4218	4218	4218	4218
$\bar{x}$	33011	10369	3341	726	311	91	45	16	2	1	0	0,06	0,03	0,01	0
δ	37500,0	12733,4	4141,6	837,4	319,3	84,8	42,4	17,8	3,6	1,4	0,9	0,29	0,2	0,09	0,04
min	303	63	27	9	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Q_1	10307,75	2711,25	925	237	114	34	18	4	0	0	0	0	0	0	0
Me	21401,5	6058,5	1956	456,5	209,5	65	33	10	1	0	0	0	0	0	0
Q_3	43092,25	13506,75	4423	961	408	124	62	21	3	1	1	0	0	0	0
max	467922	157395	58617	11551	3994	714	375	225	41	15	11	4	3	2	1
v	114	123	124	115	103	93	94	114	154	161	221	—	—	—	—
n_1	2057	2031	2054	2035	2018	1965	1937	1707	972	707	467	136	76	29	8
n_2	48,7	48,1	48,7	48,2	47,8	46,5	45,9	40,4	23,0	16,7	11,0	3,2	1,8	0,6	0,1

Примечание. n_0 — объем выборки; $\bar{x}$ — среднее арифметическое счетной концентрации, дм^{-3} ; δ — стандартное отклонение, дм^{-3} ; min — минимальное значение, дм^{-3} ; Q_1 — первый квартиль, дм^{-3} ; Me — медиана, дм^{-3} ; Q_3 — третий квартиль, дм^{-3} ; max — максимальное значение, дм^{-3} ; v — коэффициент вариации, %; n_1 — количество ненулевых наблюдений; n_2 — доля ненулевых наблюдений, %.

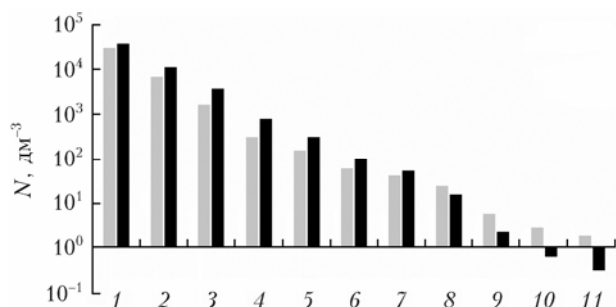


Рис. 2. Соотношение счетной концентрации приземного аэрозоля в теплый (серый) и холодный (черный) периоды фотосинтеза между отдельными фракциями приземного аэрозоля: 1 – $d = 0,3–0,4$; 2 – $0,4–0,5$; 3 – $0,5–0,65$; 4 – $0,65–0,8$; 5 – $0,8–1,0$; 6 – $1,0–1,6$; 7 – $1,6–2,0$; 8 – $2,0–3,0$; 9 – $3,0–4,0$; 10 – $4,0–5,0$; 11 – $5,0–7,5$ мкм

заметить, что для теплого периода фотосинтеза они парадоксально ниже, чем для зимнего. И это несмотря на то, что в летнем пологе леса совокупная площадь листовой поверхности листопадных и хвойных деревьев несравнимо выше, чем в зимнем. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что время жизни летнего аэрозоля короче, чем зимнего.

Аэрозоли могут выпадать на поверхность земли в результате турбулентной и гравитационной седиментации, а также вследствие вымывания осадками (влажное осаждение). Однако если рассматривать скорость осаждения аэрозольной частицы как функцию диаметра частицы, то для частиц малых размеров (с d от 0,01 до 10,0 мкм) механизм седиментации определяется преимущественно турбулентной диффузией [13]. Если же диаметр частицы $> 10,0$ мкм, то гравитационная седиментация начинает играть более важную роль. Однако зимнее увеличение счетной концентрации в размерном интервале фракций $d = 0,3–0,4…1,6–2,0$ мкм дает основание полагать, что зимой проявление этих двух механизмов осложняется влиянием радиометрического фотофореза.

Снежный покров в любых условиях, даже при самой низкой температуре, излучает собственное тепло в виде длинноволновой радиации и обладает высокой способностью отражать солнечную радиацию. В поле уходящего от снежной поверхности инфракрасного излучения могут возникать положительный, так называемый снеговой, фотофорез [3] и связанные с ним субвертикальные движения аэрозолей против силы тяжести (фотофоретическая левитация [14]). Очевидно, что снеговой фотофорез может являться существенным сезонным фактором вертикального переноса аэрозолей в поле инфракрасного излучения, формирующегося над снежным покровом. Поэтому наблюдаемый парадоксальный эффект зимнего увеличения счетной концентрации аэрозолей мелких фракций – результат снегового фотофореза, когда турбулентная седиментация мелкого аэрозоля в приземном слое воздуха уже неэффективна, а гравитационная – еще неэффективна. В результате возникает диффузионно-гравитационное равновесие, при котором частицы в поле уходящего от снежного покрова

инфракрасного излучения зависают над снежной поверхностью (левитируют). Это увеличивает время жизни аэрозоля в зимнем пологе леса и ведет к росту счетной концентрации аэрозольных частиц определенных размеров, в нашем случае это фракции $d = 0,3–0,4…1,6–2,0$ мкм.

Особенности динамики фракционного состава приземного аэрозоля в период летней вегетации и зимнего покоя древесных растений

Суточную и сезонную динамику фракционного спектра приземного аэрозоля оценивали на основе непрерывного ряда измерений в пределах временного интервала от 01.07.2022 г. до 30.06.2023 г. Для графического представления результатов непрерывных измерений распределения аэрозолей в определенные периоды разработана сервисная программа, с помощью которой в рамках настоящей работы визуализированы особенности динамики распределения аэрозольных фракций в различные фазы вегетации листопадных и хвойных растений (рис. 3). Для того чтобы в одном ряду отобразить одновременно всю динамику размерных фракций аэрозолей в выбранном временном интервале, диапазон вертикальной шкалы месячных диаграмм определяли по максимальной и минимальной медианным величинам счетной концентрации аэрозолей, зафиксированной для каждого диапазона размеров.

Как следует из рис. 3, в декабре, январе и феврале в приземной атмосфере доминируют частицы с $d = 0,3–4,0$ мкм. С началом сокодвижения и набухания почек у листопадных растений концентрация мелких частиц с $d = 0,3–0,65$ мкм практически не определяется. Однако уже после распускания листьев на деревьях и до полного их облиствления (мая по июнь) в приземной атмосфере фиксируется практически весь диапазон регистрируемых частиц. Затем в середине лета (июль) в фазу цветения и завязки плодов фиксируется «исчезновение» мелкой ($d = 0,3–1,6$ мкм) и крупной ($d \geq 4,0–7,5$ мкм) фракций при доминировании средней ($d = 1,6–4,0$ мкм). С наступлением фазы плодоношения (август) соотношение фракций вновь претерпевает изменения: в приземной атмосфере устойчиво фиксируются мелкая и средняя фракции, тогда как крупная практически не заметна.

В фазу расцвечивания и опадания листьев (сентябрь) явно доминируют частицы диаметром от 1,6 до 7,5 мкм. Переходный период к зимнему покою растений занимает два месяца (октябрь, ноябрь). В это время фиксируются минимальная счетная концентрация приземного аэрозоля во всех размерных интервалах. Но затем наблюдается зимний рост эмиссий хвойных деревьев и эпифитных лишайников, который сильно затушевывался в теплый период фотосинтеза не столько выбросами листопадных деревьев, сколько за счет укрупнения аэрозольных частиц в результате летней активизации турбулентности в пологе леса.

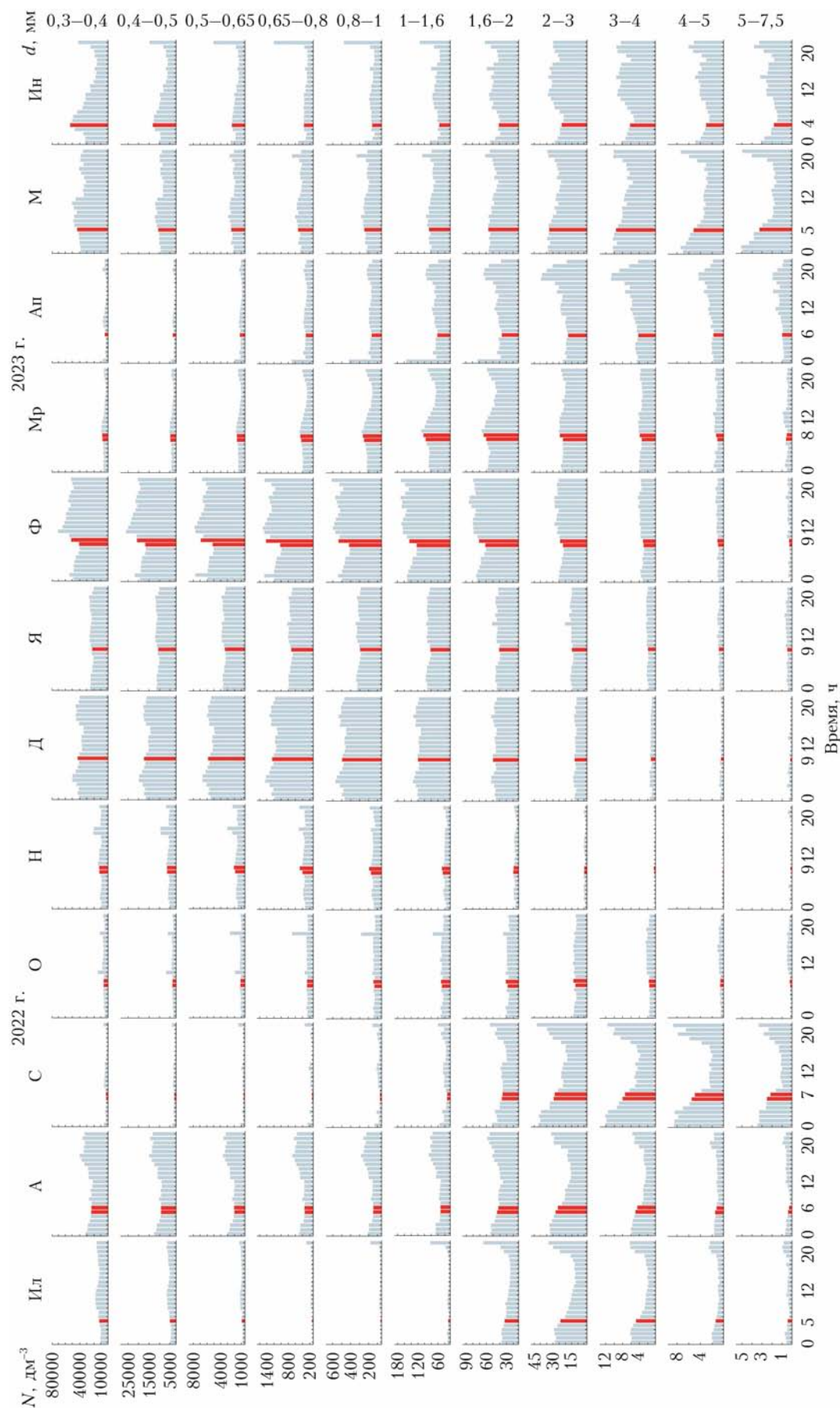


Рис. 3. Суточная динамика счетной концентрации фракций приземного аэрозоля (полужирным выделены утренние значения)

Таким образом, использованный графический прием визуализации результатов статистического анализа временной эволюции счетного распределения аэрозолей в сопряжении с фенологическими фазами позволяет по-новому оценить возможный вклад древесных растений в аэрозольный климат на региональном уровне.

Корреляционная связь между метеопараметрами и счетной концентрацией размерных фракций приземного аэрозоля

Для выявления характера связи между метеопараметрами и счетной концентрацией размерных фракций приземного аэрозоля был выполнен корреляционный анализ. По его результатам выделены две группы частиц ($d = 0,3-2,0$ и $2-7,5$ мкм соответственно). Есть слабая отрицательная корреляция температур с фракциями 1-й группы; для 2-й группы она положительна (табл. 2).

Однако не стоит понимать эти корреляции, как уменьшение концентрации мелких фракций аэрозоля и рост содержания больших частиц с уменьшением температуры. Коэффициент корреляции у 1-й группы становится отрицательным лишь с учетом данных за конец ноября и декабрь (если эти месяцы убрать, то коэффициент положителен, как и у 2-й группы). Возможно, в этот период объем выбросов 1-й группы увеличился по иным причинам, но температура в конце ноября–декабре понижается и в результате мы видим отрицательную корреляцию. Если это принять, то наличие отрицательной связи между температурой и ростом крупных размерных фракций косвенно свидетельствует об увеличении продолжительности жизни аэрозолей в период зимнего покоя растений. В итоге растет число крупных аэрозолей в каждом размерном диапазоне диаметров частиц. Это очень похоже на эффект домино, когда волна укрупнения (коагуляции) частиц переходит из одного размерного диапазона в соседний.

Аэрозольные эффекты при дальнем и региональном переносах: аномальность аэрозольного поля

Для оценки соотношений концентраций фракций аэрозоля были рассчитаны коэффициенты корреляции (табл. 3). Анализируя таблицу, можно заметить, что по взаимной корреляции размерные фракции делятся на два блока. Первый образуют частицы с $d = 0,3-0,4$; $0,4-0,5$; $0,5-0,65$; $0,65-0,8$; $0,8-1,0$; $1,0-1,6$ и $1,6-2,0$ мкм, а второй — с $d = 2,0-3,0$; $3,0-4,0$; $4,0-5,0$ и $5,0-7,5$ мкм. При этом внутри этих блоков наблюдается высокая положительная взаимная корреляция (выделено в табл. 3 полужирным).

Проверка наличия связи счетных концентраций аэрозолей разных размеров с метеопараметрами с помощью модели множественной регрессии (зависимость концентрации каждой фракции от всех погодных переменных сразу) была безрезультатна — коэффициенты детерминации были низкими. Включение в расчеты погодных параметров с лагом (задержкой) также не выявило значимых корреляций. Но при этом выявилось одно странное обстоятельство: в итоговых данных обнаружилось довольно много значительных скачков счетной концентрации приземного аэрозоля. На рис. 4 (цв. вкладка) эти скачки показаны в виде пиков с отметками выше линии, представленной скользящим средним. Данные пики не связаны с погодными условиями, но при этом вносят довольно существенный вклад в статистику. Какая-то временная периодичность в них отсутствует. Однако если рассматривать выявленное обстоятельство в сопряжении с динамикой распределения аэрозольных фракций в различные фенологические фазы, то увеличение счетной концентрации крупных аэрозолей идет за счет агрегирования мелких частиц, рост концентрации которых, в свою очередь, обусловлен их избыточной генерацией в ходе фотосинтеза в теплый период.

Таблица 2

Корреляции погодных переменных со счетными концентрациями аэрозолей различных размерных фракций

Метео- параметр	d , мкм										
	1-я группа							2-я группа			
	0,3–0,4	0,4–0,5	0,5–0,65	0,65–0,8	0,8–1,0	1,0–1,6	1,6–2,0	2,0–3,0	3,0–4,0	4,0–5,0	5,0–7,5
T	–0,13	–0,20	–0,35	–0,42	–0,41	–0,27	0,12	0,51	0,49	0,34	0,31
$T_{\min}$	–0,15	–0,21	–0,35	–0,43	–0,42	–0,29	0,07	0,45	0,42	0,28	0,25
$T_{\max}$	–0,10	–0,17	–0,31	–0,39	–0,37	–0,23	0,17	0,56	0,53	0,38	0,36
P_0	0,12	0,16	0,27	0,32	0,30	0,19	–0,06	–0,31	–0,28	–0,10	–0,12
P	0,12	0,17	0,28	0,33	0,31	0,19	–0,07	–0,33	–0,29	–0,12	–0,13
U	0,05	0,06	0,05	0,03	0	–0,06	–0,21	–0,35	–0,37	–0,32	–0,36
VV	0,01	–0,01	–0,05	–0,08	–0,09	–0,05	0,11	0,29	0,30	0,26	0,23
T_d	–0,13	–0,19	–0,34	–0,42	–0,41	–0,28	0,09	0,46	0,43	0,28	0,25
RRR	–0,06	–0,06	–0,08	–0,09	–0,08	–0,06	–0,02	0,01	–0,03	–0,08	–0,09
sss	0,27	0,33	0,45	0,52	0,51	0,43	0,15	–0,24	–0,29	–0,23	–0,22

Примечание. Метеоданные импортированы с сайта https://rp5.ru/Погода_в_Кожевниково,_Томская_область. T — температура; P_0 — атмосферное давление на уровне станции; P — атмосферное давление, приведенное к среднему уровню моря; U — относительная влажность; VV — горизонтальная дальность видимости; T_d — температура точки росы; RRR — количество выпавших осадков; sss — высота снежного покрова.

Таблица 3

Корреляция между счетными концентрациями различных размерных фракций аэрозолей

d, мкм	0,3–0,4	0,4–0,5	0,5–0,65	0,65–0,8	0,8–1,0	1,0–1,6	1,6–2,0	2,0–3,0	3,0–4,0	4,0–5,0	5,0–7,5
0,3–0,4	1										
0,4–0,5	0,99	1									
0,5–0,65	0,94	0,97	1								
0,65–0,8	0,89	0,92	0,98	1							
0,8–1,0	0,87	0,90	0,96	0,99	1						
1,0–1,6	0,85	0,86	0,91	0,94	0,97	1					
1,6–2,0	0,73	0,71	0,70	0,71	0,76	0,88	1				
2,0–3,0	0,29	0,24	0,18	0,16	0,21	0,40	0,76	1			
3,0–4,0	0,09	0,04	–0,01	–0,02	0,03	0,20	0,58	0,94	1		
4,0–5,0	–0,02	–0,05	–0,07	–0,06	–0,03	0,08	0,38	0,72	0,86	1	
5,0–7,5	–0,01	–0,04	–0,06	–0,05	–0,02	0,11	0,41	0,76	0,90	0,97	1

Зимой же участие листопадных деревьев в генерации вторичных органических аэрозолей отсутствует, поэтому вклад биогенных летучих вторичных органических аэрозолей в зимнее аэрозольное поле над обсерваторией «Фоновая» полностью контролируется хвойными деревьями и эпифитными лишайниками. На этом фоне зимние и осенние всплески избыточной концентрации аэрозолей могут происходить за счет как локальных источников [12], так и дальнего переноса.

В холодный сезон (октябрь – март) вероятность переноса воздушных масс из засушливого пояса к югу от России в границах 40–50° с.ш., 50–80° в.д. (Казахстан и север Арало-Каспийского аридного региона) значительно выше, чем в теплый сезон (апрель – сентябрь) (рис. 5, цв. вкладка) [9, 15]. Следовательно, полностью исключать влияние минерального аэрозоля нельзя, несмотря на то что по данным спутниковых измерений (Aqua-AMSR) в 2022–2023 гг. в холодный период в указанном засушливом регионе увлажненность почвы была значительно выше, чем в теплый сезон (рис. 6).

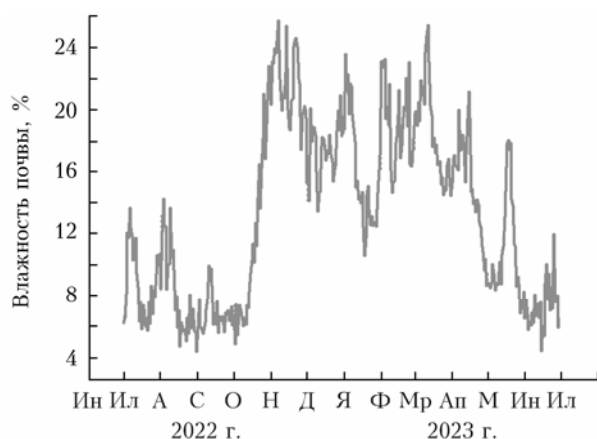


Рис. 6. Вариации суточной влажности почвы в период с 01.07.2022 г. по 30.06.2023 г. в границах 40–50° с.ш., 50–80° в.д. (засушливый пояс к югу от России) по данным спутникового зондирования (Aqua-AMSR)

Надо заметить, что высокая повторяемость дальних переходов из Арало-Каспийского региона дает основание рассматривать его в качестве основного внесезонного источника привноса мелкой

фракции аэрозолей, поскольку в условиях пустыни аэрозоль постоянно генерируется подстилающей поверхностью и распространяется конвективными и вихревыми потоками в АПС и в дальнейшем с высокой вероятностью в тропосферу [16, 17]. Такое внесезонное влияние Арало-Каспийского региона затушевывает колебания фракционного состава частиц в аэрозольном поле над обсерваторией «Фоновая» в период как летней вегетации (в меньшей степени), так и зимнего покоя древесных растений (в высокой степени). Однако более точная оценка влияния древесной растительности на соотношение долей минерального и органического аэрозолей может быть получена по итогам анализа химического состава проб аэрозоля различных фракций.

Отдельного объяснения требуют весенне-летние аномальные увеличения счетной концентрации аэрозольных фракций 0,3–0,4...1,6–2,0 мкм (см. рис. 3). Развитие турбулентности в приземном слое воздуха определяется градиентом и суточным ходом температуры в деятельном слое. В лесу же роль деятельной поверхности переходит к кронам. В ясную погоду поверхность крон сильно нагревается за счет притока солнечной радиации. При этом нагрев лесной растительности из-за неоднородного распределения солнечной радиации и температур в пологе леса будет меняться на разных уровнях древостоя [18]. Поэтому такое распределение температур создает благоприятные условия для развития конвекции и турбулентности в кронах деревьев. Это должно приводить к увеличению скорости турбулентного осаждения аэрозолей и уменьшению их счетной концентрации в приземном слое воздуха. Однако в отмеченных случаях наблюдается обратная картина. Предполагается, что данное обстоятельство вызвано действием сил радиометрической природы, препятствующих турбулентному осаждению аэрозолей и инициирующих субвертикальные движения аэрозолей против силы тяжести (фотофоретическая левитация [14, 19, 20]). При этом наличие температурной и радиационной стратификации в пологе летнего леса может выступать своеобразным триггером, запускающим процессы радиометрического фотофореза, проявлением которого могут служить летние аномальные всплески счетной концентрации аэрозолей. Зимой же рост счетной концентрации мелкого аэрозоля обусловлен действием сил

радиометрической природы, инициированных физическими свойствами снежного покрова. Они возникают тогда, когда турбулентная седиментация аэрозолей оказывается уже неэффективной, а гравитационная еще неэффективна. Другими словами, возникает диффузионно-гравитационное равновесие, при котором частицы в поле уходящего от снежного покрова инфракрасного излучения зависают (левитируют) над ним. Это увеличивает время жизни мелких фракций аэрозоля (в нашем случае это частицы в размерном интервале $d = 0,3\text{--}2,0$ мкм), что ведет к росту их счетной концентрации в приземном слое воздуха.

Заключение

Сравнение результатов непрерывных измерений счетного распределения приземного аэрозоля во время летней вегетации (теплый период фотосинтеза) и зимнего покоя (холодный период фотосинтеза) древесных растений в широком диапазоне размеров частиц на обсерватории «Фоновая» СО РАН (Томская область) в период с 01.07.2022 г. по 30.06.2023 г. выявило парадоксальную ситуацию, когда счетная концентрация аэрозольных частиц в интервале диаметров $0,3\text{--}2,0$ мкм оказалась существенно выше зимой, чем летом. Доказывается, что выявленный феномен обусловлен действием сил радиометрической природы, в частности снеговым фотофорезом. Эти силы могут конкурировать с действием сил гравитации, обеспечивая тем самым условия для левитации частиц над снежной поверхностью в приземном слое воздуха, увеличивая время пребывания и рост счетной концентрации частиц с $d = 0,3\text{--}2,0$ мкм. Очевидно, что это будет влиять на радиационный баланс зимней атмосферы, и поэтому вертикальные движения частиц под действием фотофоретических сил должны учитываться при построении транспортных моделей вертикального переноса аэрозолей в нижней тропосфере. Кроме того, радиометрический фотофорез, наряду с дальним переносом примесей в составе влагонесущих воздушных масс, может обоснованно рассматриваться как один из потенциально значимых механизмов вертикального переноса аэрозолей в приземной атмосфере при формировании зимнего аэрозольного поля над обсерваторией «Фоновая».

Финансирование. Исследование проводилось в рамках госзадания ИОА СО РАН. Траекторный анализ выполнен при финансовой поддержке РЦНИ и ННФИ (проект № 20-55-56028).

Список литературы

1. Kulmala M., Suni T., Lehtinen K.E.J., Dal Maso M., Boy M., Reissell A., Rannik Ü., Aalto P., Keronen P., Hakola H., Bäck J., Hoffmann T., Vesala T., Hari P. A new feedback mechanism linking forests, aerosols, and climate // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4, N 2. P. 557.
2. Kulmala M., Riipinen I., Kerminen V.-M. Aerosols and climate change // *From the Earth's Core to Outer Space* / I. Naapala (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. P. 219–226.
3. Тентюков М.П., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Михайлов В.И. Формирование вторичных органических аэрозолей на поверхности хвои и их поступление в полог зимнего леса под воздействием радиометрического фотофореза // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 5. С. 369–375. DOI: 10.15372/AOO20220504; Tentyukov M.P., Belan B.D., Simonenkov D.V., Mikhailov V.I. Generation of secondary organic aerosols on needle surfaces and their entry into the winter forest canopy under radiometric photophoresis // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 5. P. 490–496.
4. Лес. Природа России: портал. Электрон. дан. НИА «Природные ресурсы». М., 1999. URL: <http://www.priroda.ru/regions/forest/> (дата обращения: 08.02.2024).
5. Glasius M., Goldstein A.H. Recent discoveries and future challenges in atmospheric organic chemistry // *Environ. Sci. Technol.* 2016. V. 50. P. 2754–2764. DOI: 10.1021/acs.est.5b05105.
6. Peñuelas J., Staudt M. BVOCs and global change // *Trends Plant. Sci.* 2010. V. 15. P. 133–144. DOI: 10.1016/j.tplants.2009.12.005.
7. Soo J.-Ch., Monaghan K., Lee T., Kashon M., Harper M. Air sampling filtration media: Collection efficiency for respirable size-selective sampling // *Aerosol Sci. Technol.* 2016. V. 50, N 1. P. 76–87. DOI: 10.1080/02786826.2015.1128525.
8. Юфа Б.А., Гурвич Ю.М. Применение медианы и квартилей для оценки нормальных и аномальных значений геохимического поля // *Геохимия*. 1964. № 8. С. 817–824.
9. Shukurov K.A., Simonenkov D.V., Nevzorov A.V., Rashki A., Hamzeh N.H., Abdullaev S.F., Shukurova L.M., Chkhetiani O.C. CALIOP-based evaluation of dust emissions and long-range transport of the dust from the Aral-Caspian arid region by 3D-Source Potential Impact (3D-SPI) Method // *Remote Sens.* 2023. V. 15, N 5. P. 2819. DOI: 10.3390/rs15112819.
10. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition // *Aust. Meteorol. Mag.* 1998. V. 47. P. 295–308.
11. Shukurov K.A., Chkhetiani O.G. Probability of transport of air parcels from the arid lands in the Southern Russia to Moscow region // *Proc. SPIE*. 2017. V. 10466. P. 104663V. DOI: 10.1117/12.2287932.
12. Евсеева Н.С., Квасникова З.Н., Каширо М.А., Батманова А.С. Современный эоловый морфолитогенез холодного периода года на юго-востоке зоны подтайги Западно-Сибирской равнины // *Геосферные исследования*. 2017. № 2. С. 6–13.
13. Хорват Л. Кислотный дождь / под ред. Ю.Н. Михайловского. М.: Стройиздат, 1990. 80 с.
14. Береснев С.А., Ковалев Ф.Д., Кочнева Л.Б., Рунков В.А., Суетин П.Е., Черемисин А.А. О возможности фотофоретической левитации частиц в стратосфере // *Оптика атмосф. и океана*. 2003. Т. 16, № 1. С. 52–57.
15. Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля / под ред. Г.С. Голицына. СПб.: НПО «Тайфун», 1992. 208 с.
16. Симонова Г.В., Калашикова Д.А., Маркелова А.Н., Бондаренко А.С., Давыдкина А.Е. Вариации изотопного состава кислорода и водорода в атмосферных осадках в г. Томске (2016–2020 гг.) // *Оптика атмосф. и океана*. 2023. Т. 36, № 7. С. 595–601. DOI: 10.15372/AOO20230709.

17. Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г. Динамика воздуха вблизи поверхности почвы и конвективный вынос аэрозоля // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2010. Т. 46, № 1. С. 35–47.
18. Алексеев В.А. Световой режим леса. Л.: Наука, 1975. 225 с.
19. Кочнева Л.Б. Микрофизические оптические характеристики и фотофорез атмосферных аэрозолей: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2007. 24 с.
20. Chernyak V., Beresnev S. Photophoresis of aerosol particles // J. Aerosol. Sci. 1993. V. 24, N 7. P. 857–866.

M.P. Tentyukov, D.A. Timushev, D.V. Simonenkov, B.D. Belan, K.A. Shukurov, A.V. Kozlov. Dynamics of fractional of aerosol in the surface air of the boreal zone of Western Siberia (based on observational at the Fonovaya observatory). Part 1. Comparison of the periods of summer vegetation and winter dormancy of woody plants.

The article presents statistics on the size distribution of aerosol particles during the summer vegetation and winter dormancy of woody plants at the size Fonovaya observatory of the IAO SB RAS (Tomsk Region) from July 1, 2022, to June 30, 2023. The analysis of the ratios of aerosol fractions revealed a paradoxical situation, where the count concentration of aerosol particles 0.3–2.0 μm diameter turned out to be significantly higher in winter than in summer. A phenomenological model is suggested which describes this effect as a manifestation of the action of radiometric forces.

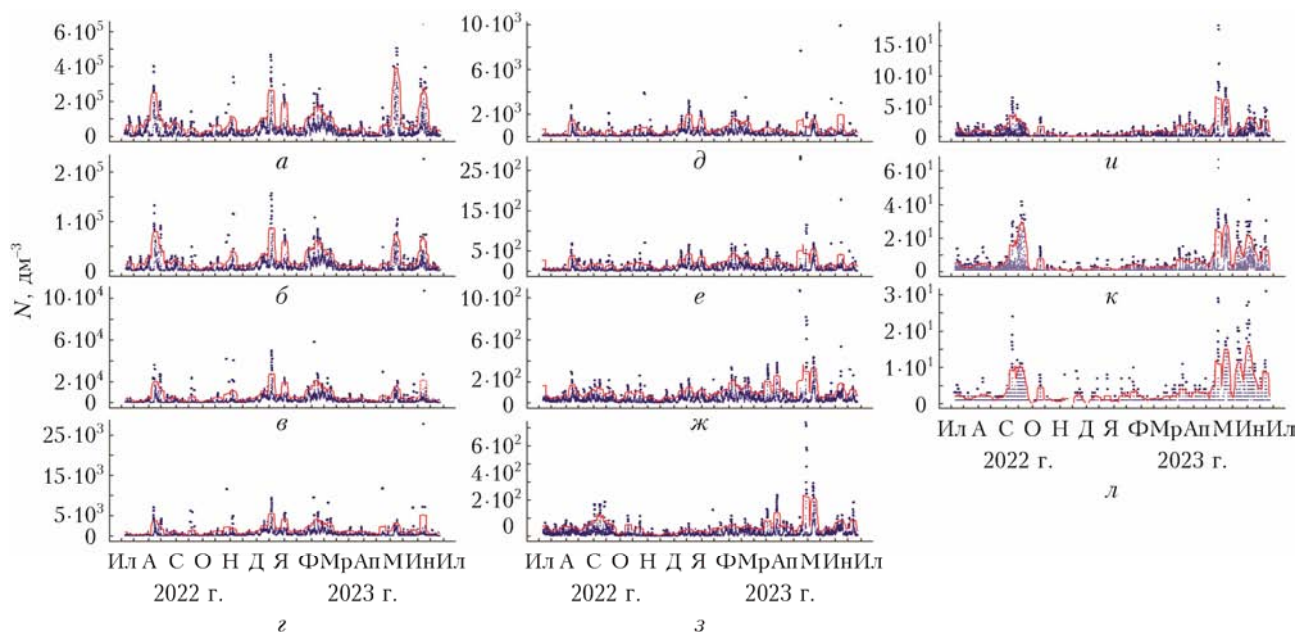


Рис. 4. Сезонные аномальные всплески с отметками выше красной линии, счетной концентрации отдельных фракций атмосферного аэрозоля, представленной скользящей средней: *а* – *д* = 0,3–0,4; *б* – 0,4–0,5; *в* – 0,5–0,65; *г* – 0,65–0,8; *д* – 0,8–1,0; *е* – 1,0–1,6; *ж* – 1,6–2,0; *з* – 2,0–3,0; *и* – 3,0–4,0; *к* – 4,0–5,0; *л* – 5,0–7,5 мкм

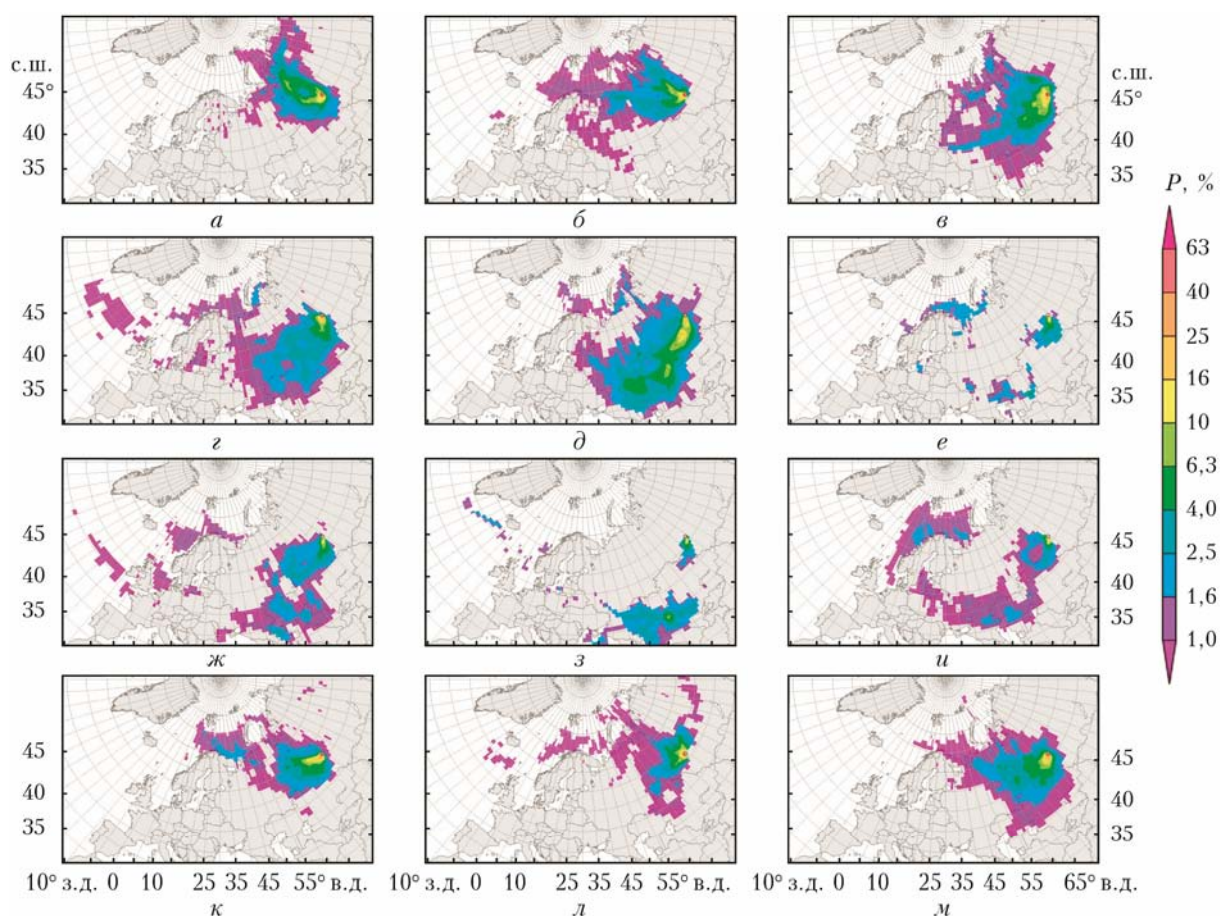


Рис. 5. Среднемесячная региональная вероятность переноса воздушных масс в пределах АПС к нижней тропосфере (100–2100 м) над обсерваторией «Фоновая»: *а* – июль 2022 г., *б* – август 2022 г., *в* – сентябрь 2022 г., *г* – октябрь 2022 г., *д* – ноябрь 2022 г., *е* – декабрь 2022 г., *ж* – январь 2023 г., *з* – февраль 2023 г., *и* – март 2023 г., *к* – апрель 2023 г., *л* – май 2023 г., *м* – июнь 2023 г.