

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.578.46:504.5

**Сопряженный анализ гранулометрического состава  
аэрозольного вещества в приземном воздухе  
и снежном покрове: влияние воздушных масс  
на распределение аэрозольных частиц**

**М.П. Тентюков<sup>1,2</sup>, К.А. Шукуров<sup>3</sup>, Б.Д. Белан<sup>1</sup>, Д.В. Симоненков<sup>1</sup>,  
Е.Г. Язык<sup>4</sup>, В.И. Михайлов<sup>5</sup>, В.С. Бучельников<sup>4\*</sup>**

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

<sup>2</sup>Сыктывкарский государственный университет им. Питиримы Сорокина  
167001, г. Сыктывкар, пр. Октябрьский, 55

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

<sup>4</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

<sup>5</sup>Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН  
167000, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 48

Поступила в редакцию 14.04.2021 г.

Приведены результаты сравнительных исследований соотношения аэрозольных фракций в приземном воздухе и снежных слоях, хронологически привязанных к стратиграфически значимым снегопадам. Траектории движения зимних воздушных масс рассчитаны с помощью модели NOAA HYSPLIT\_4 и метеополей NCEP/NCAR Reanalysis. Показано, что особенности формирования зимнего аэрозольного поля в пределах Обь-Томского междуречья преимущественно связаны с ветрами с южной составляющей.

*Ключевые слова:* гранулометрический состав аэрозолей, снежный покров, циркуляция атмосферы, дальний перенос примесей, траекторный анализ; aerosol particle size distribution, snow cover, atmospheric circulation, far-range transport of impurities, trajectory analysis.

**Введение**

Атмосферное осаждение — важный процесс удаления аэрозольных частиц из атмосферы. Атмосферный перенос взвешенных в воздухе частиц служит связующим звеном между источниками поступления вещества в атмосферу и районом осаждения его на поверхность, порой удаленными друг от друга на значительные расстояния. В связи с этим определенный научный интерес представляют сопряженные исследования распределения аэрозольных частиц по размерам в снежном покрове и приземном воздухе с учетом влияния зимних атмосферных и синоптических процессов и дальнего переноса воздушных масс.

\* Михаил Пантелеймонович Тентюков (tentukov@yandex.ru); Карим Абдухакимович Шукуров (karim.shukurov@ifaran.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Егор Григорьевич Язык (yazikovveg@tru.ru); Василий Игоревич Михайлов (system14@rambler.ru); Виктор Сергеевич Бучельников (victor.buchelnikov@yandex.ru).

**Постановка задачи и обоснование цели работ**

В ходе наблюдений за изменением гранулометрического состава аэрозольного вещества в твердых гидрометеорах с использованием метода динамического рассеяния света, на ключевом участке в пределах Ботанического сада Сыктывкарского государственного университета было установлено, что полидисперсность аэрозольного вещества в инее, образующемся в перерывах между снегопадами, выше, чем в пробах свежеснежного снега. Наблюдения проводились в два этапа. Первый охватывал время с 26.02 по 6.03.2020 г. В этот период было зафиксировано два эпизода образования инея, тогда как во второй (23–26.03.2020 г.) — три. Результаты показали (рис. 1), что во всех пробах свежеснежного снега фиксируется бимодальное распределение частиц. Первая совокупность регистрируется в интервале 0,2–3,0 мкм, а вторая — 3,0–7,0 мкм. Распределение аэрозольных частиц в пробах инея показало наличие трех совокупностей частиц. Первая

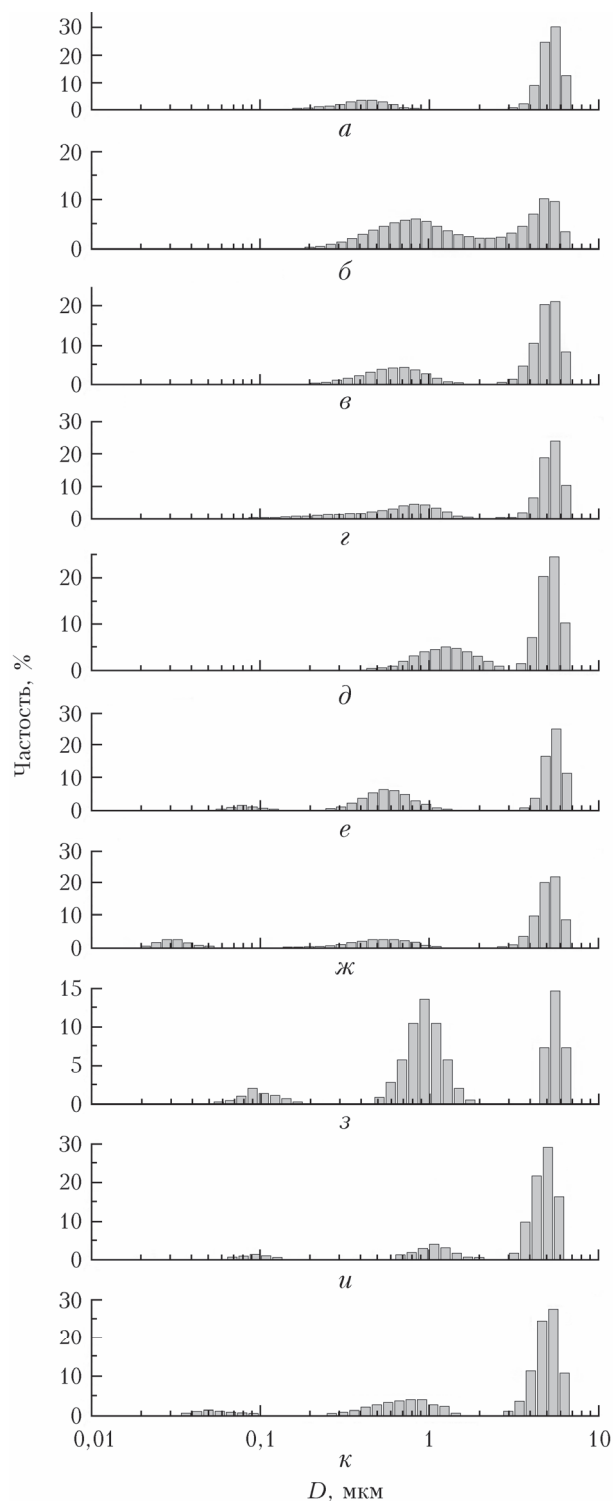


Рис. 1. Частотное распределение аэрозольных частиц по размерам: в снежных осадках (а–д) и в инее (е–и);  $D$  – объемный диаметр частиц, определяемых с помощью метода динамического рассеяния света

(мелкая) фракция выделяется в интервале 0,015–0,120 мкм; вторая (средняя) часто отделена от первой небольшим промежутком и располагается в интервале от 0,25 до 1,5 мкм; третья (крупная) фиксируется в интервале 2,5–7,0 мкм.

С увеличением интервала между снегопадами в пробах инеев наблюдается перераспределение частиц между мелкой и средней фракциями в сторону значительного увеличения мелкой. При этом интервал размеров частиц в третьей фракции сужается с 0,04–0,12 до 0,02–0,05 мкм, тогда как объемное содержание частиц крупной фракции меняется мало. Появление третьей фракции в инее связывается с зимними особенностями сухого осаждения аэрозолей. Известно, что снежный покров даже при самой низкой температуре излучает длинноволновую радиацию (собственное тепло), а также характеризуется высокой способностью отражать солнечную радиацию. Эти обстоятельства способствуют сильному выхолаживанию снежного покрова и возникновению инверсии температур (снеговая инверсия, согласно [1]). Наряду с этим снежный покров оказывает иссушающее влияние на приземный слой воздуха [2]. Вбирая в себя из приземного слоя воздуха избыток влаги, снежный покров инициирует нисходящую миграцию воздуха.

В результате формируется устойчивый массоперенос водяных паров, увлекающий аэрозольные частицы из приземного слоя воздуха по направлению к снежному покрову. Процесс сопровождается образованием инеев, при котором возможен захват аэрозольных частиц его растущими кристаллами. Рост кристаллов инеев при определенных условиях влажности и градиенте температур в приснежном слое воздуха показана в [3].

Предполагается, что выявленные различия в гранулометрическом составе аэрозольного вещества при его «сухом» и «мокром» осаждении контролируются зимними траекториями движения воздушных масс и могут наследоваться в снежных слоях при нарастании снежной толщи. Поэтому цель настоящей работы – сопряженный анализ гранулометрического состава аэрозольного вещества в приземном воздухе и снежном покрове в обсерватории «Фоновая», расположенной в пределах Обь-Томского междуречья, с учетом особенностей зимней циркуляции атмосферы в Томском регионе.

## Методика

Для выявления послышной изменчивости гранулометрического состава аэрозольного вещества в снежной толще на снегомерной площадке в обсерватории «Фоновая» (Институт оптики и атмосферы СО РАН, г. Томск) был выполнен послышный отбор проб снега с постоянным шагом по глубине, равным 2 см. Разрез заложен на ключевом участке обсерватории «Фоновая» (15 марта 2019 г.). Высота снежного покрова на момент пробоотбора составила 68 см. Площадка снегомерных наблюдений была выбрана рядом с постом мониторинга состава воздуха, чтобы иметь возможность параллельно сопоставлять соотношение аэрозольных фракций в приземном воздухе и снежных слоях, хронологически привязанных к стратиграфически значимым снегопадам. Пробоотбор осуществляли с помощью специального снегоотборника [4]. Подготовка проб снега к анализу в день

отбора заключалась в их взвешивании на электронных весах и расчете плотности снега ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>). Снег таял при комнатной температуре, и в снеговой воде определяли значения водородного показателя и удельную электропроводность ( $\eta S$ , мкСм/см) потенциометрическим и кондуктометрическим методами соответственно [5].

Послойный гранулометрический анализ аэрозольного вещества, аккумулированного в снежной толще, выполняли методом лазерной дифракции [6] с использованием лазерного анализатора размеров частиц Shimadzu SALD-7101. Диапазон измерения частиц составлял от 0,01 до 300 мкм. Результаты лазерной гранулометрии оформлялись в виде гистограмм.

Измерения счетной концентрации частиц в приземном воздухе в обсерватории «Фоновая» выполнялись спектрофотометрическим методом с использованием аэрозольного спектрометра Grimm 1.108 по 15 каналам дисперсности от 0,3 до 20 мкм ежедневно в течение 10 мин с предварительной продувкой в течении 3 мин. Концентрация приземного аэрозоля измерялась в воздушном потоке, который отбирался изокинетическим методом из аэродинамической воздухозаборной трубы на высоте 4 м. Расход воздушного потока в спектрометре составлял 1,2 л/мин.

Траекторный анализ вклада удаленных региональных источников в концентрации субмикронного и грубодисперсного аэрозолей в обсерватории проводился методом взвешенных траекторий CWT (Concentration weighted trajectories [7]) с использованием массива 7-суточных обратных траекторий воздушных частиц, рассчитанных по методике [8] с помощью траекторной модели NOAA HYSPLIT\_4 [9] и метеополей NCEP/NCAR Reanalysis [10]. Восстановление поля вероятности переноса воздуха к «Фоновой» проводилось по методике [11].

## Результаты и обсуждение

Измерения концентрации приземного аэрозоля показали, что объем грубодисперсных частиц в нем незначительно доминирует над объемом субмикронных. Для расчета диапазоны измеренной счетной концентрации были объединены по размерам частиц в две фракции: 0,3–1 мкм и крупнее 1 мкм. Затем по результатам измерений счетных концентраций была произведена оценка объемов, занимаемых каждой фракцией в единице объема воздуха, путем пересчета измеренных счетных концентраций по формуле [12]:

$$C_v = \pi / 6 \sum (N_i d_i^3).$$

Здесь  $C_v$  – объемная концентрация аэрозольных частиц просуммированных диапазонов, мкм<sup>3</sup>/дм<sup>3</sup>;  $N_i$  – счетная концентрация в каждом суммируемом измерительном диапазоне, дм<sup>-3</sup>;  $d_i$  – средний (геометрический) диаметр каждого диапазона измерения [ $d_i$ ;  $d_{i+1}$ ] (для оценки верхней границы последнего измеряемого и суммируемого диапазона принято допущение  $d_{15+1} = 25$  мкм).

На рис. 2, *a* приведено соотношение объемов, занимаемых частицами грубодисперсной ( $d > 1$  мкм) и субмикронной ( $0,3 < d < 1$  мкм) фракций, в одном и том же объеме воздуха, рассчитанное для обсерватории «Фоновая» за период наблюдений.

На рис. 2, *a*, можно заметить, что к началу снеготаяния в соотношении субмикронной и грубодисперсной фракций в приземном аэрозоле проявился тренд к снижению доли грубодисперсного аэрозоля. Вместе с тем можно выделить четыре периода, когда грубодисперсная фракция существенно преобладала. Первый и самый продолжительный период фиксируется в начале зимы (с 29.10 по 29.11); второй – в конце первой половины зимы (с 9 по 20.12); третий, менее выраженный, совпадает с началом ее второй половины (с 2 по 24.01), для него характерно чередование коротких периодов доминирования грубодисперсной или субмикронной фракции. Наличие в третьем периоде больших перерывов между снегопадами дает основание предположить, что доля субмикронного аэрозоля увеличилась за счет сухого осаждения аэрозолей. Четвертый период относится к концу зимы (13–15.02). Все отмеченные периоды совпадают со снегопадами (рис. 2, *б*), интенсивность которых выше, чем в периоды преобладания субмикронной фракции.

Предполагается, что такая периодичность в колебании дисперсности аэрозольного поля в «Фоновой», когда субмикронная фракция превалирует над грубодисперсной и наоборот, контролируется зимними атмосферными процессами (рис. 3, цв. вкладка).

На рис. 3 диаграммы *a1–a3* характеризуют особенности зимнего переноса взвешенных частиц только по тем участкам траекторий, когда перенос воздушных масс осуществлялся в пределах атмосферного пограничного слоя (АПС) над потенциальными источниками аэрозоля на поверхности, а диаграммы *b1–b3* – по участкам траекторий в пределах тропосферы.

Из рисунка следует, что основные региональные источники поступления субмикронного и грубодисперсного аэрозоля могут быть связаны с промышленными областями, расположенными к юго-востоку от «Фоновой» (Кузнецкий Алатау), а удаленные – с источниками пыли на востоке и юго-востоке, возможно, в пустынях Джунгарии и Монгольской Гоби. При переносе грубодисперсного аэрозоля к «Фоновой» по юго-западным направлениям наиболее вероятные удаленные источники расположены в Казахстане и, предположительно, в пределах Арало-Каспийского аридного региона (диаграмма *b3*).

### Особенности формирования снежного покрова зимой 2018/19 г.

Начало формирования снежного покрова зимой 2018/19 гг. было интенсивным. Обильные снегопады обеспечили его быстрый прирост (см. рис. 2, *в*), но затем снегопады стали редкими и темпы нарастания снежной толщи снизились. К началу снеготаяния мощность снежного покрова была в пределах своих среднесезонных значений.

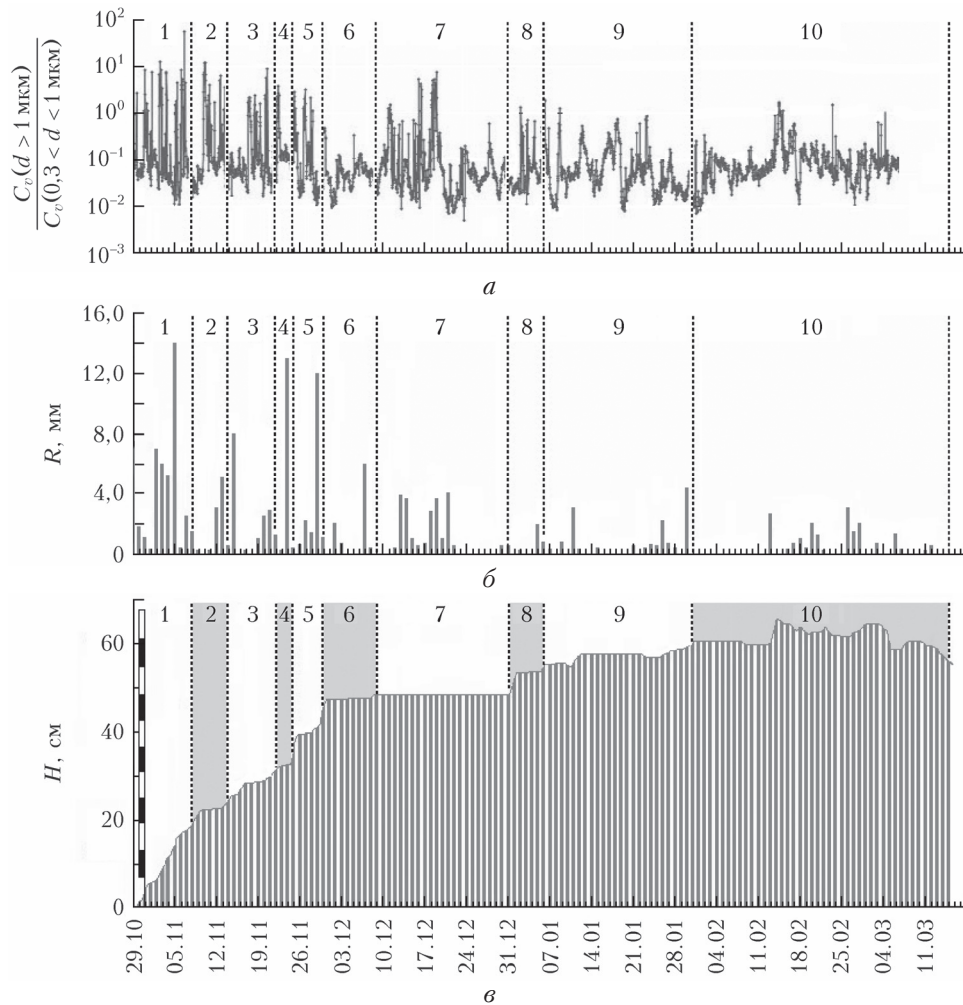


Рис. 2. Временной ход параметров приземного аэрозоля по данным измерений аэрозольного спектрометра Grimm 1.108, сопряженный с динамикой формирования снежного покрова в обсерватории «Фоновая» зимой 2018/19 г.: соотношение объемных концентраций субмикронной и грубодисперсной фракций в приземном аэрозоле (а); интенсивность снегопадов (по данным м/с Кожевниково), выраженная в водном эквиваленте ( $R$ , мм) (б); нарастание снежного покрова ( $H$ , см) (в); 1–10 – временные периоды образования снежных слоев

**Стратиграфия снежной толщи.** На момент снегоотбора (15.03.2019 г.) высота снежного покрова  $H$  на снегомерном пункте обсерватории «Фоновая» составила 68 см. Для выявления структурного строения снежной толщи был заложен снежный шурф. В его вертикальном профиле выделяются пять стратиграфических слоев (рис. 4) [13].

Первый слой высотой до 6 см характеризуется первичной текстурой в виде внутренней слоистости, сформированной в результате постседиментационных преобразований стратиграфически значимых снегопадов (к ним мы относим снегопады с интенсивностью более  $0,01 \text{ г/см}^2$  за сутки). При меньшей интенсивности выпадения твердых осадков формирование отдельного слоя едва ли возможно, так как в зоне с холодным климатом указанное количество свежавыпавшего снега испаряется менее чем за сутки [14, 15]. В первом слое в результате сублимационного метаморфизма произошла трансформация отложенных снежинок (DFbk) с образованием мелких округлых частиц (RGsr), которые мало отличались от снежных зерен во втором слое. Мощность

второго слоя составила 19 см. В нем вследствие постседиментационных преобразований ранее выпавших снегопадов отмечено небольшое увеличение диаметра снежных зерен (от 0,5 до 1,0 мм). Из-за этого сохранилась слоистая структура, но текстурно она стала менее выраженной. Граница между двумя верхними слоями слабо выражена. Третий слой текстурно однородный, сложен непрозрачными округлыми агрегатами из снежных зерен (RGxf), размер которых с глубиной увеличивается от 1 до 2 мм. Четвертый и пятый слой сложены округлыми частицами с гранями и изоморфными кристаллами глубинной изморози (DNxr). Их размер увеличивается вниз по разрезу от 3 до 5 мм. Из-за оптической анизотропии снежных горизонтов, сложенных зернами снега и гранными кристаллами, зона контакта между ними визуально различима. Сопоставление послойных текстурных преобразований снежной толщи показывает относительную активность постседиментационных преобразований ранее выпавших снегопадов, которая сильнее выражена в нижней части снежной толщи.



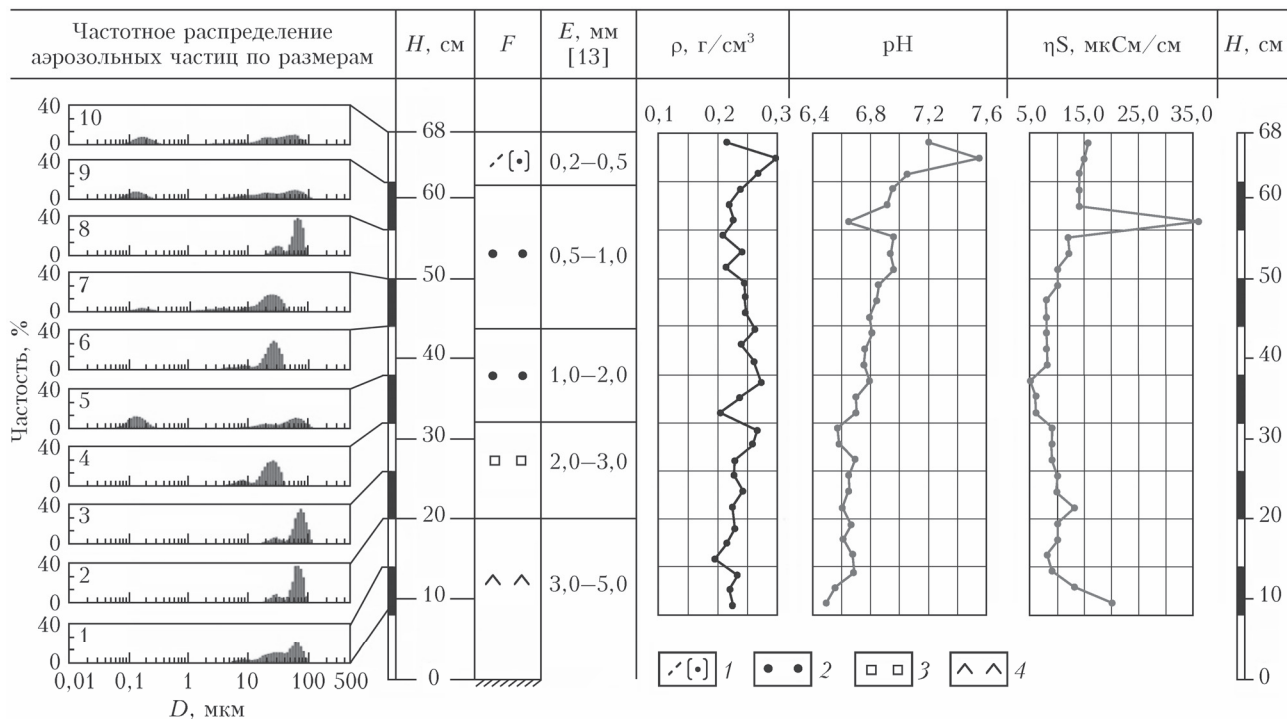


Рис. 4. Послойное распределение аэрозольных частиц по размерам в снежной толще, сопряженное с интегральными показателями: плотностью снега ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>), водородным показателем (pH), электропроводностью ( $\eta S$ , мкСм/см): 1 – недавно отложенный снег (DFbk) с округлыми зернами; 2 – мелкозернистый снег (RGsr); 3 – округлые частицы с гранями (RGxf); 4 – глубинная изморозь (DNxr) (морфологическая классификация форм ( $F$ ) зерен дана по работе [13])

**Послойная плотность снежной толщ** мало увеличивается с глубиной (рис. 4). Но при этом отмечаются несколько слоев с контрастными колебаниями плотности. Так, уплотнение снега (до 0,31 г/см<sup>3</sup>) в верхней части профиля вызвано потеплением, которое сопровождалось усилением ветра. Скачок плотности (до 0,27 г/см<sup>3</sup>) в средней части снежного разреза связан с оледенелым прослоем, сформировавшимся во время кратковременной зимней оттепели. Следует заметить, что уменьшение плотности в средней (0,2 г/см<sup>3</sup>) и нижней (< 0,2 г/см<sup>3</sup>) частях разреза совпадает с переходными зонами морфологических изменений снежных зерен (зона перехода от мелких к средним) и кристаллов (переход от гранных к крупным кристаллам глубинной изморози). В целом следует отметить, что с началом снеготаяния вертикальные (межслойные) изменения плотности снега в основном колеблются в узком интервале 0,20–0,25 г/см<sup>3</sup>.

**Электропроводность снеговой воды** измеряли кондуктометрическим методом. Анализ вертикального распределения электропроводности снега выявил два пика. Первый (36,2 мкСм/см) фиксируется в верхней части профиля, а второй (20 мкСм/см) связан со слоем кристаллов глубинной изморози. Синхронное с этими пиками падение pH дает основание предполагать связь с наличием сульфатной компоненты в зольных уносах от ТЭЦ. Электролитическая диссоциация соединений сульфатов приводит к росту концентрации ионов и увеличению электропроводности снега в этих снежных слоях. В целом же колебания значений электропроводности

в снежном покрове осуществляются в пределах одного порядка (от 5 до 15 мкСм/см), что может свидетельствовать об относительно невысоком содержании растворимых соединений в аккумулярованном аэрозольном веществе.

**Водородный показатель.** Колебания водородного показателя pH в снеговой воде варьируются в диапазоне от 6,5 до 7,6. Примечательна послонная изменчивость единичных значений кислотности в снежной толще. Она оказалась контрастнее в верхних двух слоях: разница между минимальными (pH 6,6) и максимальными (pH 7,6) значениями водородного показателя равна 1. Ниже по профилю межслойные различия значений pH колеблются в пределах десятых долей единицы с трендом смещения от нейтральных к слабокислым.

**Частотное распределение частиц по размерам в снежных слоях, хронологически привязанных к стратиграфически значимым снегопадам**

На рис. 4 представлены послойные распределения частиц по размерам. Для сопряжения со структурным строением снежной толщ каждые три послойные пробы снега объединяли в одну и в ней определяли гранулометрический состав аэрозольного вещества. Их хронологическую привязку осуществляли по времени выпадения стратиграфически значимых снегопадов (см. рис. 2, б).

В целом по характеру распределения частиц по размерам четко выделяются бимодальный и трехмодальный типы распределения. Отмечаются две группы фракций с бимодальным распределением частиц. Интервал первой составляет 10–100 мкм (слои 1, 2, 3, 8) с пологовершинным и островершинным пиками с отметками 20...30 и 60 мкм. Вторая с пиками на отметках 7 и 19 мкм располагается в интервале 2–30 мкм (слои 4, 6). Трехмодальное распределение выявлено в слоях 5, 7, 9 и 10. В них интервал первой фракции – 0,05–0,35 мкм, с пологим пиком в отметке 0,15 мкм. Две другие фракции выделяются в широком интервале от 2–5 до 30–100 мкм, со слабо выраженными пиками в области 2–20 и 20–60 мкм соответственно. Предполагается, что появление субмикронной фракции в слоях 7, 9 и 10 связано с сухим осаждением аэрозолей в перерывах между снегопадами во второй половине зимы, тогда как появление субмикронной фракции в слое 5 относится к началу зимы и совпадает с интенсивным нарастанием снежной толщи. Следует заметить, что появление субмикронных фракций в слоях 10 и 9, а также в слоях 7 и 5 связано с разными воздушными массами. Это предположение основано на том факте, что высокие значения электропроводности в пробах снеговой воды, взятые из верхних двух слоев в снежном разрезе (см. рис. 4), свидетельствуют об относительно высоких концентрациях водорастворимых соединений, тогда как в двух других – о преобладании малорастворимого аэрозольного вещества.

***Траекторный анализ атмосферного переноса взвешенных частиц, с которыми связано формирование зимнего аэрозольного поля в районе обсерватории «Фоновая», в дни со снегопадами***

Была выполнена сравнительная оценка послыных соотношений фракций аэрозольного вещества в снежной толще (см. рис. 4) и выделено три группы. Первую образовали слои 1, 2, 3, 8, вторую – 4, 6, 7, третью – 5, 9, 10. Формирование каждого из них связано с определенным количеством снегопадов (см. рис. 2, 6). Это обстоятельство позволило построить обратные траектории переноса аэрозолей, которые фиксировались в точке измерений в дни со снегопадами. Чтобы выявить доминирующее направление переноса частиц в эти дни, были сгруппированы траектории переноса воздушных масс в АПС и на высоте 1500 м. Вероятности переноса воздушных масс, с которыми связаны три типа распределений, приведены на рис. 5 (цв. вкладка).

На рис. 5 верхний ряд (*a1, б1*) отражает условия формирования слоев 1, 2, 3, 8; средний ряд (*a2, б2*) – слоев 4, 6, 7; нижний (*a3, б3*) – слоев 5, 9, 10. Диаграммы *1a–3a* построены по траекториям, оканчивавшимся только в атмосферном пограничном слое над «Фоновой», *1б–3б* – по траекториям воздушных масс, прибывавших к «Фоновой» на вы-

соте 1500 м. Из рис. 5 следует, что формирование снежных слоев с гранулометрическим составом без участия субмикронной фракции связано с субширотным атмосферным переносом на уровне 1500 м и с субмеридиональным – когда тонкодисперсная фракция присутствует в распределении. При этом субмикронная фракция всегда присутствует в АПС при южной составляющей в переносимых воздушных массах.

Результаты анализа соотношения фракций в приземном воздухе и траекторного анализа движения воздушных масс, с которыми связано формирование аэрозольного поля над «Фоновой», не позволяют однозначно интерпретировать соотношение фракций в приземном воздухе с послыным соотношением аэрозольных фракций в снежной толще, например отсутствие субмикронной фракции в нижней части снежной толщи и ее наличие в верхней.

Возможной причиной такого несоответствия, на наш взгляд, является криогенная трансформация аэрозольного вещества в снежной толще. Основанием для этого предположения служит характер кривой распределения послыных значений электропроводности снеговой воды. Если ее относительно высокие значения в верхних слоях можно объяснить высокими концентрациями растворимых соединений в свежеснежавших твердых осадках, то почти двукратное их снижение в средней части – результат появления малорастворимых соединений вследствие криохимических реакций между аэрозольным веществом и субохлажденной пленочной влагой. Возможность образования субохлажденной пленочной жидкости на поверхности ледяных кристаллов теоретически показана Б.П. Вейнбергом [16], а экспериментально – В.И. Квилливице с соавторами [17]. Существование жидкой фазы воды при отрицательных температурах не является чем-то экстраординарным. Наблюдения за процессом замерзания воды в тонких капиллярах показали, что в капиллярах диаметром менее 10 мкм вода оставалась жидкой до температуры  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом ее свойства совпадали со свойствами обычной воды [18]. Иными словами, если при замерзании с переходом температуры через  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  разрываются термодинамические параметры криогенной системы с выделением скрытой теплоты (фазовый переход первого рода, [19, 20]), то в случае с субохлажденной влагой таких разрывов нет: эффект снижения температуры проявляется в уменьшении скорости реакций и миграции (изменении вязкости и диффузии).

Вместе с тем рост электропроводности талой воды, отмеченный для проб глубинной изморози в нижней части снежной толщи, имеет иную природу. Известно, что в зоне контакта «снег – почва» резко изменяется ход изотерм [21], потому что выхолаживание нижних горизонтов снега, вызванное испарением водяных паров из почвы, понижает ее температуру. Поскольку плотность почвы и ее объемная теплоемкость в пять раз больше аналогичных показателей для снега, то выхолаживание почвы в зоне контакта со снегом существенно меньше, чем в припочвенном слое снега. Поэтому при испарении

почвенной влаги в зоне контакта «снег – почва» температура снега понижается быстрее, чем почвы. В итоге формируется изотермический слой, в пределах которого влажность кристаллов глубинной изморози оказывается выше, чем в перекрывающих его слоях крупнозернистого снега. Большая увлажненность ледяных кристаллов в этой зоне обусловлена поступлением водяного пара из почвы. Поэтому в приконтактной зоне в пределах изотермического слоя возникает его избыток, часть которого конденсируется на кристаллах глубинной изморози в виде субохлажденной пленочной жидкости. Ее кристаллизация на гранях ледяных кристаллов увеличивает их размеры.

Таким образом, в отличие от верхней части снежной толщи в нижней существует своеобразная кристаллообразующая среда, которая определенным образом может влиять на динамику перекристаллизации снежных зерен в зоне контакта «снег – почва» и в результате увеличивать электропроводность снега в приконтактной зоне. Процесс сопровождается агрегацией субмикронных частиц и изменением соотношения аэрозольных фракций, которое происходит за счет увеличения доли грубодисперсной фракции аэрозолей в снежных слоях в этой части снежного профиля. Поэтому некорректно делать выводы об источниках дальнего переноса примесей только на основе сопоставления частотных распределений частиц по размерам в снежных слоях, хронологически привязанных к стратиграфически значимым снегопадам. Необходимо учитывать криогенную трансформацию аэрозольного вещества в слоях снега и траектории дальнего переноса атмосферных примесей, с которым связано формирование зимнего аэрозольного поля над мониторинговой площадкой.

### Заключение

Анализ соотношения дисперсных фракций в инее (сухое осаждение) и в пробах свежеснежавшего снега («мокрое» осаждение), выполненный методом лазерной дифракции, выявил отличия в гранулометрическом составе аэрозольного вещества в указанных объектах. Предполагается, что обнаруженные отличия обусловлены зимними траекториями движения воздушных масс и могут наследоваться в снежных слоях при нарастании снежной толщи. В связи с этим был выполнен сопряженный анализ соотношения дисперсных фракций аэрозольного вещества в приземном воздухе и снежных слоях, образовавшихся при выпадении стратиграфически значимых снегопадов в обсерватории «Фоновая», с учетом зимней циркуляции атмосферы, контролирующей формирование аэрозольного поля над «Фоновой».

Данные измерений концентрации приземного аэрозоля в обсерватории «Фоновая» показали, что в соотношении субмикронной и грубодисперсной фракций в приземном аэрозоле заметен тренд к снижению доли грубодисперсного аэрозоля. Вместе с тем выделяются четыре периода, когда грубодисперсная фракция существенно преобладала. Все они совпадают со снегопадами, интенсивность которых была

выше, чем в периоды преобладания субмикронной фракции. Предполагается, что такая периодичность в колебании дисперсности аэрозольного поля на «Фоновой», когда субмикронная фракция преобладает над грубодисперсной и наоборот, контролируется зимними атмосферными процессами.

Установлено, что основные региональные источники поступления как субмикронного, так и грубодисперсного аэрозоля могут быть связаны с промышленными областями к юго-востоку от «Фоновой» (Кузнецкий Алатау), а удаленные – с источниками пыли на востоке и юго-востоке, возможно, из пустынь Джунгарии и Монгольской Гоби. Отмечается также высокая вероятность переноса воздушных масс к «Фоновой» из юго-западных областей, в основном из Казахстана и от удаленного источника, расположенного предположительно в пределах Арало-Каспийского аридного региона.

В частотном распределении частиц по размерам в слоях снежной толщи четко выделяются бимодальный и трехмодальный типы (с бимодальным распределением). Отмечено две группы частиц: первая – размерами 10–100 мкм с островеириным (20 мкм) и пологовершинным (30 мкм) пиками; вторая – размерами 2–30 мкм с пиками на отметках 7 и 19 мкм. В трехмодальном распределении первая фракция – это частицы размерами 0,05–0,35 мкм с пологим пиком (0,15 мкм); две другие фракции – частицы с размерами в широком интервале от 2–5 до 30–100 мкм, со слабо выраженными пиками в областях 2–20 и 20–60 мкм соответственно. Однако результаты анализа соотношения фракций в приземном воздухе и траекторного анализа движения воздушных масс, с которыми связано формирование аэрозольного поля над «Фоновой», не позволяют однозначно интерпретировать соотношение фракций в приземном воздухе с послонным соотношением аэрозольных фракций в снежной толще. Возможная причина такого несоответствия – криогенная трансформация аэрозольного вещества в снежной толще, которая сопровождается агрегацией субмикронных частиц и изменением соотношения аэрозольных фракций за счет увеличения доли грубодисперсной фракции аэрозолей в снежных слоях, хронологически привязанных к стратиграфически значимым снегопадам. Поэтому делать выводы об источниках аэрозольного загрязнения снега только на основе сопоставления частотных распределений частиц по размерам в снежных слоях с синоптическими условиями выпадения твердых осадков некорректно. Необходимо учитывать процессы криогенной трансформации аэрозольного вещества в слоях снега, а также дальний перенос атмосферных примесей при формировании зимнего аэрозольного поля над мониторинговой площадкой.

Исследование проводилось в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Траекторный анализ выполнен при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-55-56028. Для выполнения гранта использовалась инфраструктура ИОА СО РАН, включая ЦКП «Атмосфера». Гранулометрический анализ проб снега и выполнен

в Научно-образовательном инновационном центре «Наноматериалы и нанотехнологии» НИ ТПУ и Центре коллективного пользования «Химия» Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

1. Рухтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.: Изд-во АН СССР, 1945. 120 с.
2. Рухтер Г.Д. Роль снежного покрова в физико-географическом процессе // Тр. Института географии АН СССР. Вып. 40. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 171 с.
3. Stössel F., Guala M., Fierz C., Manes C., Lehning M. Micrometeorological and morphological observations of surface hoar dynamics on a mountain snow cover // Water Resour. Res. 2010. V. 46, N 4. P. W04511. DOI: 10.1029/2009WR008198.
4. Тентюков М.П. Послойный снегоотборник с прямоугольным сечением // Лед и снег. 2014. Т. 125, № 1. С. 81–85.
5. Грилихес М.С., Филановский Б.К. Контактная кондуктометрия: Теория и практика метода. Л.: Химия, 1980. 175 с.
6. Berne B.J., Pecora R. Dynamic Light Scattering. John Wiley and Sons, 1976. 376 p. DOI: 10.1002/bbpc.19770810123.
7. Hsu Y.-K., Holsen T., Hopke P. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago // Atmos. Environ. 2003. V. 37. P. 545–562.
8. Shukurov K.A., Borovski A.N., Postilyakov O.V., Dzholala A.V., Grechko E.I., Kanaya Y. Potential sources of tropospheric nitrogen dioxide for western Moscow region, Russia // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. P. 108337N.
9. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT\_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition // Aust. Meteor. Mag. 1998. V. 47. P. 295–308.
10. Kistler R., Kalnay E., Collins W.G., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanimitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M. The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2001. V. 82, N 2. P. 247–268.
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.
12. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. New York: John Wiley and Sons, 1998. 1327 p.
13. Фуриц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д.М., Нишимура К., Сатъявали П.К., Сократов С.А. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова) // МГИ. 2012. № 2. 80 с.
14. Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. 380 с.
15. Голубев В.Н., Сократов С.А. Испарение снега в изотермических условиях // Материалы гляциологических исследований. 1992. Вып. 72. С. 205–214.
16. Вейнберг Б.П. Лед, свойства, возникновение и исчезновение льда. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1940. С. 32–41.
17. Квиливидзе В.И., Киселев В.Ф., Ушакова Л.А. О существовании квазижидкой пленки на поверхности льда // Докл. АН СССР. 1970. Т. 191, № 5. С. 1125–1127.
18. Савицкий А.Н. Замерзание и плавление воды в стеклянных капиллярах // Коллоидный журн. 1968. Т. 30, № 1. С. 119–123.
19. Hobbs P.V. Ice Physics. Oxford: University Press, 1974. 495 p.
20. Буторин Г.Т., Скрипов В.П. Кристаллизация переохлажденной воды // Кристаллография. 1974. Т. 19, № 3. С. 613–618.
21. Гуртовая Е.Е. Некоторые вопросы температурного режима снежного покрова // Роль снежного покрова в природных процессах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 121–131.

*M.P. Tentyukov, K.A. Shukurov, B.D. Belan, D.V. Simonenkov, E.G. Yazikov, V.I. Mikhailov, V.S. Buchelnikov. Conjugate analysis of the particle size distribution of aerosol matter in the surface air and snow cover: the effect of air masses on the distribution of aerosol particles.*

The results of comparative studies of the ratio of aerosol fractions in the surface air and snow layers chronologically linked to stratigraphically significant snowfalls are presented. Probable paths of winter air masses were reconstructed using backward trajectories calculated with NOAA HYSPLIT\_4 model and gridded meteorology NCEP/NCAR Reanalysis. It is shown that the features of the formation of the winter aerosol field within the Ob-Tomsk interfluvium are mainly associated with winds with a southern component.



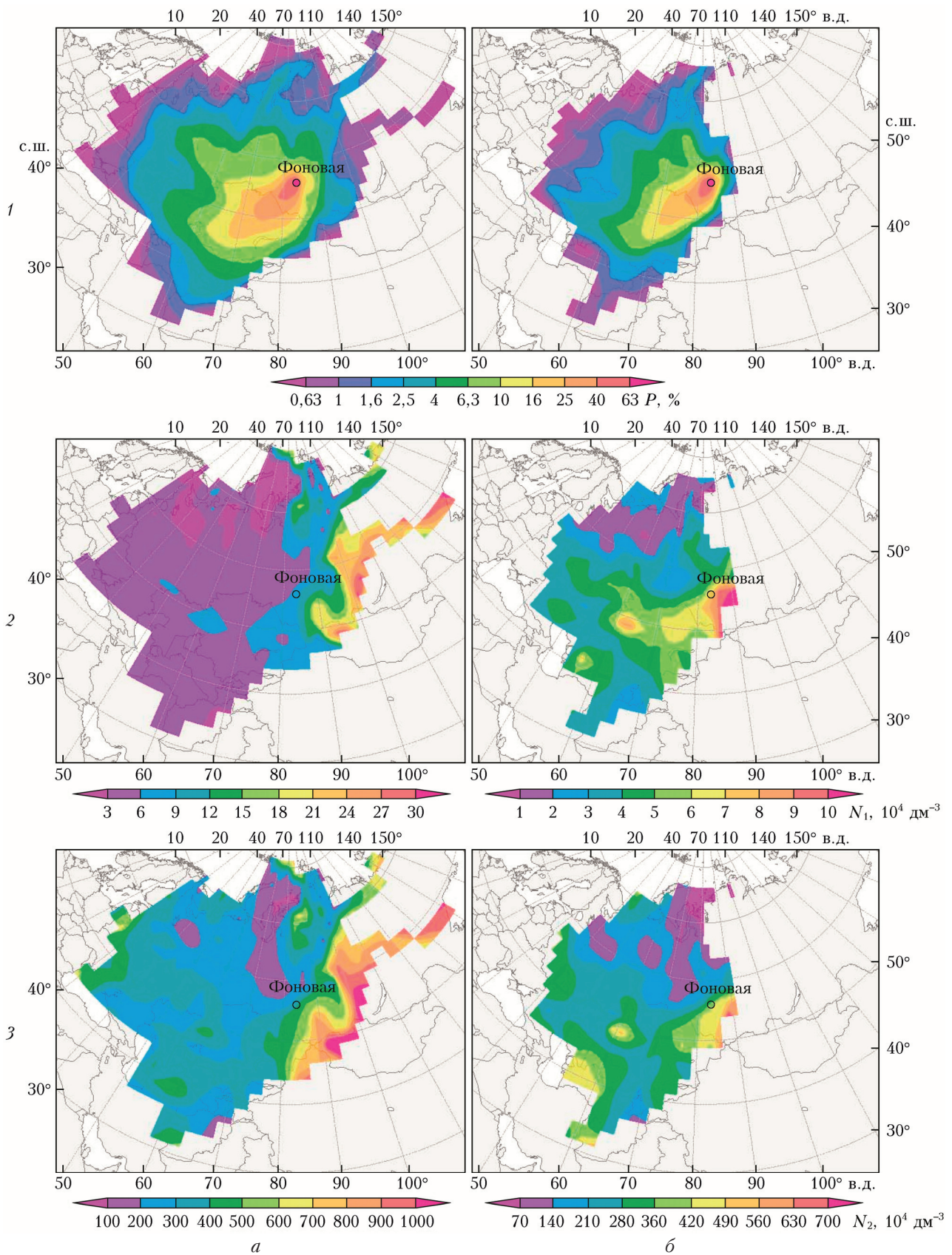


Рис. 3. Средняя вероятность переноса воздуха от потенциальных региональных источников аэрозоля (ряд 1); вклад потенциальных источников в субмикронную (ряд 2) и грубодисперсную (ряд 3) фракции аэрозоля, фиксируемые над «Фоновой»



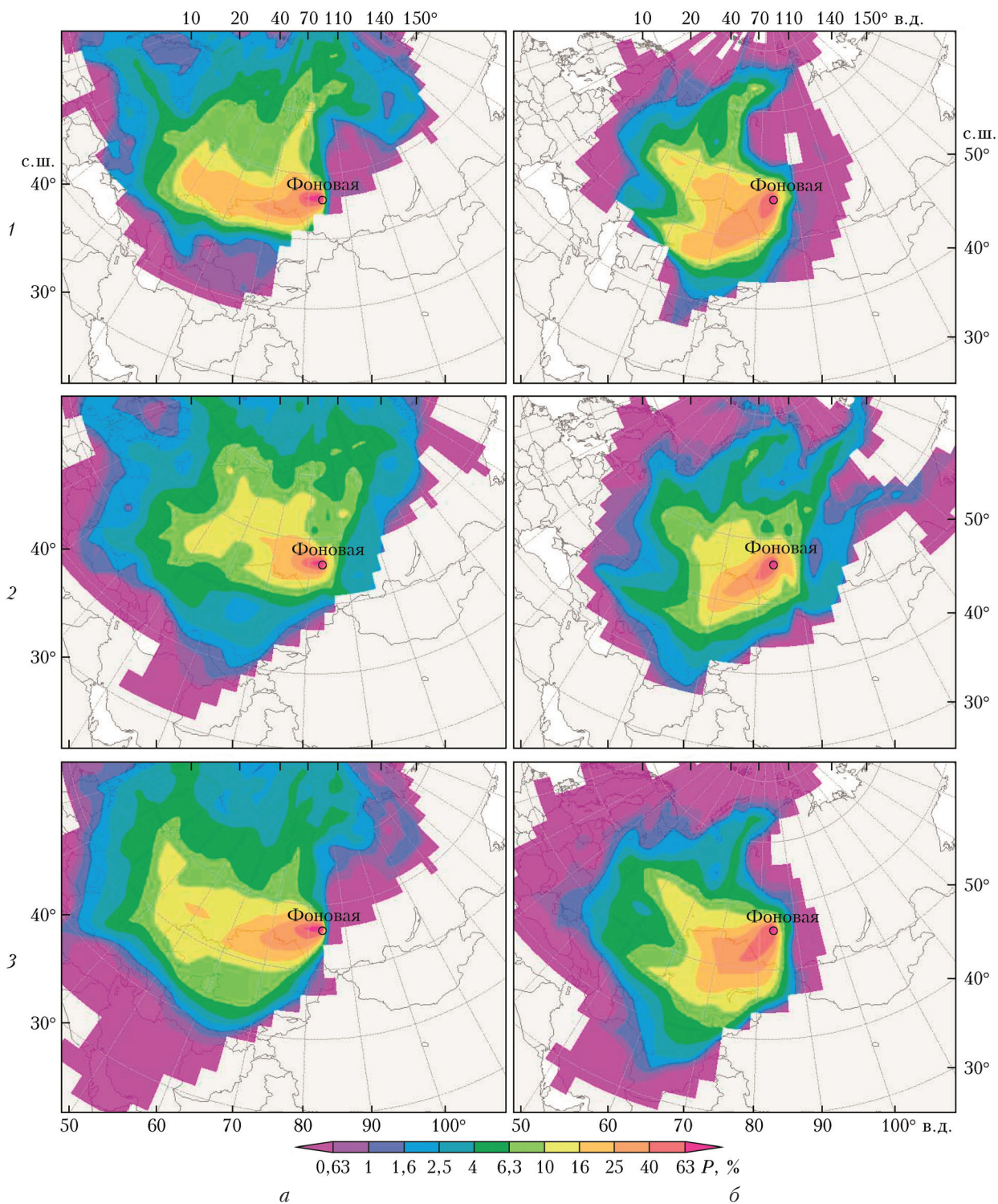


Рис. 5. Вероятность атмосферного переноса воздушных масс, с которыми связано формирование зимнего аэрозольного поля в районе обсерватории «Фоновая» в дни со снегопадами. Описание аналогично рис. 3