

Арктика и Антарктика*Правильная ссылка на статью:*

Тентюков М.П., Васильчук Ю.К., Михайлов В.И., Симоненков Д.В., Гаврилов Р.Ю. — Особенности механизма фракционирования аэрозольного вещества в твердых гидрометеорах // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 3.
DOI: 10.7256/2453-8922.2023.3.43420 EDN: VOUHLS URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=43420

Особенности механизма фракционирования аэрозольного вещества в твердых гидрометеорах

Тентюков Михаил Пантелеймонович

ORCID: 0000-0001-8462-4408



доктор геолого-минералогических наук, кандидат географических наук

профессор, кафедра экологии и геологии, Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина; Институт естественных наук

167001, Россия, республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Петрозаводская, 12, каб. 225

✉ tentukov@yandex.ru

Васильчук Юрий Кириллович

ORCID: 0000-0001-5847-5568



доктор геолого-минералогических наук

профессор, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; географический факультет

119991, Россия, Москва область, г. Ленинские Горы, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2009

✉ vasilch_geo@mail.ru

Михайлов Василий Игоревич

кандидат химических наук



старший научный сотрудник, Институт химии ФИЦ Коми НЦ Уральского отделения РАН

167000, Россия, республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 48

✉ system14@rambler.ru

Симоненков Денис Валентинович

кандидат физико-математических наук



старший научный сотрудник, Институт оптики атмосферы Сибирского отделения РАН

634055, Россия, г. Томск, ул. Площадь Академика Зуева, 1

✉ simon@iao.ru

Гаврилов Роман Юрьевич

кандидат геолого-минералогических наук



доцент, кафедра геологии и разведки полезных ископаемых, Томский политехнический университет; Отделение геологии Инженерной школы природных ресурсов

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

✉ gavrilovroman9@mail.ru

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.3.43420

EDN:

VOUHLS

Дата направления статьи в редакцию:

24-06-2023

Аннотация: Объектом исследования являются дисперсные фракции аэрозольного вещества в сугробовом покрове. На пробоотборных участках, расположенных в среднетаежной зоне в пределах Мезенско-Вычегодской равнины на высокой террасе в долине реки Сысола, в 3 км к западу от города Сыктывкара, выполнен пробоотбор свежевыпавшего снега и поверхностной изморози. Анализ соотношений в поверхностной изморози субдисперсных фракций аэрозольного вещества осуществлялся в сопряжении с гранулометрическим анализом свежевыпавшего снега. Исследования с помощью метода динамического рассеяния света гранулометрического состава аэрозольного вещества в свежевыпавшем снеге и поверхностной изморози, образующейся в перерывах между снегопадами, показали, что во всех пробах снега фиксируется бимодальное распределение частиц. В то же время распределение субмикронных аэрозольных частиц в пробах изморози характеризуется наличием уже трех мод. Также с увеличением продолжительности периода между снегопадами в пробах изморози наблюдается перераспределение частиц между мелкой и средней фракциями в сторону значительного увеличения частиц в мелкой фракции, но объемная концентрация частиц крупной фракции меняется незначительно. Предполагается, что выявленное обстоятельство связано с действием капиллярных сил и адгезией сухих выпадений при кристаллообразовании изморози (предлагается назвать данный феномен "морозная конденсация"). Аналогичный эффект наблюдался также в западносибирской южной тайге и приморской тундре Нижнего Припечорья.

Ключевые слова:

адгезия, аэрозоли, гранулометрия, динамическое рассеяние света, поверхностная изморозь, снег, твердые гидрометеоры, снегопад, загрязнение снега, фракционирование аэрозолей

Исследование проводилось в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН и при финансовой поддержке Российского Научного фонда (грант № 23-17-00082, геокриологический и гляциологический анализ).

Введение

В настоящее время фиксируется все нарастающий объем пыле-аэрозольной массы в тропосфере, которая за последнее столетие возросла более чем вдвое [1]. Положение

усложняется тем, что развитие производственной деятельности сопровождается появлением новых неприродных источников аэрозоля. И если на долю антропогенного аэрозоля приходится более 10 % всех аэрозольных частиц [2], то в промышленных центрах она возрастает уже до 45 %. Отмечается также, что для антропогенного аэрозоля присуща значительная изменчивость и неоднородность как в химическом [3], так и дисперсном составе [4, 5]. Аэрозольные частицы длительное время могут находиться в атмосфере и переноситься на значительные расстояния. Определенную роль в этом процессе играют субмикронные атмосферные частицы диаметром 0,001–10,0 мкм. В этот интервал попадают частицы, представляющие наибольшую гигиеническую опасность (до 0,3 мкм) [6]. Для них характерно то, что они практически не захватываются дождовыми каплями (цит. По [7], с. 6). В этой связи представляет интерес изучение гранулометрического состава аэрозольного вещества.

В современной практике анализа соотношения размеров частиц в мелкодисперсных средах вnano-, микрометрическом диапазоне широко используется метод динамического рассеяния света (ДРС). Физическая сущность метода ДРС заключается в регистрации временных флюктуаций интенсивности рассеяния лазерного луча в дисперсной среде. В ней из-за броуновского движения частиц возникают флюктуации локальных концентраций частиц и связанные с ними локальные изменения оптической плотности дисперсной среды, а также приуроченные к ним изменения показателей преломления света. Последнее обусловлено тем, что при прохождении лазерного луча через локальные концентрации частиц происходит рассеяние света. Установлено, что числовые параметры рассеяния света зависят от размера частиц, скорости диффузии частиц и вязкости жидкости [8]. ДРС относится к неразрушающим методам исследований, к тому же не требует предварительной калибровки. Он одинаково эффективен как при низких концентрациях частиц, так и при наличии их агрегатов. Измеряемый размер частиц колеблется от 0,5 нм до нескольких микрон. Метод позволяет очень быстро проводить анализ. Для него характерны невысокая себестоимость измерений и низкая погрешность.

Гранулометрические измерения дисперсного вещества хорошо представлены в материаловедении [9], в инженерно-строительной практике при разработке композитных смесей [10], а также при промышленном контроле микро-, нанопорошков и суспензий [11] и в фармацевтике при получении лекарственных субстанций [12]. В снеговедении же лазерная гранулометрия представлена мало. Известно применение метода ДРС при изучении вещественного состава свежевыпавшего снега в пределах урбанизированных территорий [13, 14], иногда метод выступает дополнительным элементом при обследовании снежного покрова фоновых таежных ландшафтов [15]. Общим для всех этих исследований является то, что все они связаны с изучением только снежных осадков. Публикаций по гранулометрии аэрозольного вещества в поверхностной изморози установить не удалось.

Целью данной работы является изучение с помощью метода динамического рассеяния света особенностей распределения субмикронных фракций аэрозольного вещества в твердых гидрометеорах, различающихся по условиям формирования (в свежевыпавшем снеге и поверхностной изморози, образующейся в перерывах между снегопадами).

Материалы и методы

Пробы твердых гидрометеоров (снега и поверхностной изморози) отбирали на ключевом

участке в пределах Ботанического сада Сыктывкарского государственного университета («Ботсад СГУ»), расположенного в зеленой зоне в трех км к западу от Сыктывкара, в два периода. Первый охватывал время с 26.02.2020 по 06.03.2020 г., а второй – с 23.03 по 26.03.2020 г. В первый период было зафиксировано два эпизода образования поверхностной изморози, тогда как во второй – три. Время снегопадов показано в таблице. Состояние погоды в периоды наблюдений приведено для метеостанции «Сыктывкар» по данным, находящимся в открытом доступе (<https://rp5.ru>) (табл. 1).

Таблица 1.

Состояние погоды в феврале-марте 2020 г. на ключевом участке «Ботсад СГУ»

Дата	t_{min}	t_{max}	e_{min}	Ветер, азимут (баллы)	***Осадки, мм	Вид осадков	Обозначение гистограмм
I период							
26.02.2020	-3,7 --	81 --	3.С-3 (0-2)	5,6	Дождь со снегом	I,а	
	0,1	99					
	-1,7	90					
27.02.2020	-8,5 --	71 --	Ю.Ю-3 (0-1)	0,5	Слабый снег	-	
	2,2	97					
	-5,7	88					
28.02.2020	-14,0 --	89 --	В.С-В (1-4)	4,0	Непрерывный снег	I,б	
	-4,2	96					
	-7,9	94					
29.02.2020	-3,5 --	88 --	3.Ю-3 (1-2)	8,0	Непрерывный снег	-	
	0,1	99					
	-1,6	96					
01.03.2020	-3,4 --	72 --	Ю-3 (3-4)	2,3	Ливневой снег	-	
	5,2	89					
	-4,3	81					
02.03.2020	-6,3 --	86 --	Ю.Ю-3 (3-4)	< 0,1	Слабый снег	I,в	
	+1,2	94					
	-2,1	89					
03.03.2020	-1,9 --	81 --	3.Ю-3 (1-4)	1,4	Ливневой снег	-	
	+2,5	94					
	+1,2	89					
04.03.2020	-10,0 --	52 --	С.С-3 (0-2)	-	-	I,г	
	-1,8	95					
	-5,8	74					
05.03.2020	-18,7 --	50 --	штиль	-	-	I,д	
	-2,6	92					

	-9,7	71				
06.03.2020	<u>-5,7</u> - <u>+3,1</u> -0,7	<u>60</u> - <u>95</u> 72	Ю.Ю-3 (3-5)	4,3	Дождь со снегом	I,е
II период						
23.03.2020	<u>-14,3</u> - <u>-0,3</u> -4,8	<u>37</u> - <u>95</u> 63	3.Ю-3 (0-2)	-	-	II,а
24.03.2020	<u>-10,3</u> - <u>+5,0</u> -1,0	<u>28</u> - <u>82</u> 47	Ю.Ю-3 (0-2)	-	-	II,б
25.03.2020	<u>-1,4</u> - <u>+3,2</u> +0,7	<u>45</u> - <u>90</u> 69	Ю.Ю-3 (2-3)	0,2	Следы осадков	II,в
26.03.2020	<u>+0,9</u> - <u>+6,1</u> +2,6	<u>61</u> - <u>92</u> 78	3.С-3 (1-3)	1,4	Снег с дождем	II,г

*Температура воздуха

**Относительная влажность воздуха в %.

***Приведены значения водного эквивалента слоя выпавшего снега.

Отбор проб верхнего слоя снега и поверхностной изморози выполняли с помощью специального пробоотборника. Схема устройства (снегоугольника) и пример его использования при отборе проб поверхностной изморози показан на рис. 1. Оно выполнено в виде угольника (рис. 1, а), состоящего из большой горизонтальной (1) и малой вертикальной (3) прямоугольных пластин, перпендикулярно скрепленных по большему краю. Жесткость креплений обеспечивают две треугольные пластины (2). На нижней стороне горизонтальной пластины (1) сnegoугольника имеются две направляющие в виде паза (4) для нож-лотка. Нож-лоток (рис. 1, б) выполнен в виде прямоугольного ящика без передней стенки, с заостренным наружным краем основания, в верхней части на внешней стороне боковых стенок выполнены две направляющие в виде выступов (5). Нож-лоток снабжен ручкой (6), закрепленной на задней стенке.

Для отбора пробы верхнего слоя снега или поверхностной изморози снегоугольник погружается в снег до тех пор, пока его горизонтальная пластина не достигнет поверхности снега, не касаясь его. Затем вдоль лицевого края сnegoугольника отрывается неглубокий снежный шурф, одна стенка которого совпадает с лицевым краем горизонтальной пластины сnegoугольника. После этого в направляющие горизонтальной пластины вставляют нож-лоток (с высотой бортиков 18 мм при ширине 27 см и длине 36) и вдвигают его в снежную стенку шурфа (рис. 1, в). Полученный таким способом снежный брикет объемом 1750 см³ помещали в пластиковый мешок, в котором пробу и оттаивали при комнатной температуре.

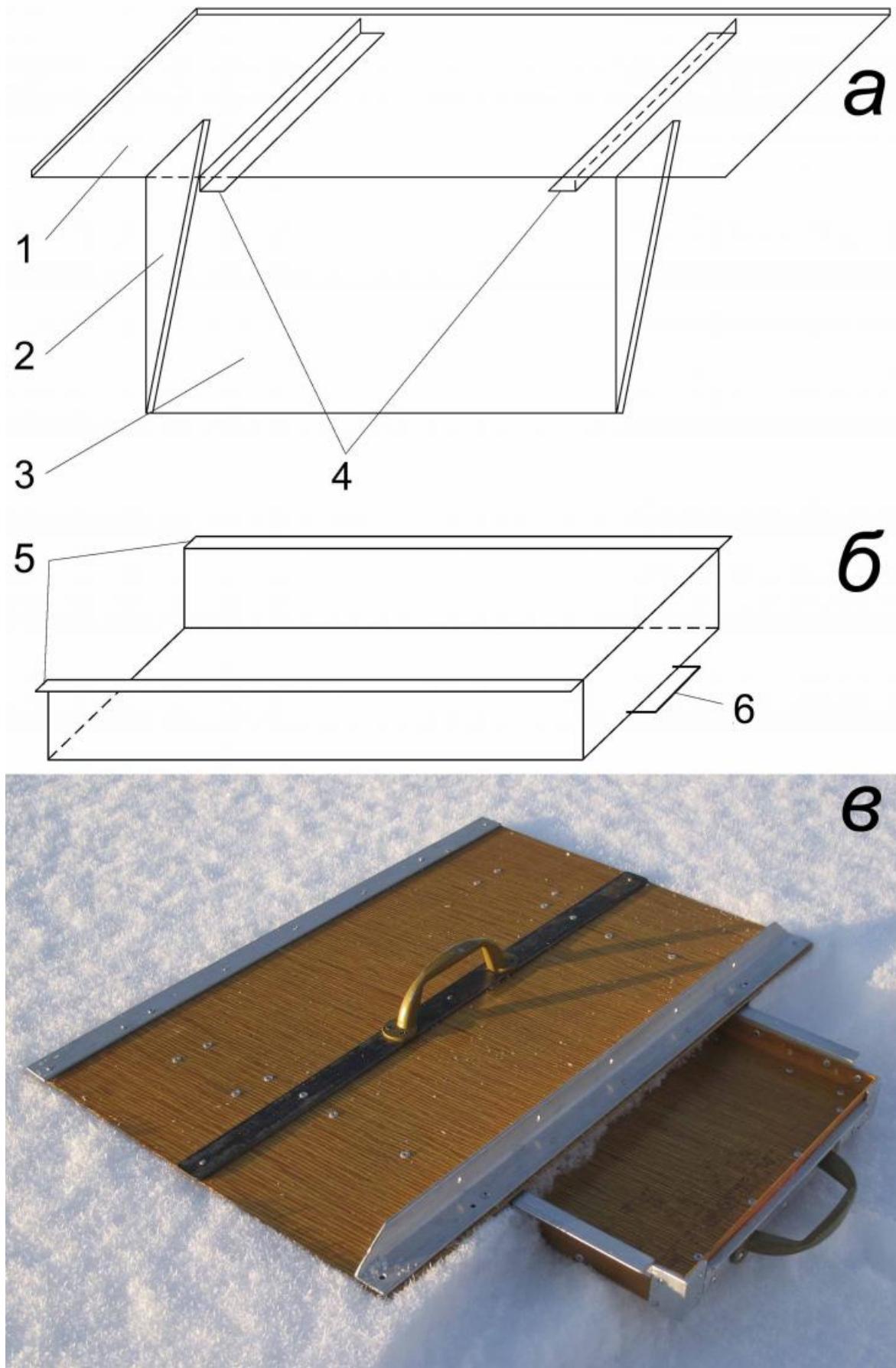


Рис. 1. Устройство (снегоугольник) для отбора поверхностных проб снега и поверхности изморози (а – угольник, б – нож-лоток) и пример его использования (в): а) 1, 2, 3 – пластины снегоугольника, 4 – пазы направляющие для нож-лотка; б) 5 – направляющие в виде выступов для подвижной фиксации нож-лотка с верхней пластиной снегоугольника, 6 – ручка нож-лотка

Figure 1. A device (a snow angle) for surface snow sampling (a - an angle, b - a knife-tray) and an example of its use (c). Legend: a) 1, 2, 3 - plates of angle, 4 - guide grooves for the knife-tray; b) 5 - guides in the form of protrusions for the knife-tray movable fixation with the upper plate of the angle, 6 - a knife-tray handle

Необходимо заметить, что плотность поверхностной изморози очень низка и колеблется от 0,02 до 0,04 г/см³. Поэтому чтобы набрать нужный объем для одной пробы достаточно, например, для гидрохимического анализа, следует операцию повторить 11 раз. На рис. 2 показана площадка, на которой выполняется пробоотбор поверхности изморози для последующего определения в ней полициклических ароматических углеводородов.

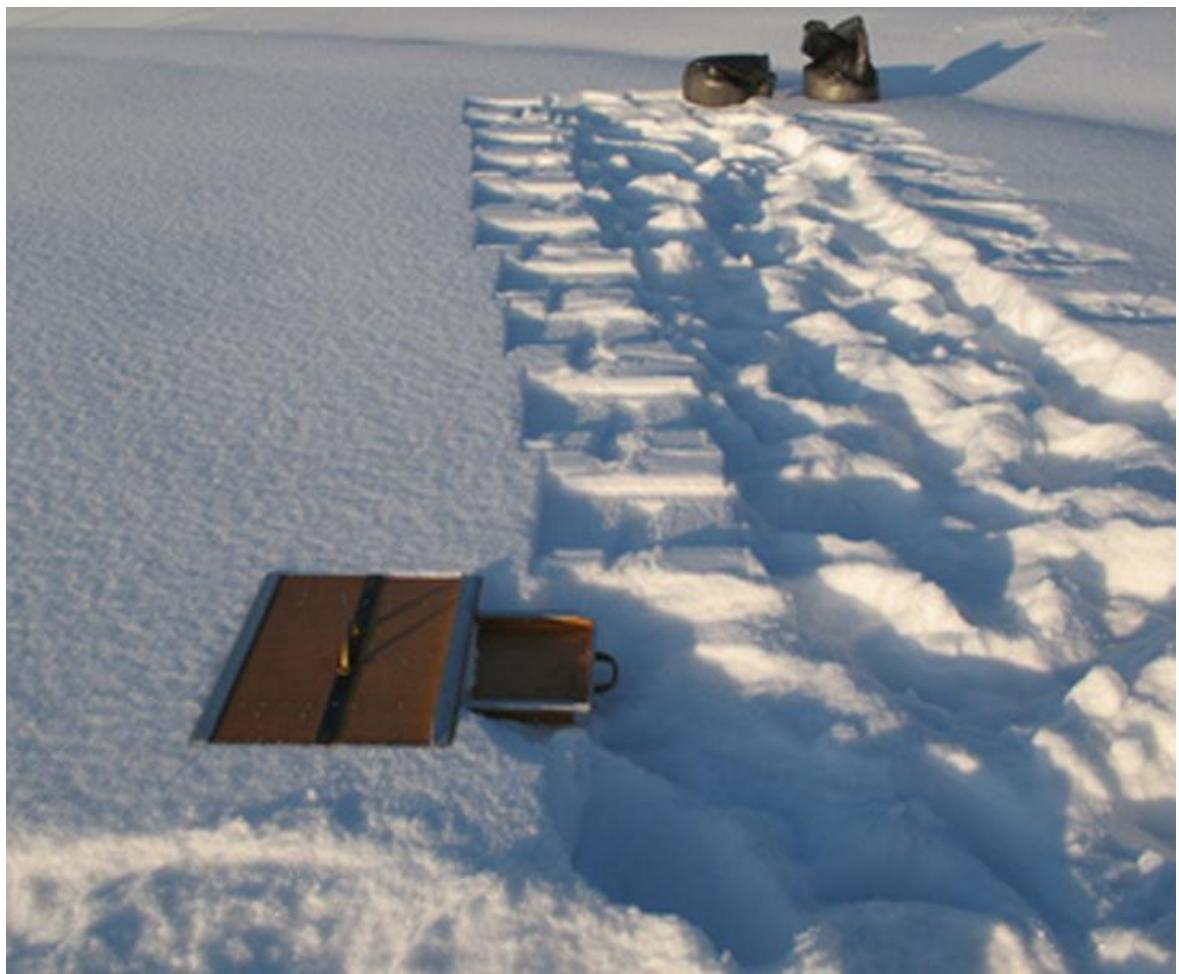


Рис. 2. Отбор проб поверхности изморози для гидрохимического анализа (пояснение в тексте)

Figure 2. Sampling of surface frost for hydrochemical analysis (explanation in the text)

Между тем, для выполнения гранулометрического анализа нужный объем снеговой воды составил всего 50 мл. Для характеристики размеров частиц в пробах использовали лазерный анализатор ZetaSizer Nano ZS (Malvern Panalytical, Великобритания). Диапазон измерения размеров частиц составляет от 1 до 10000 нм. По каждой пробе проводилось шесть измерений среднего объемного диаметра частиц ($D_{cp.}$, нм) (среднего диаметра по объемному распределению частиц). По каждому измерению оптимальное время накопления корреляционной функции определялось программным обеспечением прибора автоматически. После проводилось их усреднение. Соотношение размеров частиц показано в виде гистограмм распределения (рис. 3), имеющих ряд максимумов, каждый

из которых отражает объемное содержание фракций частиц. Объемное содержание фракций частиц в образцах рассчитано интегрально по соотношению (%) площади фигур, описывающих данные распределения частиц по размерам в линейных координатах.

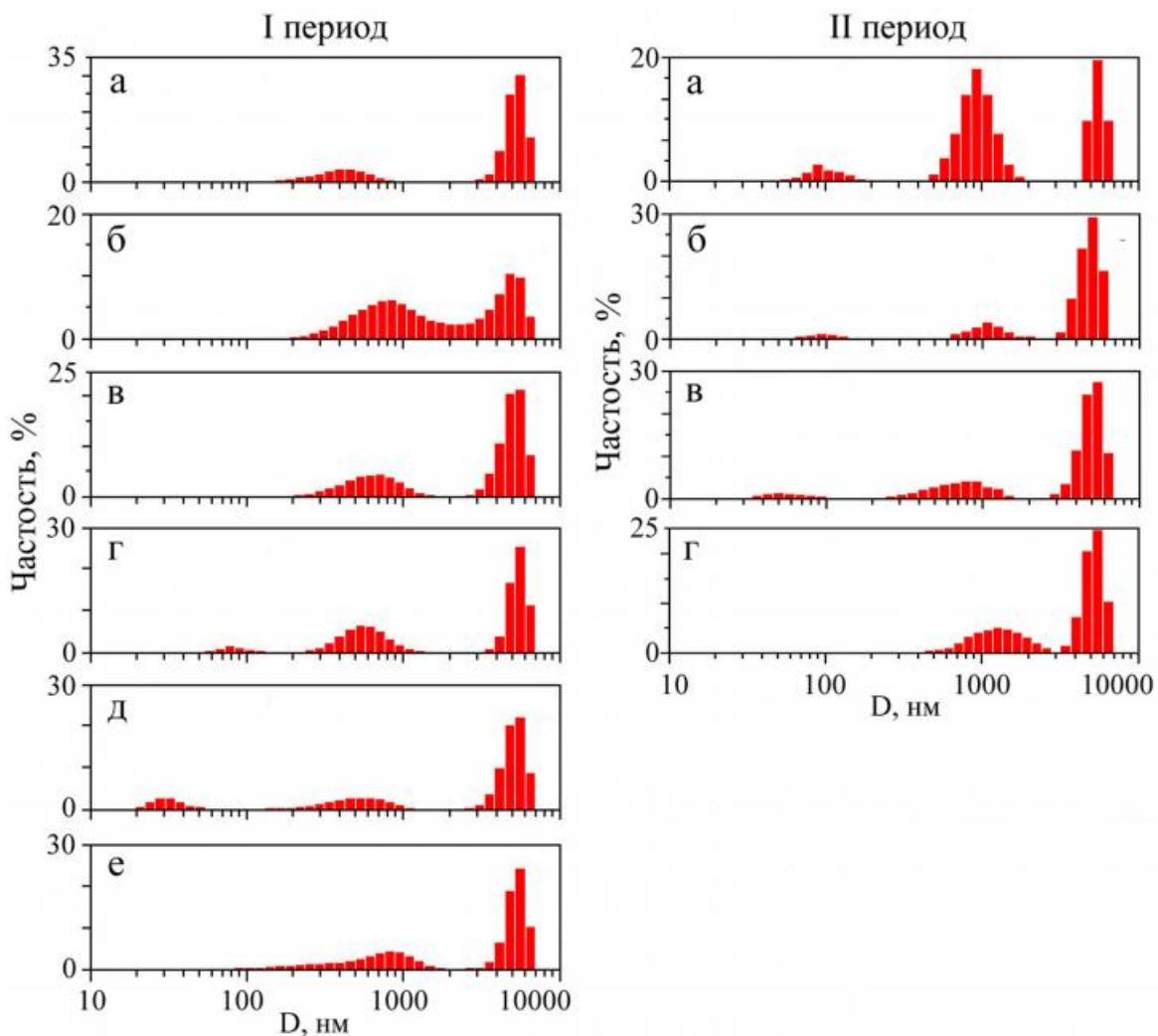


Рис. 3. Частотное распределение аэрозольных частиц по размерам в разные периоды наблюдений: в снежных осадках (I,а, I,б, I,в, I,е, II,г) и поверхностной изморози (I,г, I,д, II,а, II,б, II,в)

Figure 3. Frequency distribution of aerosol particles by size in different observation periods: in snow precipitation (I,a, I,b, I,c, I,e, II,d) and surface frost (I,d, I,e, II ,a, IIb, II, c)

Результаты и обсуждение

Частотное распределение частиц по размерам в свежевыпавшем снеге. Во время наблюдений таких проб получено пять, из которых четыре взято в первый период и одна во второй. В первой пробе, взятой 26.02.2020 г., распределение частиц бимодальное (рис. 3, I,а) со значительной дисперсией и отражает наличие двух совокупностей (фракций). Первая с модой 447 ± 166 нм фиксируется в интервале 200–1000 нм, тогда как вторая со значением моды 5144 ± 780 нм и отделенная от первой широким разрывом, лежит в узком интервале (3000–7000 нм) с хорошо выраженным пиком в области 5000–6000 нм. В соотношении фракций преобладает доля крупных частиц (78 % против 22). Второй пробоотбор выполнен 28.02.2020 г. Распределение частиц во второй пробе отражает две совокупности (рис. 3, I,б). Для первой значение моды составляет 694 ± 268 нм, а для второй – 4996 ± 851 нм. Доли первой и второй фракций составляют 57 и 43 %

соответственно. Необходимо отметить, что в данном слое, сформировавшемся в условиях непрерывного снегопада, не произошло образования изолированных фракций, как в предыдущем случае. Тогда при отборе проб шел дождь с мокрым снегом. *Третий пробоотбор* произведен 02.03.2020 г. Накопление слоя шло в условиях слабого снегопада, который начался накануне. Распределение частиц по размерам, как и в предыдущих образцах свежевыпавшего снега, бимодальное (рис. 3, I,в). Первая совокупность выделяется в интервале 200–1500 нм с модой 642 ± 233 нм, тогда как вторая залегает в интервале от 3000 до 7000 нм с модой 4997 ± 862 нм. В соотношении фракций доля крупных частиц больше, чем мелких (65% и 35 соответственно). *Четвертый пробоотбор* свежевыпавшего снега выполнен 06.03.2020 г. Шел мокрый снег с дождем. Распределение частиц в четвертой пробе явно отражает две совокупности (рис. 3, I,е). Первая лежит в интервале 150–2000 нм с модой 639 ± 350 нм, а вторая – 3500–7000 нм с модой 5067 ± 821 нм. В соотношении фракций сильно преобладает доля крупных частиц (75 % против 25). *Пятый пробоотбор* свежевыпавшего снега произведен 26.03.2020 г. Характер осадков – сильный снег с дождем. Распределение частиц по размерам бимодальное (рис. 3, II,г). Первая совокупность выделяется в интервале 400–3000 нм с модой 2100 ± 742 нм, тогда как вторая залегает в интервале от 3000 до 7000 нм с модой 5111 ± 817 нм. В соотношении фракций доля мелких несколько больше (54% и 46 соответственно).

В целом, можно отметить, что в характере распределения частиц по размерам во всех пробах свежевыпавшего снега выделяются общие черты. Во-первых, во всех пробах фиксируется бимодальное распределение частиц, обусловленное наличием двух совокупностей. Во-вторых, в распределении частиц по размерам наблюдается устойчивая привязка совокупностей к определенным интервалам размерной шкалы. Одна регистрируется в интервале 200–3000 нм, а другая – 3000–7000. В-третьих, в проанализированных пробах устойчиво преобладает доля крупных частиц (3000–7000 нм), которая возрастает в условиях выпадения мокрого снега с дождем.

Частотное распределение частиц по размерам в поверхностной изморози, образовавшейся в перерыве между снегопадами. В ходе наблюдений таких проб получено пять, из которых две взято в первый период и три во второй. *Первый пробоотбор* изморози выполнен 04.03.2020 г. Распределение частиц характеризуется значительной дисперсией и отражает присутствие трех фракций (рис. 3, I,г). Первая фиксируется в интервале 40–120 нм с модой 99 ± 23 , вторая отделена от первой небольшим разрывом и расположена в районе 250–1200 нм с модой 658 ± 234 . Третья совокупность с большим разрывом отделена от второй и лежит в узком интервале 3000–7000 нм с модой 5216 ± 748 . Доли трех фракций составляют 1, 33 и 66 % соответственно. *Второй пробоотбор* поверхностной изморози осуществлен 05.03.2020 г. Распределение частиц трехмодальное со значительной дисперсией и отражает наличие трех совокупностей (рис. 3, I,д). Интервал размеров частиц для первой фракции от 20 до 50 нм с модой 32 ± 7 . Вторая отделяется от первой большим разрывом, занимая при этом интервал 200–1000 с модой 567 ± 210 нм. Третья совокупность отделена от второй широким разрывом и лежит в интервале значений размеров частиц от 3000 до 7000 нм с модой 4958 ± 875 . Соотношение долей первой, второй и третьей фракций 23, 11 и 66 % соответственно. *Третий пробоотбор* поверхностной изморози осуществлен 23.03.2020 г. Распределение частиц трехмодальное (рис. 3, II,а) со значительной дисперсией и отражает присутствие трех фракций. Первая фиксируется в интервале 50–120 нм с модой 100 ± 24 , вторая отделена от первой небольшим разрывом и расположена в районе 450–1200 нм с модой 908 ± 239 . Третья совокупность также с разрывом отделена от второй и лежит в узком интервале 4500–7000 нм с модой 5590 ± 579 . Доли трех фракций

составляют 5, 65 и 30 % соответственно. Четвертый пробоотбор поверхностной изморози осуществлен 24.03.2020 г. Распределение частиц отражает наличие трех совокупностей, которые в отличие от предыдущих проб несколько смешены в область малых значений (рис. 3, II,б). Интервал размеров частиц для первой фракции от 15 до 50 нм с модой 39 ± 7 . Вторая лежит в интервале 50–200 с модой 93 ± 23 нм. Третья совокупность отделена от второй разрывом и располагается в интервале значений размеров частиц от 500 до 1500 нм с модой 859 ± 161 . Соотношение долей первой, второй и третьей фракций составляет 20, 12 и 68 % соответственно. Пятый пробоотбор изморози произведен 25.03.2020 г. Распределение частиц по размерам, как и в предыдущих образцах изморози, трехмодальное (рис. 3, II,в). Первая совокупность выделяется в интервале 20–100 нм с модой 60 ± 17 . Вторая отделена от первой небольшим разрывом и залегает в интервале от 250 до 1500 нм с модой 712 ± 265 . Третья совокупность фиксируется в интервале 2500–7000 нм с модой 5129 ± 796 . В соотношении фракций сильно преобладает доля крупных частиц (78 % против 19 средних и 3 мелких).

Если сравнить полученные значения с данными по снежным осадкам, можно заметить, что в обоих периодах наблюдений в пробах изморози в дополнение к двум совокупностям частиц с субмикронными размерами фиксируется третья, относящаяся к группе высокодисперсных (коллоидных) частиц. С увеличением продолжительности периода между снегопадами в пробах изморози наблюдается перераспределение частиц между мелкой и средней фракциями в сторону значительного увеличения мелкой, тогда как объемное содержание частиц крупной фракции меняется мало. При этом интервал размеров частиц в третьей фракции уменьшился с 40–120 нм до 20–50.

Механизм выведения тонкодисперсного аэрозольного вещества из приземного воздуха. Предполагается, что выявленные различия в распределении субмикронных фракций аэрозольного вещества в слое свежевыпавшего снега и поверхностной изморози, образующейся в перерывах между снегопадами, связано с различиями в механизме их образования.

Известно, что снежный покров излучает собственное тепло (даже при самой низкой температуре) в виде длинноволновой радиации. Кроме того, снежный покров отличается высокой способностью отражать солнечную радиацию. Это способствует его сильному выхолаживанию и возникновению инверсии температур.[\[16\]](#)

Наряду с этим снежный покров оказывает иссушающее влияние на приземный слой воздуха[\[17\]](#). При наличии градиента температур и влажности снежный покров инициирует нисходящий устойчивый массоперенос водяных паров, увлекающий аэрозольные частицы из приземного слоя воздуха по направлению к снежному покрову. А так как давление насыщенного пара над заснеженной поверхностью всегда меньше, чем в приземном слое воздуха, то это служит дополнительным фактором усиления массопереноса водяных паров по направлению к снежному покрову и активизации стока тонкодисперсных аэрозольных частиц из приземной атмосферы. При этом механизм морозного концентрирования аэрозольного вещества на поверхности снега осуществляется за счет действия молекулярных сил типа вандерваальсовых (адгезии, капиллярной конденсации, физической адсорбции). При контакте дисперсных аэрозольных частиц с поверхностью между ними возникает прослойка капиллярной влаги, образующаяся за счет конденсации паров в жидкость при давлении, которое меньше давления насыщенного пара. Наблюдения за образованием частиц Айткена в камере Вильсона показали[\[18\]](#), что проявление капиллярной жидкости фиксируется уже при относительной влажности воздуха 50%. Именно с ней связывают действие

капиллярных сил и проявление адгезии частиц.^[19] При этом адгезии всегда предшествует адсорбция, которая, в свою очередь, сопровождается изменением концентрации вещества на границе раздела фаз. Отмечается, что процесс идет на различных межфазовых поверхностях и адсорбироваться могут любые вещества.

Механизм конденсирования аэрозольного вещества в твердых гидрометеорах. Известно, что атмосферный лед может возникать и при конденсации водяного пара на поверхности минеральных наночастиц.^[20,21] Конденсационная жидкость в виде скоплений (островков) пленочной влаги накапливается в неоднородностях поверхности наночастиц при относительной влажности воздуха ниже 80%. При этом отмечается, что увеличение толщины пленочной влаги в таких неоднородностях возможно даже в условиях недосыщения.^[22] Тогда, если принять во внимание данное обстоятельство, а также результаты экспериментов Х.Юнге с камерой Вильсона, можно предположить, что накопление аэрозольного вещества при кристаллообразовании поверхностной изморози возможно в широком интервале значений относительной влажности воздуха (от 50% до <80%).

Между тем, исследования термодинамики микрочастиц показали, что размер частицы можно рассматривать как эквивалент температуры; ее размер представляет собой активную переменную, определяющую, наряду с другими термодинамическими переменными, состояние системы и ее реакционную способность (увеличение растворимости, сдвиг химического равновесия).^[22] Следовательно, с увеличением степени дисперсности аэрозольного вещества его растворимость при взаимодействии с облачными каплями будет возрастать.

сопровождается активным стоком «сухого» аэрозольного вещества. Данный процесс, начинаясь в атмосфере в широком интервале недосыщения относительной влажности воздуха (от 50% до <80), продолжается на поверхности снега при образовании ледяных кристаллов поверхностной изморози, который сопровождается накоплением в них сухих аэрозолей. Кстати, именно этим объясняется ранее установленный известный факт о более высоком чем в снеге содержании загрязняющих веществ в изморози.^[23–26] Таким образом, изморозь, кристаллизующаяся на поверхности снега, может служить объектом опробования при выявлении атмосферного загрязнения поверхности снега, в перерывах между снегопадами. Вместе с тем следует заметить, что какое-то наличие связи между разными морфологическими формами ледяных кристаллов изморози и соотношением субдисперсных фракций аэрозольного вещества обнаружить не удалось. Возможно, что они могут проявиться при сравнительном изучении их химического состава. Однако данное предположение требует дополнительной проверки.

В целом же можно отметить, что для территорий с холодным климатом, включая и арктические районы, характеризующихся наличием длительного периода с устойчивым снежным покровом, морозное конденсирование техногенных аэрозолей может быть главным источником аэротехногенного загрязнения снежного покрова между снегопадами.

Заключение

Выполненные с помощью метода динамического рассеяния света исследования гранулометрического состава аэрозольного вещества в твердых гидрометеорах, различавшихся по механизму образования (свежевыпавший снег и поверхностная изморозь, образующаяся в перерывах между снегопадами) показали, что во всех пробах свежевыпавшего снега фиксируется бимодальное распределение частиц. Отмечено

также, что в них устойчиво преобладает доля крупных частиц (3000–7000 нм), которая возрастает в условиях выпадения мокрого снега с дождем. В пробах же поверхностной изморози устойчиво фиксируется наличие трех совокупностей. При этом важно заметить, что с увеличением продолжительности периода между снегопадами в пробах изморози наблюдается перераспределение частиц между мелкой и средней фракциями в сторону значительного увеличения мелкой, при чем объемное содержание частиц крупной фракции меняется мало.

Появление третьей фракции аэрозольного вещества в поверхностной изморози связано с особенностями механизма выведения тонкодисперсного аэрозольного вещества из приземного воздуха в перерывах между снегопадами, а их накопление – особенностями проявления действия капиллярных сил и адгезии частиц при кристаллообразовании изморози (мы предлагаем называть данный эффект *морозная конденсация*). Механизм морозной конденсации обусловлен тем, что снежный покров вызывает выхолаживание и иссушение приснежного слоя воздуха. В результате над поверхностью снега возникает градиент температур и влажности. Это, в свою очередь, инициирует нисходящий устойчивый массоперенос водяных паров, увлекающие аэрозольные частицы из приземного слоя воздуха по направлению к снежному покрову. При этом контакт аэрозольной частиц с поверхностью растущих ледяных кристаллов поверхностной изморози осуществляется за счет действия молекулярных сил типа вандерваальсовых (адгезии, капиллярной конденсации, физической адсорбции).

Проявление морозной конденсации возможно при более низких значениях относительной влажности воздуха (от 50% до <80), чем это требуется для выпадения снега (от 80 до 100%). Причем обстоятельства благоприятные для кристаллообразования поверхностной изморози возникают чаще, чем для выпадения снега. Следовательно, изморозь, образующаяся на поверхности снега, может служить объектом опробования при выявлении пылеаэрозольного загрязнения снега в перерывах между снегопадами.

Следует заметить, что рассмотренный механизм фракционирования аэрозольного вещества в твердых гидрометеорах одинаково проявляется и в условиях южной тайги Западной Сибири (Обь-Томское междуречье, ключевые участки в обсерватории «Фоновая и на научном полигоне в пригороде Томска – «Большой Экспериментальный Комплекс» – БЭК), и в пределах среднетаежной зоны Мезенско-Вычегодской равнины (ключевой участок «Ботсад СГУ» в зеленой пригородной зоне г. Сыктывкара), и в приморских тундрах Нижнего Припечорья (ключевые участки в пределах нефтяного месторождения им. Р.Требса, Большеземельская тundra).

Библиография

1. Mahowald N. M., Kloster S., Engelstaedter S., Moore J. K., Mukhopadhyay S., McConnell J. R., Albani S., Doney S. C., Bhattacharya A., Curran M. A. J., Flanner M. G., Hoffman F. M., Lawrence D. M., Lindsay K., Mayewski P. A., Neff J., Rothenberg D., Thomas E., Thornton P. E., Zender C. S. Observed 20th century desert dust variability: impact on climate and biogeochemistry // Atmos. Chem. Phys. 2010. N 10. P. 10875–10893. <https://doi.org/10.5194/acp-10-10875-2010>.
2. Ивлев Л.С. Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 5. С. 392–410.
3. Ермаков А.Н., Ларин И.К., Угаров А.А., Пурмаль А.П. О катализе железа и окисления SO₂ в атмосфере // Кинетика и катализ. 2003. Т. 44. № 4. С. 524–537.
4. Гершензон Ю.М., Пурмаль А.П. Гетерогенные процессы в земной атмосфере и их

- экологические последствия // Успехи химии. 1990. Т. 59. Вып. 11. С. 1729–1756.
5. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 1. Образование, свойства аэрозоля и их трансформация // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. № 1. С. 5–22.
 6. Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Барашкевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
 7. Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Егоров А.Д., Ищенко М.А., Пономарев Ю.Ф., Синькович А.А., Сталевич Д.Д., Степаненко В.Д., Хворостовский К.С. Исследование влажного вымывания аэрозольных частиц облаками и осадками // Метеорология и гидрология. 1999. № 8. С. 5–13.
 8. Berne B.J., Pecora R. Dynamic Light Scattering. John Wiley and Sons Ltd. 1976. 376 p.
URL: <https://doi.org/10.1002/bbpc.19770810123>
 9. Селяев В.П., Неверов В.А. Аппаратура и методы исследования дисперсных систем // Инновационное образование. Изд-во Национальный исследовательский Мордовский гос. ун-т, Саранск. 2013. № 4(7). С. 71–120.
 10. Хархардин А.Н., Сулейманова Л.А., Строкова В.В. Топологические свойства полидисперсных смесей и составляющих их фракций по результатам ситового и лазерного анализа гранулометрии // Известия вузов. Строительство. 2012. № 11–12. С. 114–124.
 11. Кочегаров И.И., Трусов В.А., Юрков Н.К. Методы контроля дисперсных порошков // Тр. Международного симпозиума «Надежность и качество». Изд-во Пензенского гос. ун-та. Пенза. 2010. Т. 2. С. 475–477.
 12. Ешманова С.В. Промышленный контроль формы и размера частиц лекарственных субстанций // Фармацевтические технологии и упаковка. Лекарства по GMP. 2009. <http://medbusinesss.ru/365.php> (дата обращения 22.01.2023).
 13. Голохваст К.С., Соболева Е.В., Никифоров П.А., Христофорова Н.К., Гульков А.Н. Анализ нано- и микрочастиц в снеге г. Уссурийск // Вода: химия и экология. 2012. № 11(53). С. 108–112.
 14. Голохваст К.С., Ревуцкая К.С., Лонкина Е.С., Никифоров П.А., Гульков А.Н., Христофорова Н.К. Гранулометрический анализ взвешенных частиц в снеге г. Биробиджана и государственного заповедника «Бастак» // Вода: химия и экология. 2013. № 2(56). С. 116–123.
 15. Василевич М.И., Василевич Р.С., Михайлов В.И., Кривошапкин П.В. Оценка свойств атмосферных взвесей в снеге фоновых территорий таежной зоны Европейского северо-востока России // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 2. С. 184–190.
 16. Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.: Изд-во АН СССР, 1945. 120 с.
 17. Рихтер 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.
 18. Юнге, Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. Пер. с англ. под ред. Ю.А. Израэля. М.: Мир, 1965. 424 с.
 19. Cort A., Scot T.M. Atmospheric nanoparticles // Rev. Mineral. Geochem. 2001. V. 44,
 20. Зимон А.Д. Что такое адгезия. М.: Наука, 1983. 176 с.1. Р. 293–349. DOI: [10.2138/rmg.2001.44.08](https://doi.org/10.2138/rmg.2001.44.08).
 21. Голубев В.Н. Роль аэрозольных частиц в зарождении атмосферного льда // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. С. 19–28.

22. Юшкин Н.П. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества и проблемы наноминералогии / Наноминералогия. – СПб.: Наука, 2005. С. 10-61.
23. Berg N., Dunn P., Fenn M. Spatial and temporal variability of rime ice and snow chemistry at five sites in California // Atmospheric Environment. Part A. General Topics. 1991. V. 25(5-6). P. 915-926. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90134-S](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90134-S).
24. Saxena V.K., Yeh R.J.-Y. Temporal variability in cloud water acidity: Physico-chemical characteristics of atmospheric aerosols and windfield // J. Aerosol Science. 1988. V. 19 (1). P. 1207-1210. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(88\)90137-1](https://doi.org/10.1016/0021-8502(88)90137-1).
25. Borys R., Hindman E.E., DeMott P.J. The chemical fractionation of atmospheric aerosol as a result of snow crystal formation and growth // J. Atmospheric Chemistry. 1988. V. 7. P. 213-239. <https://doi.org/10.1007/BF00130931>
26. Hůnová I., Novák M., Kurfürst P., Škálová H., Přechová E., Komárek A., Čuřík J., Veselovský F., Bohdálková L. Contribution of rime to atmospheric sulphur deposition in Central Europe: A combined empirical and modelling approach. Atmospheric Environment. 2022, 270 (1): 118877. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118877>

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, закономерности и особенности механизма фракционирования аэрозольного вещества в твердых гидрометеорах.

Методология исследования, в статье указаны о использовании полевых методов, отбор проб твердых гидрометеоров (снега и поверхностной изморози) с определением в лабораторных работах диапазона размера гранулярных частиц в мерзлых породах, а также анализ литературных данных. Отбор проб с верхнего слоя снега и поверхностной изморози выполняли с помощью специального пробоотборника, а для характеристики размеров частиц использовали лазерный анализатор. Состояние погоды автором в периоды наблюдений анализировалось по данным находящимся в открытом доступе, при этом анализировались температура воздуха, объемы и характер осадков, сила и направление ветра.

Судя по иллюстративным материалу автором предпринятой экспедиционные полевые методы исследования, с последующих камеральной обработкой.

Актуальность затронутой темы безусловна так, как в тропосфере фиксируется увеличение объема пыле-аэрозольной массы, которая за последнее столетие возросла более чем два раза. Рассмотренный механизм фракционирования аэрозольного вещества в твердых гидрометеорах одинаково проявляется и в условиях южной тайги Западной Сибири и в пределах среднетаежной зоны Мезенско-Вычегодской равнины и в приморских тундрах Нижнего Припечорья. В этой связи изучение механизма осаждения твердых метеоров в форме изморози в период отсутствия снегопадов является универсальным механизмом улавливания и абсорбции твердых пылевых частиц на поверхности, что обеспечивает самоочищение атмосферы.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи изучение с помощью метода динамического рассеяния света особенностей распределения субмикронных фракций аэрозольного вещества в твердых гидрометеорах, различающихся по условиям формирования в свежевыпавшем снеге и поверхностной изморози, образующейся в перерывах между снегопадами. Это является важным дополнением в развитии геокриологии.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс образования льда в почве.

Из приведённых автором направлений следует отметить особенно интересный момент благоприятные условия для кристаллообразования поверхностной изморози возникают чаще, чем для выпадения снега. Следовательно, изморозь на поверхности снега может служить объектом опробования при выявлении пылеаэрозольного загрязнения снега в пределах сплошной и островной криолитозоны.

Статья содержит разнообразный интересный иллюстративный материал в форме таблиц, рисунков, диаграмм.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и методические рекомендации по геохимическому анализу особенности грунтов.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.