



## Геохимическая активность снега и послойная изменчивость изотопного состава кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в снежной толще в условиях разной запыленности приземной атмосферы

М. П. Тентюков<sup>1, 4</sup>, Б. Д. Белан<sup>1</sup>, В. П. Лютоев<sup>2</sup>, К. А. Шукуров<sup>3</sup>, Г. А. Ивлев<sup>1</sup>,  
Д. В. Симоненков<sup>1</sup>, М. Ю. Аршинов<sup>1</sup>, А. В. Фофонов<sup>1</sup>, В. И. Михайлов<sup>5</sup>, В. С. Бучельников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения РАН, Томск;

tentukov@yandex.ru, michael@iao.ru, bbd@iao.ru, ivlev@iao.ru, simon@iao.ru, alenfo@iao.ru, victor.buchelnikov@yandex.ru

<sup>2</sup> Институт геологии им. Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; vlutoev@geo.komisc.ru

<sup>3</sup> Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва; shukurov@ifaran.ru

<sup>4</sup> Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар

<sup>5</sup> Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; system14@rambler.ru

Исследовано послойное распределение изотопного состава ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в снежной толще в условиях разной запыленности приземной атмосферы на территории двух научных полигонов ИОА СО РАН: обсерватории «Фоновая» и пригородного полигона «БЭК» (г. Томск). Межслойные различия изотопных характеристик и активность снегохимических реакций оценивали в сопряжении с анализом дисперсного состава осевшего аэрозольного вещества, радиационной прозрачности снега в УФ-диапазоне и с учетом обратных траекторий переноса воздушных масс. Установлены межслойные колебания значений  $\delta^{18}\text{O}$ , вариативность которых возрастает в слоях, приуроченных к термодиффузионному геохимическому барьеру. Высказано предположение, что вследствие геохимической активности снега и его ультрафиолетовой прозрачности, а также при наличии железосодержащих пылеаэрозольных частиц в снежной толще возникают условия, инициирующие фотоактивированные снегохимические реакции. Их протекание может сопровождаться свободнорадикальным окислением осевшего аэрозольного вещества и образованием стабильных продуктов фотореакции, о чем, возможно, свидетельствуют установленные постседиментационные межслойные различия в изотопной стратификации снежной толщи.

**Ключевые слова:** аквакомплексы железа, аэрозоли, динамическое рассеяние света, изотопы кислорода, кристаллогидраты, ультрафиолетовая прозрачность снега, снежный покров, снегохимические реакции, траекторный анализ.

## Geochemical activity of snow and layer-by-layer variability of the isotope ratio ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in the snow mass under conditions of the different surface atmosphere dustiness

M. P. Tentyukov<sup>1, 4</sup>, B. D. Belan<sup>1</sup>, V. P. Lyutoev<sup>2</sup>, K. A. Shukurov<sup>3</sup>, G. A. Ivlev<sup>1</sup>,  
D. V. Simonenkov<sup>1</sup>, M. Yu. Arshinov<sup>1</sup>, A. V. Fofonov<sup>1</sup>, V. I. Mikhailov<sup>5</sup>, V. S. Buchelnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch RAS, Tomsk

<sup>2</sup> Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

<sup>3</sup> A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow

<sup>4</sup> Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar

<sup>5</sup> Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The layered distribution of the isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in the snow mass under conditions of different dust pollution of the near-surface atmosphere was studied on the territory of two scientific test sites of the IAO SB RAS: the Fonovaya observatory and the suburban BEK test site (Tomsk). Interlayer differences in isotopic characteristics and the activity of snow chemical reactions were evaluated in conjunction with the analysis of the dispersed composition of the precipitated aerosol substance, the radiation transparency of snow in the UV range, and taking into account reverse trajectories of air mass transfer. Interlayer fluctuations in  $\delta^{18}\text{O}$  values were established, the variability of which increased in layers confined to the thermal diffusion geochemical barrier. We suggested that due to the geochemical activity of snow and its ultraviolet transparency, as well as the presence of iron-containing dust-aerosol particles in the snow mass, conditions arose that initiated photoactivated snow-chemical reactions. Their occurrence may be accompanied by free radical oxidation of the precipitated aerosol matter and the formation of stable photoreaction products, which may be evidenced by the established post-sedimentary interlayer differences in the isotope stratification of the snow mass.

**Keywords:** iron aquacomplexes, aerosols, dynamic light scattering, oxygen isotopes, crystalline hydrates, ultraviolet transparency of snow, snow cover, snow chemical reactions, trajectory analysis.

**Для цитирования:** Тентюков М. П., Белан Б. Д., Лютоев В. П., Шукуров К. А., Ивлев Г. А., Симоненков Д. В., Аршинов М. Ю., Фофонов А. В., Михайлов В. И., Бучельников В. С. Геохимическая активность снега и послойная изменчивость изотопного состава кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в снежной толще в условиях разной запыленности приземной атмосферы // Вестник геонаук. 2022. 10(334). С. 49–62. DOI: 10.19110/geov.2022.10.6

**For citation:** Tentyukov M. P., Belan B. D., Lyutoev V. P., Shukurov K. A., Ivlev G. A., Simonenkov D. V., Arshinov M. Yu., Fofonov A. V., Mikhailov V. I., Buchelnikov V. S. Geochemical activity of snow and layer-by-layer variability of the isotope ratio ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in the snow mass under conditions of the different surface atmosphere dustiness. 2022, 10(334), pp. 49–62, doi: 10.19110/geov.2022.10.6

## Введение

Известен устойчивый интерес к постседиментационным изменениям изотопного состава выпавших твердых осадков, который пока недостаточно освещен в современных публикациях [3, 5, 39]. В то же время существующие представления характеризуют все изменения изотопного состава в выпавшем снеге в основном двумя процессами: 1) сглаживанием вариаций изотопного сигнала из-за диффузии молекул в поровом пространстве ледяной матрицы без изменения среднего значения изотопного состава для всей снежно-фирновой толщи [28, 29]; 2) изменением изотопного состава в снежном покрове в результате фазовых переходов воды при массообмене между снегом и водяным паром атмосферы [39]. При этом влияние снегохимических реакций с участием осевшего аэрозольного вещества на постседиментационное изотопное фракционирование не рассматривается.

Между тем осевшее аэрозольное вещество усиливает поглощение солнечного излучения в видимом диапазоне и, как следствие, увеличивает температуру поверхности загрязненного снега [25, 27, 35]. Другими словами, минеральная фракция аэрозольного вещества, являясь основной рассеивающей свет компонентой в атмосфере, на поверхности снега становится поглощающей. Процесс сопровождается повышением температуры поверхности снежного покрова и ускоренным его таянием. В связи с этим можно предположить, что на постседиментационное изотопное фракционирование в снежном покрове может влиять и аэрозольное вещество, аккумулированное в снежной толще. Его влияние в снежной толще может контролироваться физическими свойствами снежного покрова и его геохимической активностью.

Актуальность исследований обусловлена тем, что с развитием производственной деятельности появились новые, неприродные источники тонкодисперсного минерального вещества, по активности сопоставимые с природными. Главным их отличием является постоянный рост интенсивности, сопровождающийся увеличением пылеаэрозольной массы [12], объем которой за последние сто лет в тропосфере возрос почти в два раза [31].

В связи с этим цель данной работы — охарактеризовать особенности послонной динамики постседиментационных вариаций  $\delta^{18}\text{O}$  с учетом физических свойств снега, его геохимической активности и стратиграфической структуры снежного покрова, формирующегося в пределах фоновой и городской территорий в условиях разной запыленности приземной атмосферы.

## Методика

Зимой 2021–2022 г. были выполнены снегомерная съемка и пробоотбор снега для анализа послонной изменчивости интегральных геохимических показателей и изотопного состава снега на ключевых участках, заложенных на научных полигонах ИОА СО РАН, различающихся по своей пылевой нагрузке, — обсерватории «Фоновая» (60 км западнее г. Томска) и базовом экспериментальном комплексе «БЭК» (восточная окраина г. Томска). Для оценки динамики выпадения снегопадов в период формирования снежного покрова на указанных участках привлекались данные, находящиеся в открытом доступе (<https://rp5.ru>). При описании стратиграфии снежного покрова

учитывалось наличие ветровых уплотнений в снежной толще, следов оттепелей, сублимационных преобразований снежных зерен при перекристаллизации.

Пробоотбор осуществляли с помощью специального снегоотборника [20]. Подготовка проб к анализу в день отбора заключалась в их взвешивании и расчете плотности снега ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>). Затем пробы снега растапливали при комнатной температуре. В полученных пробах снеговой воды значения водородного показателя (pH) определяли потенциометрическим, а удельную электропроводность ( $\eta$ , мкСм/см) — кондуктометрическим методами.

Оптическую плотность ( $A_{210\text{ нм}}$ ) проб снеговой воды в УФ-диапазоне определяли на спектрофотометре Solar PB2201 (раствор сравнения — деионизированная вода). Для сопоставления оптической плотности разных образцов выбрана длина волны 210 нм, поскольку при сравнении оптической плотности в интервале спектра с 200 до 700 нм оказалось, что дисперсные частицы и растворимые компоненты лучше рассеивают именно короткие волны.

Оценка оптической прозрачности снега в УФ-диапазоне выполнена с помощью специального метода ультрафиолетовой (УФ) дозиметрии с применением искусственных нанокристаллов периклаза (MgO). Метод заключается в экспонировании в снежной толще специальных фоточувствительных элементов УФ-дозиметра, представляющих собой кварцевые ампулы с искусственными нанокристаллами периклаза, с последующей ЭПР-регистрацией в них фотостимулированного перехода  $\text{Mn}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ , возникающего под воздействием ультрафиолета [21]. Для интеркалибровки экспериментальных результатов по УФ-прозрачности снега, полученных с помощью ЭПР-регистрации, использовались расчетные методы.

Послойный гранулометрический анализ аэрозольного вещества, аккумулированного в снежной толще, выполнен с помощью метода динамического рассеяния света (ДРС) с использованием лазерного анализатора ZetaSizer Nano ZS (Malvern Panalytical, Великобритания). При проведении гранулометрического анализа по каждому измерению объемного распределения частиц по размерам оптимальное время накопления корреляционной функции определялось программным обеспечением прибора автоматически. Объемное содержание фракций наночастиц в образцах рассчитано интегрально по соотношению (%) площади фигур, описывающих данные распределения частиц по размерам в линейных координатах.

Сравнительную оценку запыленности приземного аэрозоля на фоновой и городской территориях проводили параллельно со снегомерной съемкой с применением аэрозольных спектрометров Grimm 1.108 и Grimm 1.109 [38], установленных соответственно в обсерватории «Фоновая» и Академгородке, 2 км от «БЭК». Измерения счетной концентрации аэрозольными спектрометрами производились ежечасно в течение 10 минут с предварительной продувкой 3 минуты. Концентрация приземного аэрозоля измеряется в воздушных потоках, изокинетично отбираемых из аэродинамических воздухозаборных труб на высоте 4.5–5.5 м. Расход воздушного потока в спектрометре составляет 1.2 л/мин. Для сопоставимости измеряемых данных расчет суммарной счетной концентрации учитывали от нижнего порога измерения дисперсности 0.3 мкм более грубого спектрометра Grimm 1.108.



Траекторный анализ переноса воздушных масс при формировании зимнего аэрозольного поля над точками наблюдения осуществлялся с использованием массивов 10-суточных обратных траекторий, рассчитанных по методике [33] с помощью траекторной модели NOAA HYSPLIT\_4 [24] и сеточных метеополей NCEP/NCAR Reanalysis [30] для слоев 100–2100 м над обеими станциями — «Фоновой» и «Академгородок-БЭК». Восстановление поля региональной вероятности переноса воздуха над поверхностью к станциям, Р [%], проводилось по методике [34]. В рамках данной методики для каждой из двух точек были рассчитаны 10-суточные обратные траектории воздушных частиц и получены диаграммы, характеризующие региональную вероятность переноса воздушных частиц в пограничном слое над поверхностью при движении к точкам наблюдения, в данном случае к обсерватории «Фоновая» и г. Томску. При расчете учитывались траектории только тех воздушных частиц, для которых над обсерваторией «Фоновая» и пригородным полигоном «БЭК» относительная влажность воздуха  $r_0 > 90\%$  и температура воздуха  $T_0 < 0^\circ\text{C}$ . Таких траекторий из первоначального массива оказалось 19 000. При выборе траекторий для построения диаграмм учитывалось также, что если в течение последнего часа до прибытия на конечные точки (на «Фоновую» и «БЭК») удельная влажность воздуха,  $q$  [г/кг], уменьшилась, то, следовательно, над конечными точками выпадали осадки, и эти траектории включались в пул расчетов. Поскольку и влага, и аэрозоль (кроме аэрозоля, образующегося в атмосфере из парогазовой фракции) попадают в нижнюю тропосферу из атмосферного пограничного слоя (АПС), а оттуда — на поверхность, то для каждого временного интервала строилась диаграмма вероятности переноса по тем участкам траекторий, которые находились в региональном атмосферном пограничном слое.

Изотопный анализ кислорода выполнен на масс-спектрометре DELTA V Advantage (Thermo Fisher Scientific, Бремен, Германия). Анализ проводился методом изотопного уравнивания с  $\text{CO}_2$ . Результаты установления концентраций кислорода-18 измерены в виде отклонения от стандарта средней океанической воды V-SMOW (Vienna Standard Mid-Ocean Water) и выражены в значениях  $\delta^{18}\text{O}$  (‰):  $\delta^{18}\text{O} = \left[ \frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{образца}}}{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{стандарта}}} - 1 \right] \times 1000$  ‰. Для контроля качества измерения и калибровки использовался стандарт V-SMOW. Средняя точность измерений ~ 0.2 ‰.

## Результаты и их обсуждение

Особенности нарастания снежного покрова в начале зимы 2021–2022 г. Начало формирования снежного покрова на обоих участках было интенсивным. Обильные снегопады обеспечили его быстрый прирост (рис. 1). Но затем наступило потепление. Снег уплотнился, высота снежной толщи уменьшилась. Сильнее это проявилось на обсерватории «Фоновая». Начиная со второй декады ноября и до конца месяца нарастание снежного покрова возобновилось. Но потом всю первую декаду декабря снегопады стали редкими. Темпы нарастания снежного покрова снова снизились. При этом высота снежной толщи за счет уплотнения снега снова несколько уменьшилась.

Стратиграфия снежной толщи. Прежде отметим, что главным текстурным признаком снежной толщи является

слоистость, а элементарной стратиграфической единицей — слой снегонакопления. Такой слой образуется при интенсивности снегопада 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 свежеснегавшего снега испаряется менее чем за сутки [6, 10].

Для выявления структурного строения снежной толщи и выполнения пробоотбора на обоих участках были заложены снежные разрезы. Необходимо отметить, что во время работ (06.12.2021 г.) высота снежного покрова на снегомерном пункте на обсерватории «Фоновая» составила 29 см, на площадке «БЭК» — 32. На обеих площадках в снежном профиле выделяются три стратиграфических слоя (рис. 1). Самый верхний слой характеризуется наличием первичной текстуры в виде внутренней слоистости, сформированной в результате постседиментационных преобразований стратиграфически значимых снегопадов.

В данном 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. Граница между двумя верхними слоями слабо выражена. Третий слой текстурно однородный и сложен непрозрачными округлыми агрегатами из снежных зерен (RGlr), размер которых с глубиной увеличивается от 1 до 2 мм.

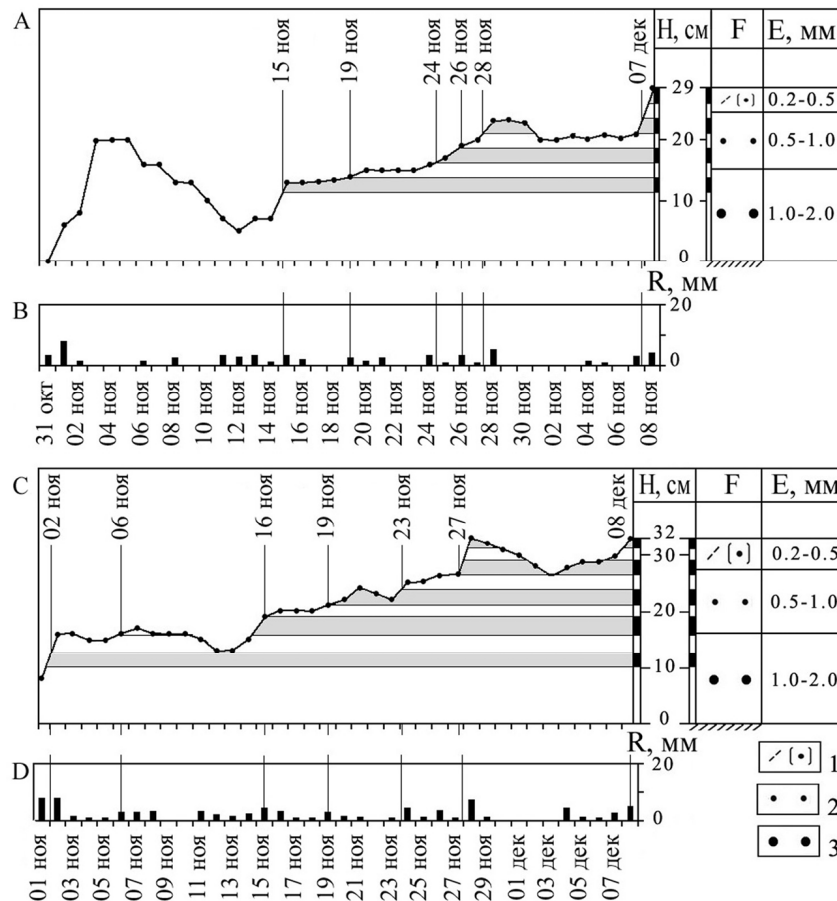
Плотность снежной толщи. Для снегомерных участков «Фоновая» и «БЭК» интервал колебаний значений плотности составил  $0.06\text{--}0.25$  и  $0.07\text{--}0.28 \text{ г/см}^3$  соответственно (рис. 2).

Скачкообразное изменение плотности в верхней части снежного разреза на «Фоновой» может быть связано с ветровым уплотнением снежной поверхности и постседиментационными преобразованиями верхней части снежной толщи в период между последними снегопадами, который для «Фоновой», в отличие от «БЭК», оказался продолжительнее на два дня (рис. 1, В и D).

Электропроводность снеговой воды. Анализ послыного распределения значений данного интегрального геохимического показателя выявил в обоих случаях наличие пика, приуроченного к горизонту с мелкозернистым снегом. Для «Фоновой» его величина составила  $13 \text{ мкСм/см}$  (рис. 2, А), а для «БЭК» —  $23 \text{ мкСм/см}$  (рис. 2, В). При этом колебания значений электропроводности для участков «Фоновая» и «БЭК» составили  $5\text{--}13$  и  $6\text{--}23 \text{ мкСм/см}$  соответственно. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что снежный покров в пределах площадки «БЭК» отличается более высоким содержанием растворимых соединений, чем на «Фоновой». При этом увеличение сигнала в средней части снежной толщи, которое фиксируется на обеих площадках, индицирует положение термодиффузионного геохимического барьера.

## Механизм образования термодиффузионного геохимического барьера в снежной толще

Известно, что снежный покров в любых условиях, даже при самой низкой температуре, излучает длинноволновую радиацию (собственное тепло), а также имеет высокую способность отражать солнечную радиацию. Последнее способствует сильному выхолаживанию снежного покрова и возникновению инверсии температур («снеговая инверсия» [17]). Кроме того, поверхность снежного покрова



**Рис. 1.** Временной ряд интенсивности нарастания снежного покрова для обсерватории «Фоновая» (А) и пригородного полигона «БЭК» (В) в сопряжении со слоями геохимического опробования снежной толщи на «Фоновой» (С) и «БЭК» (D), хронологически привязанных к датам выпадения стратиграфически значимых снегопадов (по данным м/с «Верещагино» для обсерватории «Фоновая» и по данным м/с «Томск» для пригородного полигона «БЭК»)

Условные обозначения: H, см — высота снежного покрова и величина пробоотбора снежных слоев, F — форма снежных зерен (классификация дана по работе [23]): 1 — недавно отложенный снег (DFbk) с округлыми зернами (RGsr), 2 — мелкозернистый снег (RGsr), 3 — мелко- и среднезернистый снег, сложенный непрозрачными округлыми агрегатами из снежных зерен (RGl); E, мм — размер снежных зерен

**Fig. 1.** Time series of snow cover growth intensity for the Fonovaya Observatory (A) and the BEC suburban test site (B) along with the layers of snow mass geochemical testing at Fonovaya (C) and BEK (D), chronologically linked to the dates of stratigraphically significant snowfalls (according to the Vereshchagino weather station for the Fonovaya Observatory and Tomsk weather station for the BEK suburban test site)

Legend: H, cm — snow depth and snow layer sampling value, F — shape of snow grains (classification is given according to [23]): 1 — recently deposited snow (DFbk) with rounded grains (RGsr), 2 — fine-grained snow (RGsr), 3 — fine-medium-grained snow is composed of opaque rounded aggregates of snow grains (RGl); E, mm — size of snow grains

не только характеризуется высокой отражательной и излучательной способностью [14], но и оказывает иссушающее влияние на приземный слой воздуха [17]. В условиях наличия градиента температур и влажности снежный покров, вбирая в себя из приснежного слоя воздуха избыток влаги, инициирует нисходящую миграцию воздуха. В результате формируется устойчивый массоперенос водяных паров по направлению к снежному покрову.

В то же время известно, что в сухом снеге при средней плотности 0.28 глубина проникновения суточных колебаний температуры воздуха и связанный с этим градиент температур составляет 30–40 см; на глубине 50 см колебания полностью затухают [14]. Но в нашем случае мощность снежного покрова на участке «Фоновая» только 29 см, а на «БЭК» — 32. Предполагается, что глубина проникновения суточных температурных колебаний воздуха и связанных с ним постседиментационных преобразований твердых осадков в средней части снежной тощи бу-

дет ограничиваться встречным диффузионным массопереносом паров почвенной влаги. Этот процесс возникает в нижней части снежного профиля в результате внутри-снежной температурной инверсии (в подошве снежной толщи температура всегда выше, чем в ее средней части). Возможность развития данных процессов в снежной толще показаны в работах [9, 13, 32, 36, 37]. В результате в зоне контакта этих встречных потоков образуется термодиффузионный геохимический барьер. Его формирование сопровождается активизацией геохимических реакций, протекающих на фоне термометаморфизма снега, о чем свидетельствует совпадение пиков ряда геохимических параметров. Предполагается, что они индицируют положение термодиффузионного геохимического барьера в снежной толще. Заметим, что правильность его определения коррелируется совпадением пиков геохимических параметров, что отражает реальные геохимические процессы, обеспечивающие усиление контраст-

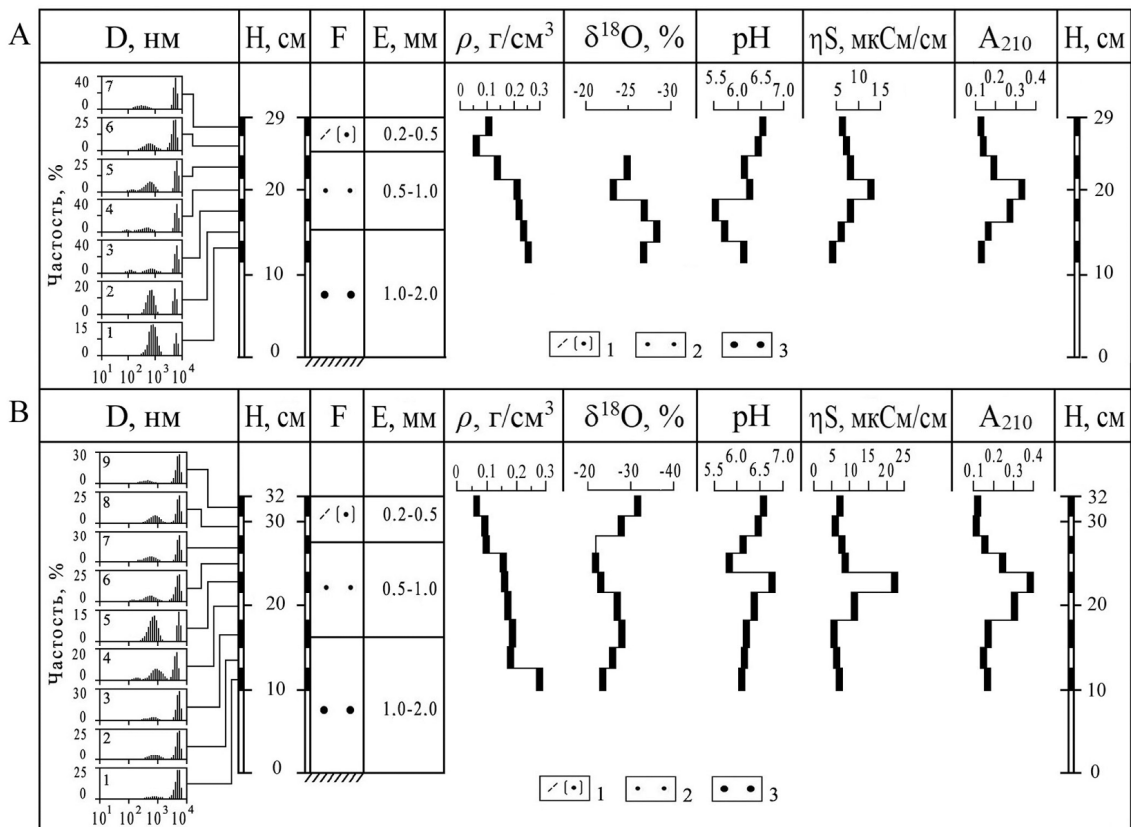


ности сигнала геохимических показателей (рис. 2).

Водородный показатель, характеризующий кислотность снеговой воды, имеет важное значение для понимания химических процессов, происходящих при участии аэрозольного вещества, аккумулированного в снежной толще. По результатам опробования снеговая вода обоих исследованных участков имеет кислотность, близкую к нейтральной: среднее значение рН для «Фоновая» составило  $6.1 \pm 0.1$  и  $6.3 \pm 0.1$  для «БЭК» (рис. 2, В). При этом колебания рН снеговой воды для обсерватории «Фоновая» варьировали в диапазоне крайних величин 5.5–6.6 (рис. 2, А), то есть в близких к фоновым значениям для региона 5.5–6.5 единиц [16], тогда как для пригородного полигона «БЭК» показатель рН оказался несколько завышен — 5.9–6.8. Предполагается, что увеличение значений водородного показателя обусловлено подщелачиванием и большей запыленностью снега, вызванными деятельностью городских промышленных предприятий [11, 18]. Последнее подтверждается результатами анали-

за хода временной изменчивости и расчета счетной концентрации частиц в приземном слое воздуха на обсерватории «Фоновая» и пригородном полигоне «БЭК», который показал (рис. 3), что аэрозольное загрязнение в Томском пригороде (участок «БЭК») в 1.3 раза выше, чем в фоновых условиях (участок «Фоновая»).

В целом, сопоставляя ход кривых распределения значений интегральных геохимических показателей (рН и электропроводности) в снежной толще, можно заметить, что для «Фоновой» в горизонте, сложенном мелкозернистым снегом, фиксируется снижение указанных величин, тогда как для «БЭК» — увеличение. А поскольку электропроводность обеспечивается электролитами, то, вероятно, верхняя часть снежной толщи в обоих случаях загрязнена кислотосодержащими аэрозолями несколько сильнее, чем нижняя. Предполагается, что это вызвано сухим осаждением аэрозолей в период между снегопадами в интервале 28.11–08.12 (рис. 1, В и D). Известно, что в сухих аэро-



**Рис. 2.** Сравнительная характеристика распределения интегральных показателей в снежном покрове: А — обсерватории «Фоновая», В — пригородного полигона «БЭК». Условные обозначения: D, нм — частотное распределение аэрозольных частиц по размерам: в снежных слоях, H, см — высота снежного покрова и величина пробоотбора снежных слоев, F — форма снежных зерен: 1 — недавно отложенный снег (DFbk) с округлыми зёрнами (RGsr), 2 — мелкозернистый снег (RGsr), 3 — мелко- и среднезернистый снег, сложенный непрозрачными округлыми агрегатами из снежных зёрнами (RGlR) (морфологическая классификация форм (F) зёрнами дана по работе [23]); E, мм — размер снежных зёрнами. Обозначение интегральных показателей:  $\rho$ , г/см<sup>3</sup> — плотность снега,  $\delta^{18}\text{O}$  ‰ — содержание <sup>18</sup>O, pH — значения водородного показателя,  $\eta S$ , мкСм/см — удельная электропроводность,  $A_{210 \text{ нм}}$  — оптическая плотность снеговой воды при длине волны 210 нм

**Fig. 2.** Comparative characteristics of the integral indicators distribution in the snow cover: A — Fonovaya Observatory, B — BEK suburban test site. Legend: D, nm—frequency distribution of aerosol particles by size: in snow layers, H, cm—snow depth and sampling rate of snow layers, F—shape of snow grains: 1—recently deposited snow (DFbk) with rounded grains (RGsr), 2 — fine-grained snow (RGsr), 3 — fine-medium-grained snow composed of opaque rounded aggregates of snow grains (RGlR) (the morphological classification of grain shapes (F) is given according to [23]); E, mm is the size of the snow grains. Designation of integral indicators:  $\rho$ , g/cm<sup>3</sup> — snow density,  $\delta^{18}\text{O}$  ‰ — <sup>18</sup>O content, pH — pH,  $\eta S$ , uS/cm — electrical conductivity,  $A_{210 \text{ nm}}$  — optical density of snow water at a wavelength of 210 nm

золях содержание загрязняющих веществ на 25 % больше, чем в свежевыпавших осадках.

*Частотное распределение аэрозольных частиц по размерам в снежной толще на обсерватории «Фоновая»* представлено на рис. 2, А. Хронологическую привязку слоев опробования (рис. 1, А) осуществляли по времени выпадения стратиграфически значимых снегопадов (рис. 1, В). По характеру распределения частиц по размерам четко выделяются бимодальный (слои 1, 2, 6, 7) и трехмодальный (слои 3, 4, 5) типы распределения (рис. 2). Оба типа характеризуются значительной дисперсией. Следует заметить, что появление дополнительной фракции аэрозольного вещества в 3, 4, 5-м слоях приурочено к зоне термодиффузионного геохимического барьера, на котором фиксируются относительно резкие изменения значений всех проанализированных параметров (рис. 2, А).

*Частотное распределение аэрозольных частиц по размерам в снежной толще на пригородном полигоне «БЭК»* представлено на рис. 2, В. Хронологическую привязку слоев опробования (рис. 1, С), как и в первом случае, осуществляли по времени стратиграфически значимых снегопадов (рис. 1, D). Анализ динамики послойного распределения частиц аэрозольного вещества по размерам показал, что слои 1–3, 5, 7–9 характеризуются бимодальным типом распределения, тогда как слои 4 и 6 — трехмодальным. И так же, как в первом случае, появление третьей фракции зафиксировано в зоне термодиффузионного геохимического барьера (рис. 2, В).

В целом можно предположить, что появление трехмодального распределения частиц в двух снежных разрезах произошло за счет дополнительного формирования мелкодисперсной фракции частиц в средней части снежной толщи. Приуроченность этой зоны к термодиффузионному геохимическому барьеру может указывать на определенную активность снегохимических процессов с участием осевшего аэрозольного вещества, которые проходят на фоне активизации термометаморфизма снежных слоев в этой части снежного разреза. При этом следует отметить, что в нижней части снежной толщи изменение соотношения фракций идет за счет укрупнения частиц в результате агрегации среднелдисперсных частиц в результате диффузионного массопереноса паров почвенной влаги. Данный процесс возникает в нижней части снежного профиля на границе «снег — почва» из-за наличия внутриснежной температурной инверсии. Возможность термодиффузии почвенной влаги в снежной толще впервые показана в работе [9] и подтверждена в работах [13, 32, 36, 39].

Одновременно с этим сопряженный анализ послойной изменчивости соотношения дисперсных фракций аэрозольного вещества и оптической плотности снеговой воды (рис. 2) показал, что постседиментационные преобразования снежной толщи сопровождаются ростом содержания дисперсных частиц и растворимых компонентов, активно поглощающих излучение в УФ-диапазоне. Это дает основание предполагать наличие в зоне термодиффузионного геохимического барьера условий для протекания фотоактивированных снегохимических реакций между осевшим аэрозольным веществом и субохлажденной поровой капиллярной влагой. Возможно, именно с данным процессом связано появление дополнительных мелкодисперсных фракций аэрозольного вещества, поскольку ранее проведенные

исследования показали, что недавно прошедшие снегопады характеризуются только двухмодальным распределением частиц аэрозольного вещества [19].

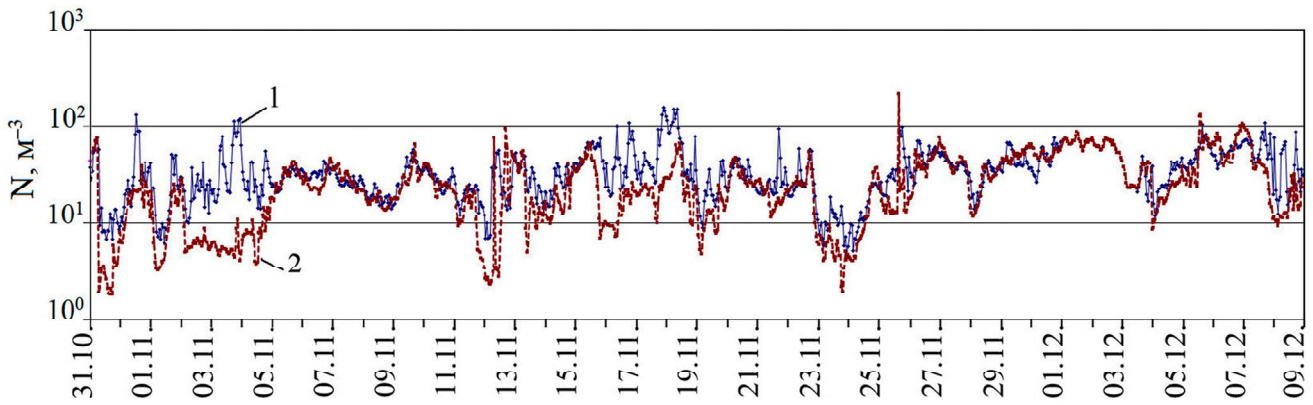
### **Активность снегохимических реакций в УФ-диапазоне**

**Оптическую плотность** ( $A_{210\text{ нм}}$ ) проб снеговой воды, как показали лабораторные испытания, лучше определять при длине волны 210 нм. Судя по величине показателей, концентрация дисперсных частиц и растворимых компонентов в снежном покрове на пригородном полигоне «БЭК» выше, нежели в обсерватории «Фоновая» (рис. 2). Так как оптическая плотность обеспечивается частицами и растворимыми поглощающими компонентами, а электропроводность — электролитами, то, вероятно, рост оптической плотности проб снеговой воды связан с увеличением содержания в пробах фоточувствительных электролитов (предположительно железосодержащие соединения), которые поглощают излучение в УФ-диапазоне. Известна схема свободнорадикальных реакций [22] при активизации ионов двухвалентного железа под воздействием квантов света. Поэтому наличие железосодержащих соединений в снежных слоях дает основание предполагать возможность протекания фотоактивированных снегохимических реакций между субохлажденной капиллярной влагой и аэрозольным веществом. Процесс сопровождается появлением новообразованных продуктов, о чем свидетельствует появление дополнительной мелкодисперсной фракции частиц в снежном покрове на обсерватории «Фоновая» (слои 3–5: рис. 2, А) и на пригородном полигоне «БЭК» (слои 4, 6: рис. 2, В).

*Ультрафиолетовая прозрачность снежной толщи.* Сравнение результатов экспонирования фоточувствительных элементов УФ-детектора, представляющих собой кварцевые ампулы с искусственными нанокристаллами периклаза, на двух пространственно разнесенных радиометрических площадках (прямое расстояние между «Фоновой» и «БЭК» составляет ~ 60 км) показало, что ультрафиолетовая прозрачность снега в пределах фонового участка оказалась ниже, чем на городском (рис. 4, А, В).

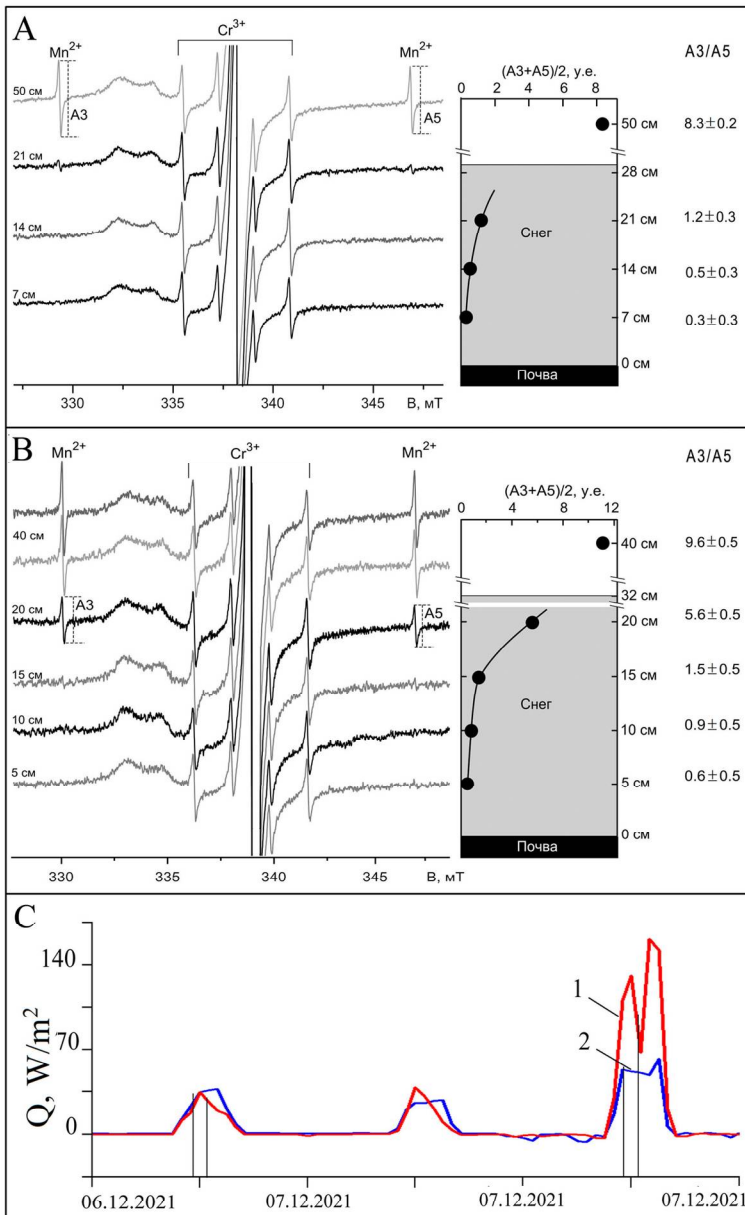
Если допустить, что эксперимент поставлен корректно, то напрашивается парадоксальный вывод, что на «Фоновой», несмотря на то, что приснежный слой воздуха менее загрязнен аэрозолями (что мы показали ранее), снежный покров оказался менее проницаем для УФ-излучения. Между тем расчет пришедшего солнечного излучения в диапазоне длин волн 0.305...2.8 мкм  $Q$ , Вт/м<sup>2</sup> за время экспонирования УФ-детектора в снегу показал, что разница между «Фоновой» и «БЭК» превышает 40 % (рис. 4, С). Следовательно, разница в показаниях датчиков объясняется не столько запыленностью приснежного воздуха, сколько различным уровнем воздействия ультрафиолетового излучения. Другими словами, на снежную поверхность пригородного полигона «БЭК» поступило ультрафиолетовой радиации больше, чем на снежную поверхность на обсерватории «Фоновая». Учитывая, что степень запыленности приснежного воздуха на пригородном полигоне «БЭК» выше, чем на обсерватории «Фоновая», следует ожидать, что активность снегохимических реакций в снежной толще на первой площадке будет выше, а межслоевые вариации интегральных геохимических показателей — контрастней.

Необходимо отметить, что градиент ослабления ЭПР-сигнала в снежной толще в обоих случаях фиксируется до



**Рис. 3.** Ход счетной концентрации ( $N, m^{-3}$ ) субмикронного и грубодисперсного аэрозоля ( $d > 0.3 \mu m$ ) с 30 октября 2021 г. по 8 декабря 2021 г. на пригородном полигоне «БЭК» (1) и обсерватории «Фоновая» (2) в Томске по результатам ежечасных измерений спектрометров аэрозоля GRIMM 1.109/1.108

**Fig. 3.** The course of the counting concentration ( $N, m^{-3}$ ) of submicron and coarsely dispersed aerosol ( $d > 0.3 \mu m$ ) from October 30, 2021 to December 8, 2021 in the BEK suburban test site (1) and the Fonovaya Observatory (2) in Tomsk according to the results of hourly measurements of aerosol spectrometers GRIMM 1.109/1.108



**Рис. 4.** Изменение интенсивности проникновения УФ-радиации в глубь снежной толщи на участках: А – «Фоновая»; В – «БЭК»; С – сравнение интенсивности пришедшего на оба участка солнечного излучения на снежную поверхность в диапазоне длин волн 0.305...2.8 мкм  $Q, W/m^2$  за время экспонирования фоточувствительных элементов УФ-дозиметра в снегу. Доп. обозначения: 1 – участок «БЭК», 2 – участок «Фоновая»

**Fig. 4.** Change in the UV radiation penetration intensity deep into the snow mass in areas: A – "Fonovaya"; B – "BEK"; C – comparison of the solar radiation intensity that came to both areas on the snow surface in the wavelength range of 0.305 ... 2.8  $\mu m$   $Q, W/m^2$  during the exposure of the photosensitive elements of the UV dosimeter in the snow. Legend: 1 – BEK site, 2 – Fonovaya site



14–15 см (рис. 4, А, В), ниже изменения уже не регистрируются. Между тем, если сопоставить положение зон, к которым приурочено относительно резкое изменение интегральных геохимических показателей, в частности увеличение оптической плотности снеговой воды в УФ-диапазоне и относительное утяжеление изотопного состава кислорода (рис. 2), то практически вся она располагается в снежном горизонте со сравнительно высокими значениями ультрафиолетовой прозрачности (рис. 4, А, В). Данное обстоятельство позволяет предполагать, что в верхней части снежной толщи существуют условия для протекания фотоактивированных геохимических реакций между аэрозольным веществом и поровой капиллярной влагой. При этом интенсивность протекания данных реакций контролируется интенсивностью солнечной радиации, поступающей на снежную поверхность, приток которой на пригородном научном полигоне, как показали результаты расчетов, оказался на 40 % больше, чем на обсерватории. Данное обстоятельство нашло свое отражение в различиях максимальных значений содержания «тяжелого» кислорода, зафиксированных на термодиффузионном геохимическом барьере: для полигона «БЭК» значение  $\delta^{18}\text{O}$  составило  $-22.3\text{‰}$ , тогда как для обсерватории «Фоновая» только  $-23.6\text{‰}$ .

**Постседиментационные изменения изотопного состава кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в снежных слоях, образовавшиеся при выпадении стратиграфически значимых снегопадов в сопряжении с траекторным анализом переноса воздушных масс**

**Обсерватория «Фоновая».** Начало снегостава на «Фоновой» (31.10–15.11) происходило за счет переноса влаги со Средиземного моря. В этот период сформировалась нижняя часть снежной толщи. Однако в этом слое из-за сильной неровности почвенной поверхности (с перепадами микровысот до 10–12 см) пробоотбор снега не проводился. Поэтому первая проба на изотопный анализ была взята с глубины 12 см из слоя, сформировавшегося за счет снегопадов, сгенерированных полярными воздушными массами, поступавшими с Баренцева моря в период с 15.11 по 19.11. Величина  $\delta^{18}\text{O}$  в слое опробования составила  $-27.3\text{‰}$  (табл. 1). Во второй пробе за счет прироста содержания «легкого» кислорода это значение несколько возросло:  $\delta^{18}\text{O} = -28.4\text{‰}$ . Слой, из которого взята эта проба, образовался за счет снегопадов, выпавших во временной интервал 19.11–24.11, когда влага к «Фоновой» поступала со стороны Черного моря и очень слабо с Атлантики (рис. 5, А). Вторая проба изотопно легче первой и тяжелее третьей: разница значений  $\delta^{18}\text{O}$  между ними составила  $-1.1$  и  $+1.1\text{‰}$  соответственно (табл. 1). Третья проба взята из слоя, сформировавшегося в период с 24.11 по 07.12, тогда выпадение снегопадов обеспечивали воздушные массы, приходящие преимущественно из Черноморско-Каспийского региона (рис. 5, А).

Как следует из табл. 1, самые низкие значения «легкого» кислорода зафиксированы для четвертой и пятой проб:  $\delta^{18}\text{O} = -23.6$  и  $-24.9\text{‰}$  соответственно. Эти пробы, так же как и третья проба, приурочены к снежным слоям, образовавшимся за счет снегопадов с 24.11 по 07.12. Заметим, что в этот период снегонакопление и на полигоне «БЭК», и на обсерватории «Фоновая» шло за счет снегопадов в результате разгрузки влагонесущих воздушных масс, поступавших из Черноморско-Каспийского региона (рис. 5, А). При этом, проходя через среднеазиатские пустыни, эти воздушные массы

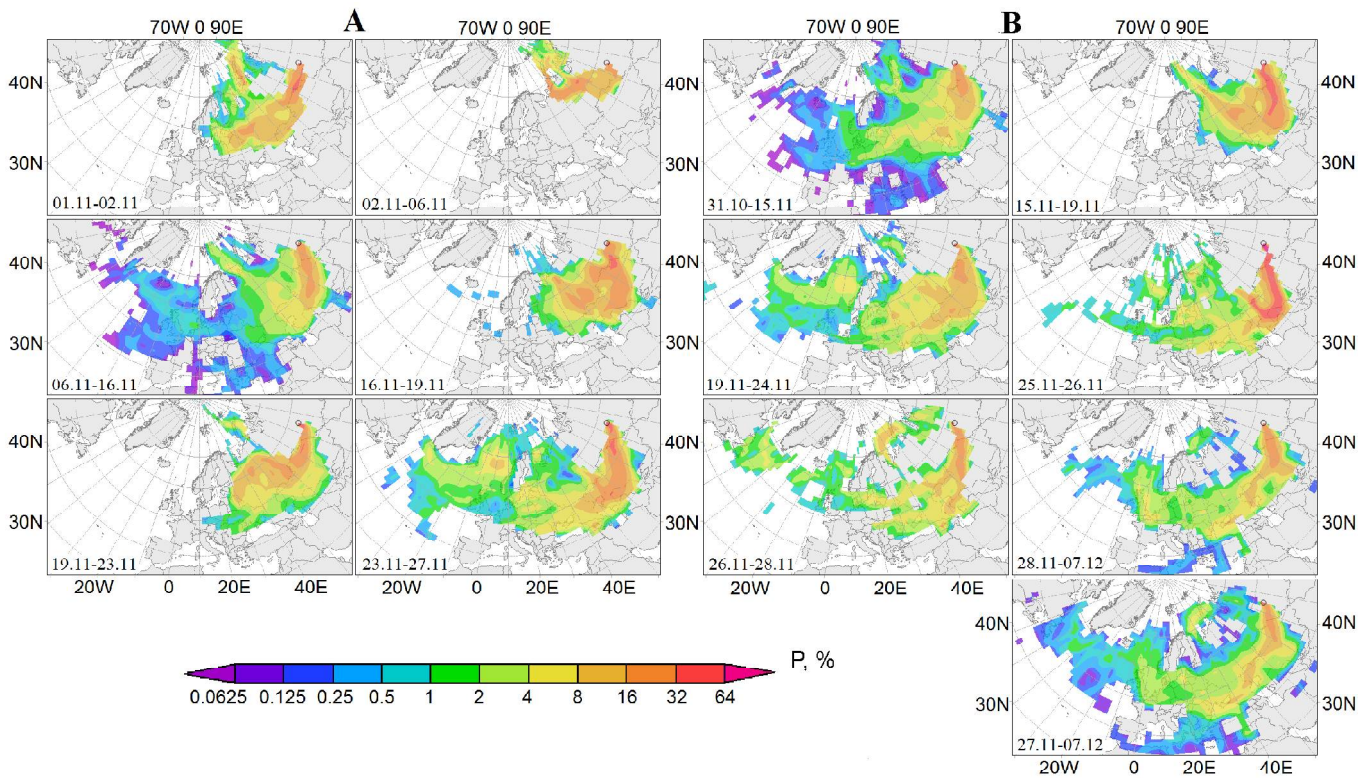
могли захватить железосодержащие минералы. Известно, что в условиях пустыни аэрозоль генерируется земной поверхностью и может подниматься конвективными и вихревыми потоками в тропосферу [1, 8, 9].

Возможно, увеличение оптической плотности в УФ-диапазоне в третьей и четвертой пробах снеговой воды (рис. 2, А) косвенно свидетельствует о присутствии железосодержащих соединений в аэрозольном веществе, осевшем в составе снегопадов в период с 24.11 по 07.12. Необходимо отметить также, что шестая и седьмая пробы были потеряны при пробоподготовке, поэтому изотопный анализ снежной толщи в сопряжении с траекторным анализом для «Фоновой» ограничен пятью пробами во временном периоде 31.10–07.12.2021 г.

**Пригородный полигон «БЭК».** Начало снегостава на полигоне «БЭК» в период 01.11–06.11 происходило за счет переноса влаги, которая с наибольшей вероятностью прибывала с Балтийского и Баренцева морей (рис. 5, В). В этом интервале сформировалась нижняя часть снежной толщи, из которой были взяты первые две пробы. При этом из-за микронеровностей почвенной поверхности первая проба на изотопный анализ была взята с глубины 10 см. Значение  $\delta^{18}\text{O}$  в ней составило  $-24.1\text{‰}$ , тогда как во второй пробе оно оказалось несколько легче ( $-25.5\text{‰}$ ). Разница величин  $\delta^{18}\text{O}$  между первой и второй пробами составила  $-1.4\text{‰}$  (табл. 1). Третья проба взята из слоя, сформировавшегося при снегопадах в период с 06.11 по 16.11; тогда влагонесущие воздушные массы поступали с Каспийского моря, в несколько меньшей мере с Баренцева моря и совсем незначительно с Атлантики (рис. 5, В). В этой пробе зафиксировано значение  $\delta^{18}\text{O} = -28.5\text{‰}$  (табл. 1). При этом разница между вторым и третьим слоями составила ( $-3\text{‰}$ ), что свидетельствует об увеличении доли «легкого» кислорода в вышележащем третьем слое. Четвертая и пятая пробы взяты из слоев, образовавшихся за счет снегопадов, выпавших в интервале 16.11–23.11. В этот период влагонесущие воздушные массы поступали преимущественно с Балтийского, Черного и Каспийского морей. Изотопные значения  $\delta^{18}\text{O}$  в этих пробах составили  $-26.8$  и  $-23.6\text{‰}$  соответственно (табл. 1), а разница величин  $\delta^{18}\text{O}$  между ними составила  $+3.2\text{‰}$ , что указывает на существенное утяжеление изотопного состава в пятой пробе. И это несмотря на то, что обе пробы связаны со снегопадами, выпавшими из одной общей воздушной массы, пришедшей из Черноморско-Каспийского региона. Следовательно, в увеличении содержания «тяжелого» кислорода в пятой пробе нельзя предположить участие разных воздушных масс и механизм изменения изотопного состава кислорода, возможно, имеет другую природу. Шестая, восьмая и девятая пробы (седьмая проба потеряна при пробоподготовке) взяты из снежного горизонта, образовавшегося за счет снегопадов, выпавших в интервале 23.11–08.12. Тогда синоптическая обстановка характеризовалась перемещением воздушных масс из района Средиземноморья через Черноморско-Каспийский регион и среднеазиатские пустыни и крайне незначительно — с Атлантики (рис. 5, В).

Необходимо заметить, что в шестой пробе зафиксировано самое высокое содержание «тяжелого» изотопа кислорода ( $\delta^{18}\text{O} = -22.3\text{‰}$ ). Разница показателей  $\delta^{18}\text{O}$  между пятой и шестой пробами составила  $+1.3\text{‰}$ , что свидетельствует о росте содержания  $\delta^{18}\text{O}$  в шестой пробе. В восьмой пробе значение  $\delta^{18}\text{O} = -27.9\text{‰}$ . При этом разница величин  $\delta^{18}\text{O}$  между шестой и восьмой пробами оказалась





**Рис. 5.** Диаграммы региональной вероятности переноса в пограничном слое атмосферы (P, %) для воздушных частиц, прибывавших в слой 100–2100 м над обсерваторией «Фоновая» (А) и пригородным полигоном «БЭК» (В) (см. пояснения в тексте)

**Fig. 5.** Diagrams of the regional probability of transport in the atmospheric boundary layer (P, %) for air particles arriving in the 100–2100 m layer above the Fonovaya observatory (A) and the suburban BEK test site (B) (see explanations in the text)

**Таблица 1.** Изменчивость межслоевой разницы значений  $\delta^{18}\text{O}$  в снежном покрове

**Table 1.** Interlayer difference variability of  $\delta^{18}\text{O}$  values in snow cover

Номер слоев опробования и их мощность, см Number of sampling layers and their thickness, cm	Межслоевая разница значений $\delta^{18}\text{O}$ Interlayer difference of values $\delta^{18}\text{O}$	Послойные значения $\delta^{18}\text{O}$ Layered values $\delta^{18}\text{O}$	Межслоевая разница значений $\delta^{18}\text{O}$ Interlayer difference of values $\delta^{18}\text{O}$	Номера слоев опробования и их мощность, см Numbers of sampling layers and their thickness, cm
Снегомерная площадка «Фоновая», высота снежного покрова 29 см Fonovaya snow measuring site, snow depth 29 cm				
5 (2.0)	+3.7	-24.9	-1.3	5 (2.0)
4 (2.5)		-23.6		4 (2.5)
3 (2.5)		-27.3	+1.1	3 (2.5)
2 (2.5)		-28.4		2 (2.5)
1 (2.5)	-1.1	-27.3		1 (2.5)
Снегомерная площадка «БЭК», высота снежного покрова 31 см BEK snow measuring site, snow depth 31 cm				
9 (2.5)	-5.6	-31.2	-3.3	9 (2.5)
8 (2.0)		-27.9		8 (2.0)
6 (2.5)		-22.3	+1.3	6 (2.5)
5 (2.5)	-23.6	5 (2.5)		
4 (3.0)	+3.2	-26.8	+1.7	4 (3.0)
3 (3.0)	-3	-28.5		3 (3.0)
2 (2.5)		-25.5	-1.4	2 (2.5)
1 (2.5)	-24.1	1 (2.5)		

самой значительной ( $-5.6\%$ ). Девятая проба по изотопному составу оказалась самой «легкой» ( $\delta^{18}\text{O} = -31.2\%$ ). При этом разница значений  $\delta^{18}\text{O}$  между восьмой и девятой пробам оказалась также значительной ( $-3.3\%$ ) (табл. 1). В связи с этим необходимо отметить, что все различия величин  $\delta^{18}\text{O}$  между слоями фиксируются в снежном горизонте, образовавшемся за счет снегопадов при разгрузке воздушной массы, пришедшей со Средиземного моря через Черноморско-Каспийский регион и среднеазиатские пустыни (рис. 5, В). И если принять во внимание, что в снежных слоях данного снежного горизонта фиксируется повышенная оптическая плотность растворов в УФ-диапазоне, так же как и для слоев 3, 4 на участке «Фоновая», то очевидно, что увеличение содержания «тяжелого» кислорода в зоне термодиффузионного геохимического барьера сложно объяснить участием различных воздушных масс, или утяжелением изотопного состава твердых осадков за счет локального испарения, или только постседиментационным криогенным метаморфизмом снега за счет изменения изотопного состава в снежном покрове в результате фазовых переходов воды при массообмене между ледяными частицами снежных зерен и водяным паром в снежной толще.

В целом, анализируя вертикальную динамику распределения значений  $\delta^{18}\text{O}$  (рис. 2) в снежном покрове на исследованных участках, можно отметить, что на обоих участках изотопно «тяжелые» снежные слои приурочены к зоне термодиффузионного геохимического барьера. В этой же зоне зафиксировано относительное увеличение содержания дисперсных частиц и изменение в соотношении их дисперсных фракций. Кроме того, в данной зоне регистрируется рост оптической плотности в пробах снеговой воды в УФ-диапазоне, что связано с увеличением в них концентрации оптически активных веществ, предположительно железосодержащих соединений (рис. 2). И если учесть наличие сравнительно высокой УФ-прозрачности снега в верхней части снежной толщи (рис. 4, А, В), то можно предположить, что в этой части существуют условия для развития фотоактивированных геохимических реакций, инициированных свободнорадикальным окислением аэрозольного вещества с участием ионов железа. Процесс сопровождается изменением изотопных соотношений в снежной толще.

#### **Участие оптически активных гидроксидов железа в геохимических реакциях**

Принимая во внимание наличие ультрафиолетовой прозрачности снега, можно предположить, что помимо криогенного изотопного фракционирования в механизме преобразования изотопных характеристик снежного покрова, возможно, принимают участие фотоактивированные геохимические реакции, инициированные свободнорадикальным окислением аэрозольного вещества с участием ионов металлов с переходной валентностью. Основанием для данного предположения служит следующее.

Пылевое загрязнение снежного покрова и его радиационная прозрачность в УФ-диапазоне дают основание полагать, что оптически активные компоненты из состава осевшего аэрозольного вещества могут выступать прекурсорами фотоактивированных геохимических реакций в снежной толще между субохлажденной капил-

лярной влагой и осевшим аэрозольным веществом. Эти фотоактивированные реакции могут определенным образом влиять на постседиментационное фракционирование изотопов кислорода в снежном покрове. В частности, столь быстрое утяжеление изотопного состава в верхней части снежной толщи и приуроченный к ней резко выраженный эффект межслоевых колебаний значений  $\delta^{18}\text{O}$  может быть отражением активизации геохимических реакций, сопровождающих постседиментационный термометаморфизм стратиграфически значимых снегопадов с участием аэрозольного вещества на термодиффузионном геохимическом барьере. Основанием для данного предположения является рост значений оптической плотности проб снеговой воды и ее электропроводности в зоне термодиффузионного геохимического барьера (рис. 2), который одинаково фиксируется в верхней части снежной толщи как на обсерватории «Фоновая», так и на пригородном полигоне «БЭК». И если принять во внимание, что воздушные массы, поступающие из района Средиземноморья через Черноморско-Каспийский регион, при прохождении над среднеазиатскими пустынями могут обогащаться оптически активными железосодержащими минералами, то эти же компоненты могут выступать прекурсорами фотоактивированных геохимических реакций между субохлажденной капиллярной влагой и осевшим аэрозольным веществом. При этом образуются стабильные продукты фотореакций. Процесс сопровождается утяжелением изотопного состава снега, наиболее контрастно проявляющимся в зоне термодиффузионного геохимического барьера. В то же время механизм утяжеления изотопного состава в припочвенном слое снега ожидаемо связан с криогенным фракционированием и обусловлен диффузией паров почвенной влаги в припочвенный слой снега [15, 26].

Таким образом, для обоих участков отмечается утяжеление изотопного состава снега на термодиффузионном геохимическом барьере, которое в большей мере инициировано фотоактивированными геохимическими реакциями между поровой капиллярной влагой и осевшим аэрозольным веществом, протекающими на фоне ультрафиолетовой прозрачности снега. И если принять во внимание результаты измерений оптической плотности снеговой воды (рис. 3) и радиационной прозрачности снежной толщи в УФ-диапазоне (рис. 4, А, В), то прекурсором, инициирующим развитие фотоактивированных геохимических реакций на термодиффузионном геохимическом барьере, могут выступать аквакомплексы железа.

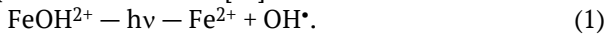
**Железо в атмосфере.** Источниками железа в атмосфере могут служить железосодержащие минералы глин, например, хлорит  $[(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{Mg}, \text{Al})_3(\text{OH})_3]$  и монтмориллонитовые образования  $[(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_4(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}]$ , входящие в состав рыхлых отложений. Будучи захваченными с открытой поверхности восходящими турбулентными и конвективными потоками воздуха, глинистые минералы поднимаются в атмосферу. Предполагается, что по своим размерам эти минеральные частицы находятся в интервале  $0.001 - 10$  мкм, что позволяет им находиться в атмосфере значительно дольше обычных пылевых частиц. Принимается, что при взаимодействии железосодержащих глинистых минералов с каплями облаков образуются гидратированные ионы металлов. Находясь в растворе, гидратирован-



ные ионы железа содержат в качестве центрального ядра аквакомплекс — соединение, в котором лигандом выступает вода  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ .

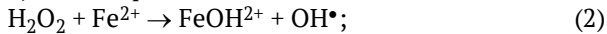
В условиях атмосферы при понижении температуры аквакомплексы железа переходят в кристаллическое состояние. Находясь в нем, они могут удерживать и кристаллизационную воду, образуя тем самым кристаллогидраты. Известно, что кристаллизационная вода не входит в состав внутренней сферы гидроксидного комплекса и такая вода имеет менее прочные связи, чем координированная. Указанное обстоятельство предопределяет своеобразное рыхлое строение кристаллогидратов, которое не служит препятствием для диффузии и встраивания внутри кристаллогидрата малых газовых компонентов, а также для физико-химического взаимодействия между ними.

*Фотоактивированные реакции в снежной толще с участием железа.* Известна следующая схема фотолиза неорганических ионов [22]:

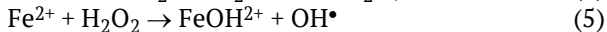
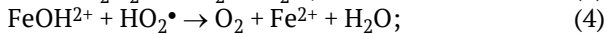
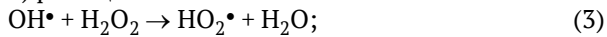


Поэтому осевшие кристаллогидраты железа под воздействием ультрафиолета могут инициировать образование первичных короткоживущих радикалов, которые затем вступают в необратимые реакции взаимодействия, заканчивающиеся образованием стабильных продуктов фотореакции. Участвуя в качестве индуктора, инициирующего образование короткоживущих свободных радикалов, железо может играть важную роль в изотопной трансформации снега. Механизм таких реакций с участием железа давно известен:

1) инициирование цепи:



2) рост цепи:



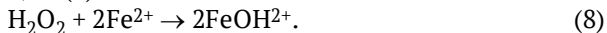
(реакции (3)–(5) идут параллельно с индуцированной реакцией (6) разложения перекиси водорода);



3) обрыв цепи:

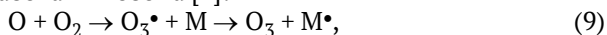


Стехиометрическая реакция (8) показывает количественные соотношения начальной (1) и конечной реакций (7):



В продолжение реакции 8 в атмосфере может развиваться другой процесс — окисление железа с образованием ферригидрита ( $2.5 \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Данное соединение является продуктом окисления  $\text{Fe}^{2+}$  [4]. Ферригидрит — неустойчивый коллоидный минерал, являющийся к тому же сильным поглотителем коротковолновой солнечной радиации [1]. Оседая на поверхность снега в составе твердых гидрометеоров, в последующем он может выступать прекурсором фотоактивированных реакций в снежных слоях.

Следует заметить, что параллельно реакциям (3)–(5) может идти, например, трехчастичная реакция образования озона [2]:



в результате которой образуются химически активные фрагменты, способные инициировать разнообразные вторичные реакции свободнорадикального окисления аэрозольного вещества и так же быть пре-

курсорами фотоактивированных реакций в снежной толще.

Таким образом, появление в субохлажденной капиллярной влаге ионных форм железа, а также наличие радикалов  $\text{HO}_2^{\bullet}$ ,  $\text{OH}^{\bullet}$  и, возможно, атомарного кислорода, создают благоприятные условия для протекания в сезонном снежном покрове фотоактивированных снегохимических реакций между осевшим аэрозольным веществом и субохлажденной поровой влагой. Процесс сопровождается изменением распределения изотопного соотношения ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в снежной толще, которое наиболее контрастно проявляется на термодиффузионном геохимическом барьере.

## Заключение

Традиционно все изменения изотопного состава кислорода в выпавшем снеге характеризуются в основном двумя процессами: 1) сглаживанием вариаций вертикального градиента изотопного сигнала из-за диффузии молекул в поровом пространстве ледяной матрицы без изменения среднего значения изотопного состава для всей снежно-фирновой толщи; 2) изменением изотопного состава в снежном покрове в результате фазовых переходов воды при массообмене между снегом и водяным паром атмосферы.

Вместе с тем в ходе исследований выявлены межслоевые колебания значений  $\delta^{18}\text{O}$ , контрастность которых возрастает в зоне термодиффузионного геохимического барьера. Предполагается, что вследствие радиационной прозрачности снега в УФ-диапазоне и при наличии в нем железосодержащих кристаллогидратов в снежной толще возникают условия, инициирующие фотоактивированные снегохимические реакции, сопровождающиеся свободнорадикальным окислением осевшего аэрозольного вещества, заканчивающиеся образованием стабильных продуктов фотореакции. Процесс может сопровождаться изменением изотопного состава снега, что, в свою очередь, может приводить к различиям в изотопной стратификации снежного покрова на двух полигонах, формирование осадков на которых связано с общими источниками водяного пара.

*Авторы благодарят И. В. Смолеву (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) за неоценимую помощь при проведении изотопно-геохимических исследований в ЦКП «Геонаука», Сыктывкар. Исследование проводилось в рамках госзадания Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, проект П.10.3.2, регистрационный № АААА-А17-117021310142-5; траекторный анализ выполнен при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-55-56028. Лазерная гранулометрия и УФ-спектроскопия образцов талого снега выполнены в Центре коллективного пользования «Химия» Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.*

## Литература

1. Атмосферный аэрозоль и его влияние на перенос излучения: к итогам советско-американского аэрозольного эксперимента / Под ред. чл.-кор. АН СССР К. Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоздат, 1978, 119 с.
2. Белан Б. Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2010. 488 с.
3. Васильчук Ю. К., Чижова Ю. Н., Буданцева Н. А., Лычагин М. Ю., Поповнин В. В., Ткаченко А. Н. Изотопный



- состав зимнего снега на хребте Аибга (Красная Поляна), Западный Кавказ // Арктика и Антарктика. 2017. № 3. С. 99–118. URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=24402](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=24402) (дата обращения: 23.01.2022 г.).
4. Гипергенные окислы железа в геологических процессах / Отв. ред. Н. В. Петровская. М.: Наука, 1975. 207 с.
5. Голубев В. Н., Конищев В. Н., Сократов С. А., Гребенников П. Б. Влияние сублимации сезонного снежного покрова на формирование изотопного состава повторно-жильных льдов // Криосфера Земли. 2001. Т. V. № 3. С. 71–76.
6. Голубев В. Н., Сократов С. А. Испарение снега в изотермических условиях // Материалы гляциологических исследований. 1992. Вып. 72. С. 205–214.
7. Горчаков Г. И., Копров Б. М., Шукуров К. А. Вихревой вынос аридного субмикронного аэрозоля // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 5. С. 596–608.
8. Горчаков Г. И., Копров Б. М., Шукуров К. А. Исследование выноса субмикронного аэрозоля с подстилающей поверхности // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 2. С. 166–169.
9. Гуртовая Е. Е. Некоторые вопросы температурного режима снежного покрова. Роль снежного покрова в природных процессах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 121–131.
10. Дюнин А. К. Механика метелей. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963. 380 с.
11. Захарченко А. В., Тигеев А. А., Пасько О. А., Колесниченко Л. Г., Московченко Д. В. Пространственное распределение геохимических компонентов снегового покрова на удалении от Томск-Северской промышленной агломерации // Криосфера земли. 2021. Т. XXV. № 6. С. 16–27.
12. Ивлев Л. С. Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 34. № 5. С. 392–410.
13. Коломыйц Э. Г. Теория эволюции в структурном снеговедении. М.: Геос, 2013. 482 с.
14. Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 179 с.
15. Малыгина Н. С., Эйрих А. Н., Курепина Н. Ю., Панина Т. С. Изотопный состав зимних атмосферных осадков и снежного покрова в переходной зоне Алтая // Лёд и Снег. 2017. № 1(57). С. 57–68. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-57-68
16. Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2019 г. М.: Росгидромет, 2020, 247 с.
17. Рихтер Г. Д. Роль снежного покрова в физико-географическом процессе // Труды Института географии АН СССР. Вып. 40. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 171 с.
18. Таловская А. В., Язиков Е. Г., Беспалова А. И. Пространственно-временные тренды пылевого загрязнения снежного покрова в многопрофильном промышленном городе (на примере г. Томск, юг Западной Сибири) // Инженерная геология – 2021: Доклады международного симпозиума (Москва, 1–3 декабря 2021 г.) / Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. М., 2021. С. 186–190.
19. Тентюков М. П., Шукуров К. А., Белан Б. Д., Симоненков Д. В., Язиков Е. Г., Михайлов В. И., Бучельников В. С. Сопряженный анализ гранулометрического состава аэрозольного вещества в приземном воздухе и снежном покрове: влияние воздушных масс на распределение аэрозольных частиц // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 8. С. 577–584. DOI: 10.15372/AOO20210802
20. Тентюков М. П. Особенности послойной изменчивости интегральных физико-химических параметров снежного покрова в среднетаежной зоне на северо-востоке Европейской равнины // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 2. С. 61–69. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(61-69)
21. Тентюков М. П., Лютовое В. П., Белан Б. Д., Симоненков Д. В., Головатая О. С. Детектор ультрафиолетового излучения на основе ультрадисперсного оксида магния с кристаллической структурой периклаза // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 916–923. DOI:10.15372/AOO20211112
22. Уоллинг Ч. Свободные радикалы в растворе: Пер. с англ.; под ред. Г. А. Разуваева. М.: Иностран. лит-ра, 1960. 531 с.
23. Фирц Ш., Армстронг Р. Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д. М., Нишимура К., Сатьявали П. К., Сократов С. А. Международная классификация для сезонно выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова) // МГИ. 2012. № 2. 80 с.
24. Draxler R. R., Hess G. D. An overview of the HYSPLIT\_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition // Aust. Meteor. Mag., 1998, vol. 47, p. 295–308.
25. Flanner M., Liu X., Zhou C., Penner J. Enhanced solar energy absorption by internally-mixed black carbon in snow grains // Atmos. Chem. Phys., 2012, vol. 12, pp. 4699–4721. DOI:10.5194/acp-12-4699-2012
26. Friedman I., Benson C., Gleason J. Isotopic changes during snow metamorphism // Stable isotope Geochemistry: a tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, Special Publication, 1991, No. 3, pp. 211–221.
27. Jacobson M.-Z. Climate response of fossil fuel and bio-fuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity // J. Geophys. Res., 2004. V. 109, D21 201, doi:10.1029/2004JD004945
28. Johnsen S. J. Stable isotope homogenization of polar firn and ice // Isotopes and Impurities in Snow and Ice. IAHS, 1977. P. 210–219.
29. Johnsen S. J., Clausen H. B., Cuffey K. M., Hoffmann G., Schwander J., Creyts T. Diffusion of stable isotopes in polar firn and ice: the isotope effect in firn diffusion // Physics of Ice Core Records. Sapporo: Hokkaido University Press, 2000. P. 121–140.
30. Kistler R., Kalnay E., Collins W.G., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu 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, vol. 82, No. 2, p. 247–268.
31. 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. No. 10, p. 10875–10893. DOI:10.5194/acp-10-10875-2010
32. Pinzer B. R., Schneebeli M., Kaempfer T. U. (2012) Vapor flux and recrystallization during dry snow metamorphism under a steady temperature gradient as observed by time-lapse micro-tomography. The Cryosphere. 2012. No. 6, p. 1141–1155. URL: <https://doi.org/10.5194/tc-6-1141-2012>
33. Shukurov K. A., Borovski A. N., Postlyakov O. V., Dzhola A. V., Grechko E. I., Kanaya Y. Potential sources of tropospheric nitrogen dioxide for western Moscow region, Russia // Proc. SPIE, 2018, vol. 10833, p. 108337N.
34. 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, vol. 10466. p. 104663V.

35. Skiles S. M., Painter T. H., Belnap J., Holland L., Reynolds R. L., Goldstein H. L., Lin J. Regional variability in dust-on-snow 30 processes and impacts in the Upper Colorado River Basin // Hydrological Processes, 2015, vol. 29, p. 5397–5413.

36. Sokratov S. A. Parameters influencing the recrystallization rate of snow // Cold Regions Science and Technology. 2001, v. 33. No. 2–3, p. 263–274. URL: [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(01\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00053-2)

37. Sokratov S. A., Maeno N. Effective water vapor diffusion coefficient of snow under a temperature gradient // Water Resour. Res. 2000. v. 36, p. 1269–1276. URL: <https://doi.org/10.1029/2000WR900014>

38. Soo J.-Ch., Monaghan K., Lee T., Kashon M. and Harper M. Air sampling filtration media: Collection efficiency for respirable size-selective sampling, Aerosol Science and Technology, 2016, vol. 50, No. 1, p. 76–87. DOI: 10.1080/02786826.2015.1128525

39. Waddington E. D., Steig E. J., Neumann T. A. Using characteristic times to assess whether stable isotopes in polar snow can be reversibly deposited // Annals of Glaciology, 2002, vol. 35, p. 118–124.

## References

1. *Atmosfernyy aerol i yego vliyaniye na perenos izlucheniya: k itogam sovetско-amerikanskogo aerol'nogo eksperimenta* (Atmospheric aerosol and its influence on radiation transfer: on the results of the Soviet-American aerosol experiment). Ed. K. Ya. Kogdratiev. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 119 p.

2. Belan B. D. *Ozon v troposfere* (Ozone in the troposphere). Tomsk, Publishing House of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 2010, 488 p.

3. Vasilchuk Yu. K., Chizhova Yu. N., Budantseva N. A., Lychagin M. Yu., Popovnin V. V., Tkachenko A. N. *Izotopnyy sostav zimnego snega na khrebte Aibga (Krasnaya Polyana), Zapadnyy Kavkaz* (Isotopic composition of winter snow on the Aibga Ridge (Krasnaya Polyana), Western Caucasus). *Arktika i Antarktika* (Arctic and Antarctica), 2017, No. 3, pp. 99–118

4. *Gipergennyye okisly zheleza v geologicheskikh protsessakh* (Hypergene oxides of iron in geological processes). Ed. N. V. Petrovskaya. Moscow: Nauka, 1975, 207 p.

5. Golubev V. N., Konishchev V. N., Sokratov S. A., Grebennikov P. B. *Vliyaniye sublimatsii sezonnogo snezhnogo pokrova na formirovaniye izotopnogo sostava povtorno-zhil'nykh ldov* (Influence of sublimation of seasonal snow cover on the formation of the isotopic composition of wedge ice). *Kriosfera Zemli* (Cryosphere of the Earth), 2001, V. 5, No. 3, pp. 71–76.

6. Golubev V. N., Sokratov S. A. *Ispareniye snega v izotermicheskikh usloviyakh* (Evaporation of snow under isothermal conditions). *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy* (Materials of glaciological research). 1992. No. 72, pp. 205–214.

7. Gorchakov G. I., Koprov B. M., Shukurov R. A. *Vikhrevoyy vynos aridnogo submikronnogo aerolya* (Vertical emission of arid submicron aerosols). *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana* (Proceedings of RAS. Physics of the atmosphere and ocean), 2003, V. 35, No. 5, pp. 596–608.

8. Gorchakov G. I., Koprov B. M., Shukurov R. A. *Issledovaniye vynosa submikronnogo aerolya s podstlayushchey poverkhnosti* (Study of emission of aerosols from underlying surface). *Optika atmosfery i okeana* (Atmospheric and Oceanic Optics), 2000, V. 13, No. 2, pp. 166–169.

9. Gurtovaya E. E. *Nekotoryye voprosy temperaturnogo rezhima snezhnogo pokrova* (Some questions of the temperature regime of the snow cover). *Rol snezhnogo pokrova v prirodnykh protsessakh* (The role of snow cover in natural processes). Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1961, pp. 121–131.

10. Dyunin A. K. *Mekhanika meteley* (Blizzard mechanics). Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1963, 380 p.

11. Zakharchenko A. V., Tigeev A. A., Pasko O. A., Kolesnichenko L. G., Moskovchenko D. V. *Prostranstvennoye raspredeleniye geokhimicheskikh komponentov snegovogo pokrova na udalenii ot Tomsk-Severskoy promyshlennoy aglomeratsii* (Spatial distribution of geochemical components of the snow cover at a distance from the Tomsk-Seversk industrial agglomeration). *Kriosfera zemli* (Earth's Cryosphere), 2021, V. XXV, No. 6, pp. 16–27.

12. Ivlev L. S. *Aerol'noye vozdeystviye na klimaticheskkiye protsessy* (Aerosol impact on climatic processes). *Optika atmosfery i okeana* (Atmospheric and Oceanic Optics), 2011, V. 34, No. 5, pp. 392–410.

13. Kolomyts E. G. *Teoriya evolyutsii v strukturnom snego-vedenii* (Theory of evolution in structural snow science). Moscow: Geos, 2013, 482 p.

14. Kuz'min P. P. *Fizicheskiye svoystva snezhnogo pokrova* (Physical properties of snow cover). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957, 179 p.

15. Malygina N. S., Eirikh A. N., Kurepina N. Y., Papina T. S. *Izotopnyy sostav zimnikh atmosfernykh osadkov i snezhnogo pokrova v perekhodnoy zone Altaya* (Isotope composition of winter precipitation and snow cover in the foothills of the Altai). *Lod i Sneg* (Ice and Snow). 2017, V. 57, No. 1, pp. 57–68.

16. *Obzor zagryazneniya prirodnoy sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2019 g* (Review of environmental pollution in the Russian Federation for 2019). Moscow: Roshydromet, 2020, 247 p.

17. Richter G. D. *Rol' snezhnogo pokrova v fiziko-geograficheskoy protsesse* (The role of snow cover in physical-geographical process). *Trudy Instituta geografii AN SSSR* (Proceedings of the Institute of Geography of the Academy of Sciences of the USSR). Issue 40, Moscow-Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1948, 171 p.

18. Talovskaya A. V., Yazikov E. G., Bepalova A. I. *Prostranstvenno-vremennyye trendy pylevogo zagryazneniya snezhnogo pokrova v mnogoprofilnom promyshlennom gorode (na primere g. Tomsk, yug Zapadnoy Sibiri)* (Spatio-temporal trends of dust pollution of snow cover in a diversified industrial city (on the example of Tomsk, south of Western Siberia)). Reports of the International Symposium "Engineering Geology-2021" (Moscow, December 1–3, 2021). Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications. Moscow, 2021, pp. 186–190.

19. M. P. Tentyukov, K. A. Shukurov, B. D. Belan, D. V. Simonenkov, E. G. Yazikov, V. I. Mikhailov, and V. S. *Sopryazhennyy analiz granulometricheskogo sostava aerol'nogo veshchestva v prizemnom vozdukh i snezhnom pokrove: vliyaniye vozdushnykh mass na raspredeleniye aerol'nykh chastits* (Cross-spectrum analysis of granulometric composition of composition of aerosol matter in surface air and snow cover: influence of air masses on the distribution of aerosol particles). *Optika atmosfery i okeana* (Atmospheric and Oceanic Optics), 2021, V. 34, No. 8, pp. 577–584.

20. Tentyukov M. P. *Osobennosti posloynnoy izmenchivosti integralnykh fiziko-khimicheskikh parametrov snezhnogo pokro-*





va v srednetayezhnoy zone na Severo-Vostoke Yevropeyskoy ravniny (Features of layered variability of integrated physico-chemical parameters in the snow cover in the middle taiga zone in the north-east of the European plain). *Kriosfera Zemli* (Earth's Cryosphere), 2018, V. XXII, No. 2, pp. 54–60.

21. Tentyukov M. P., Lyutoev V. P., Belan B. D., Simonenkov D. V., Golovataya O. S. *Detektor ultrafioletovogo izlucheniya na osnove ultradispersnogo oksida magniya s kristallicheskoj strukturoj periklaza* (Ultraviolet Radiation Detector Based on Artificial Periclase Nanocrystals (MgO)). *Optika atmosfery i okeana* (Atmospheric and Oceanic Optics), 2022, V. 35, No. 1, pp. 89–96.

22. Walling C. *Svobodnyye radikaly v rastvore* (Free radicals in solution). Moscow, Publishing house Foreign literature, 1960, 531 p.

23. Fierz C., Armstrong R. L., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D. M., Nishimura K., Satyawali P. K., Sokratov S. A. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. IHP-VII Technical Documents in Hydrology, 2009, No. 83, IACS Contribution N°1, UNESCO-IHP, Paris.

24. 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, pp. 295–308.

25. Flanner M., Liu X., Zhou C., Penner J. Enhanced solar energy absorption by internally-mixed black carbon in snow grains. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, V. 12, pp. 4699–4721.

26. Friedman I., Benson C., Gleason J. Isotopic changes during snow metamorphism. Stable isotope Geochemistry: a tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, Special Publication, 1991, No. 3, pp. 211–221.

27. Jacobson M.-Z.: Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity. *J. Geophys. Res.*, 2004, V. 109, D21 201, doi:10.1029/2004JD004945/

28. Johnsen S. J. Stable isotope homogenization of polar firn and ice. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice*. IAHS, 1977, pp. 210–219.

29. Johnsen S. J., Clausen H. B., Cuffey K. M., Hoffmann G., Schwander J., Creyts T. Diffusion of stable isotopes in polar firn and ice: the isotope effect in firn diffusion. *Physics of Ice Core Records*. Sapporo: Hokkaido University Press, 2000, pp. 121–140.

30. Kistler R., Kalnay E., Collins W. G., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kous-

ky 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, No. 2, pp. 247–268.

31. 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, No. 10, pp. 10875–10893.

32. Pinzer B. R., Schneebeli M., Kaempfer T. U. (2012) Vapor flux and recrystallization during dry snow metamorphism under a steady temperature gradient as observed by time-lapse micro-tomography. *The Cryosphere*, 2012, No. 6, pp. 1141–1155. URL: <https://doi.org/10.5194/tc-6-1141-2012>

33. Shukurov K. A., Borovski A. N., Postilyakov O. V., Dzhola 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.

34. 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, vol. 10466. p. 104663V.

35. Skiles S. M., Painter T. H., Belnap J., Holland L., Reynolds R. L., Goldstein H. L., Lin J. Regional variability in dust-on-snow 30 processes and impacts in the Upper Colorado River Basin. *Hydrological Processes*, 2015, V. 29, pp. 5397–5413.

36. Sokratov S. A. Parameters influencing the recrystallization rate of snow. *Cold Regions Science and Technology*. 2001, V. 33, No. 2–3, pp. 263–274. URL: [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(01\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00053-2)

Sokratov S. A., Maeno N. Effective water vapor diffusion coefficient of snow under a temperature gradient. *Water Resour. Res.* 2000, V. 36, pp. 1269–1276. URL: <https://doi.org/10.1029/2000WR900014>

37. Soo J.-Ch., Monaghan K., Lee T., Kashon M., Harper M. Air sampling filtration media: Collection efficiency for respirable size-selective sampling. *Aerosol Science and Technology*, 2016, V. 50, No. 1, pp. 76–87. DOI: 10.1080/02786826.2015.1128525

38. Waddington E. D., Steig E. J., Neumann T. A. Using characteristic times to assess whether stable isotopes in polar snow can be reversibly deposited. *Annals of Glaciology*, 2002, V. 35, pp. 118–124.

Поступила в редакцию / Received 23.08.2022