

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ЗАСТОЙНЫХ ЗОН В ГОРОДСКОМ ОСТРОВЕ ТЕПЛА

© 2023 г. М. П. Тентюков^{a, b, *}, К. А. Шукуров^c, Б. Д. Белан^b, Д. В. Симоненков^b,
Г. В. Игнатьев^d, В. И. Михайлов^e

^aСыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина,
Октябрьский пр., 55, Сыктывкар, 167001 Россия

^bИнститут оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, площадь Академика Зуева, 1, Томск, 634055 Россия

^cИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^dИнститут геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982 Россия

^eИнститут химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, 48, Сыктывкар, 167000 Россия

*e-mail: tentukov@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.01.2022 г.

После доработки 20.06.2022 г.

Принята к публикации 22.06.2022 г.

Приведены результаты сравнительных исследований вертикальной изменчивости химического состава и соотношений субдисперсных фракций аэрозольного вещества в снежных слоях, хронологически привязанных к периодам выпадения стратиграфически значимых снегопадов. Показаны особенности концентрирования элементов-примесей на геохимических барьерах в снежной толще. Обнаружено также, что межслоевое соотношение трех геохимически близких групп элементов: сидерофилов, сульфидофилов, литофилов относительно устойчиво сохраняются в снежном покрове при его нарастании. Траекторный анализ переноса воздушных масс к точке наблюдения, с которыми связано выпадение стратиграфически значимых снегопадов, не позволил соотнести обнаруженный геохимический феномен с предположением, что зимнее аэрозольное поле, формируемое над городской территорией при разных траекториях движения воздушных масс, может определенным образом наследоваться в снежных слоях при нарастании снежной толщи и тем самым влиять на особенности вертикального распределения элементов-примесей. Обоснованно постулируется, что межслоевые соотношения элементных парагенезисов, сохраняющие устойчивость в снежной толще при ее нарастании, могут быть использованы в качестве геохимических маркеров застойных зон в городском острове тепла, а сам метод послойного геохимического опробования снежного покрова в условиях редкой городской сети метеорологических наблюдений может быть эффективным дополнением при изучении микромасштабных атмосферных процессов для получения сведений об особенностях переноса загрязняющих веществ в городской среде над ограниченной территорией.

Ключевые слова: аэрозоли, динамическое рассеяние света, геохимические барьеры, городской остров тепла, загрязнение атмосферы, изморозь, снежный покров, элементы-примеси, дальний перенос примесей, траекторный анализ

DOI: 10.31857/S0016752523010089, EDN: HZZJXY

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время фиксируется все нарастающий объем пыле-аэрозольной массы в тропосфере, которая за последнее столетие возросла более чем вдвое (Mahowald et al., 2010). 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 (Ивлев, 2011), то в промышленных центрах она возрастает уже до 45%. Поэтому при эколого-геохимической оценке загрязнения городского воздуха приходится

учитывать изменение роли взвешенных частиц при формировании аэротехногенных аномалий. Так, в одном случае, их состав обусловлен осаждением больших количеств пыли с относительно низкими содержаниями элементов-примесей, тогда как в другом — состав аномалий отличается низким содержанием пыли и высокими нагрузками элементов-примесей (Геохимия окружающей ..., 1990). В свою очередь территория промышленных городов, как правило, загрязнена неравномерно и на повышенном микроэлементном фоне четко выделяются техногенные геохимические аномалии, приуроченные к промышленной

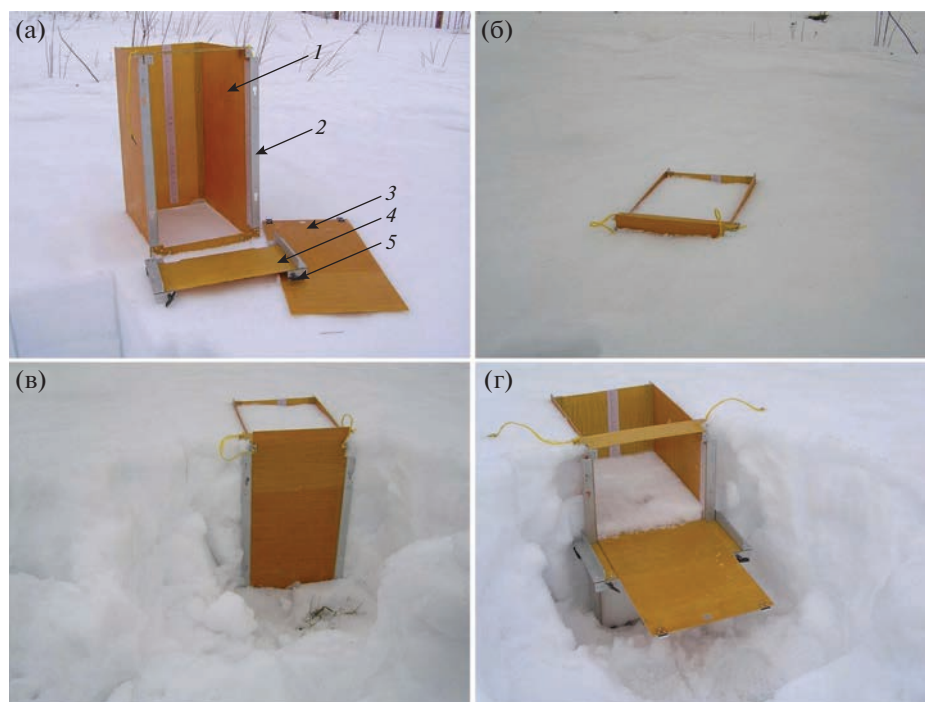


Рис. 1. Устройство для послойного отбора снега и пример его использования (пояснения в тексте).

инфраструктуре (Экогеохимия городских..., 1995; Касимов и др., 2016; Московченко и др., 2021). Между тем, интенсивность загрязнения воздуха в городах сильно зависит от локальных атмосферных процессов, которые возникают при взаимодействии города и окружающей среды. Результат такого взаимодействия — появление “городского острова тепла”, выделяющегося не только температурными различиями между городом и прилегающей к нему “зеленой” территорией, но и особой системой локальных циркуляций в пределах городской застройки, определяющей характер развития процессов переноса и рассеяния загрязняющих веществ в границах города. Предполагается, что в некоторых случаях особенности распределения элементов-примесей в снежной толще могут выступать геохимическими маркерами этих процессов.

В данной работе исследовано влияние геохимического барьерообразования на межслоевое распределение элементов примесей в снежной толще и оценена возможность использования межслоевого соотношения в снежном покрове устойчивых элементных групп в качестве геохимического маркера при выявлении застойных зон в городском острове тепла.

МЕТОДИКА

Изучение послойной изменчивости гранулометрического и химического состава осевшего

аэрозольного вещества проводилось на снегомерной площадке, расположенной во внутреннем сквере Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). На данной площадке был выполнен послойный отбор проб снега (28 февраля 2021 г.). Пробоотбор осуществляли с помощью специального снегоотборника (Патент 2411487..., 2011). Отдельно следует заметить, что пробоотбор снега осуществлен в перерыве между снегопадами. За это время на поверхности снега наблюдался небольшой прирост снежной массы за счет осадения поверхностной изморози (иней). Его измерение выполнено с помощью специального устройства (Патент на промышленный... 89907, 2014). Измеренная мощность этого новообразованного рыхлого слоя к моменту снегоотбора была немногим более 1 см, а общая высота снежного покрова составила 71 см.

Послойный снегоотборник

На рис. 1а представлено устройство для послойного отбора снега с регулируемым шагом опробования снежной толщи. Оно включает прямоугольную призму, стенки (1) которой выполнены из материала, химически инертного к атмосферным компонентам, депонированным в снежной толще. Пластины-стенки (1) призмы крепятся к ребрам жесткости (2), выполняющим одновременно функции направляющих при вертикальном погружении призмы в снежную толщу. Отбор проб снега производится с помощью

ножа-пластины (3), представляющей собой съемную переднюю стенку призмы. Устройство содержит платформу-консоль (4), позволяющую регулировать шаг опробования, и которая устанавливается на передние ребра жесткости. Платформа-консоль снабжена зажимами (5), обеспечивающими ее фиксацию на нужной глубине.

Методика пробоотбора. Перед началом опробования призму снегоотборника вертикально погружают в снежную толщу (рис. 1б). Затем отрезают снежный шурф, так, чтобы лицевая стенка (3) призмы была свободна от снега (рис. 1в). После ее снимают, на передние ребра жесткости (2) устанавливают подвижную платформу-консоль (4) и фиксируют на требуемой толщине снежного брикета. После этого с помощью зажимов (5) закрепляют платформу (рис. 1г). Для отбора пробы на платформу-консоль (4) кладется передняя пластина призмы (3) и поступательным движением вдвигается в прямоугольный снежный керн, ограниченный с трех сторон стенками призмы. Полученный таким образом снежный брикет помещается в полиэтиленовый пакет пластмассовым совком.

Подготовка проб к анализу в день отбора заключалась в их взвешивании и расчете плотности снега (ρ , г/см³). После снег растапливали при комнатной температуре. В снеговой воде значения водородного показателя определяли потенциометрически, а удельную электропроводность (ηS , мкСм/см) — кондуктометрическим методом.

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). ДРС относится к неразрушающим методам исследований. Метод не требует предварительной калибровки, он одинаково эффективен как при низких концентрациях частиц, так и при наличии их агрегатов. Измеряемый размер частиц колеблется от 1 до 10000 нм. Необходимо отметить, что в данный интервал вписывается известная трехуровневая градация аэрозолей Л.С. Ивлева (Ивлев, Довгало, 1999): мелкодисперсные ($D \leq 0.1$ мкм или 100 нм), среднедисперсные ($0.1 < D < 1$ мкм или $100 < D < 1000$ нм), грубодисперсные ($r \geq 1$ мкм или 1000 нм). Для метода характерны невысокая себестоимость измерений, низкая погрешность и экспрессность.

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 соотноше-

нию (%) площади фигур, описывающих данные распределения частиц по размерам в линейных координатах.

Для количественного химического анализа использовали предварительно отцентрифугированные с целью удаления взвешенных частиц пробы снеговой воды. Химический анализ проводили с помощью масс-спектрального метода с индуктивно-связанной плазмой с использованием анализатора Agilent 7700x (Agilent Technologies США).

Траекторный анализ переноса воздушных масс к Сыктывкару, с которыми связаны особенности формирования зимнего аэрозольного поля, проводился методом взвешенных траекторий CWT (Concentration weighted trajectories; (Hsu et al., 2003)) с использованием массива 7-суточных обратных траекторий, рассчитанных по методике (Shukurov et al., 2018) с помощью траекторной модели NOAA HYSPLIT_4 (Draxler, Hess, 1998) и метеополей NCEP/NCAR Reanalysis (Kistler et al., 2001). Восстановление поля вероятности переноса воздуха к городу проводилось по методике (Shukurov, Chkhetiani, 2017).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности формирования снежного покрова зимой 2020/21 г.

Первый снег выпал 31.10, при этом высота снега составила 4 см. Но 03.11 установилась относительно теплая погода со среднесуточной температурой +3°C и с перемежающимися осадками в виде дождя и мокрого снега, что обусловило медленный прирост снега — 08.11 высота снежного покрова составила 6 см (рис. 2а).

В последующие дни, несмотря на снегопады, прирост снежного покрова шел медленно — из-за плюсовой дневной температуры, выпавший за ночь снег подтаивал и проседал. Устойчивый прирост снежного покрова возобновился с началом холодной погоды после 20.11 и уже к 27.11 его высота достигла 11 см. В дальнейшем, по причине редких и маломощных снегопадов (рис. 2б), увеличение мощности снежного покрова шло медленно и к моменту начала периода первого потепления (21–23.12) высота снега составила 29 см. В этот период установилась относительно теплая погода (со среднесуточной температурой около 0°C) с осадками в виде мокрого снега с дождем, что обусловило, несмотря на обильные снегопады (рис. 2б), проседание снежной толщи до 28 см. Но после 23.12 сильно подморозило (с 0 до –13°C). Установившаяся затем зимняя морозная погода и частые снегопады обеспечили быстрое нарастание снежного покрова и к началу второго периода потепления (25–28.01) его высота составила 54 см. Следует заметить, что при втором потеплении максимальная температура воздуха колеба-

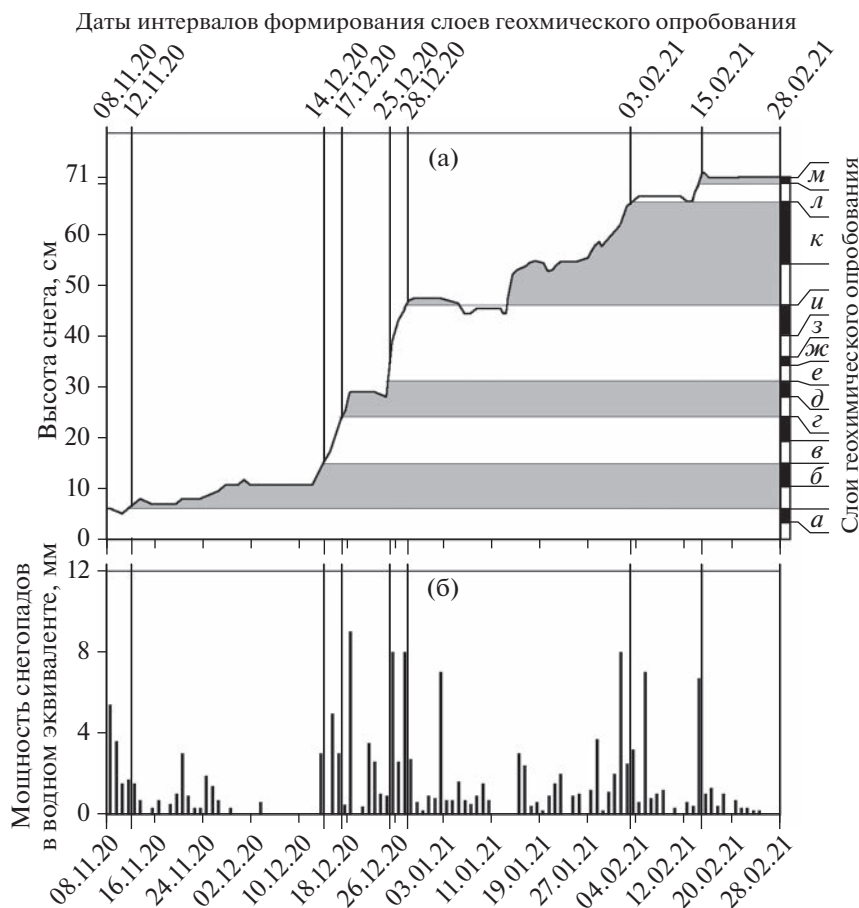


Рис. 2. Временной ряд интенсивности нарастания снежного покрова в сопряжении со слоями геохимического опробования снежной толщи (а), хронологически привязанных к датам выпадения стратиграфически значимых снегопадов (б) (по данным м/с «Сыктывкар»). Допол. обозн.: Временные периоды образования снежных слоев геохимического опробования: а – 08–12.11.20; б – 12.11–14.12.20; в – 14–17.12.20; д – 17–25.12.20; е, ж, з, и – 25–28.12.20; к – 28.12.20–03.02.21; л – 03–15.02.21; м – 15–28.02.21.

лась в интервале $+1.3...-1.3^{\circ}\text{C}$. Осадки выпадали в виде мокрого снега с моросью. В этот период потепления высота снега с 54 см снизилась до 49. Но затем тренд снегонакопления принял зимний характер и его нарастание не прерывалось.

Структурно-текстурные особенности строения снежной толщи

Их характеризует разрез 27, заложенный 26.02.2021 г. на снегомерной площадке во внутреннем сквере во дворе Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. В его вертикальном профиле выделяются десять стратиграфических слоев разной мощности (рис. 3). *Первый слой* мощностью чуть более 1 см представлен свежавыпавшим слоем поверхностной изморози. Он перекрывает рыхлый *второй слой* с толщиной 8 см. Его текстура уже несет следы постседиментационных преобразований ранее выпавших твердых осадков: в нем наряду с фрагментами свежавыпавшего снега

отмечено наличие мелких (<0.5 мм) округлых зерен. *Третий слой* мощностью 6 см представлен мелкозернистым уплотненным снегом. Это уплотнение вызвано сильным ветром и понижением температуры. Толщина *четвертого слоя* составляет 13 см. Он сложен непрозрачными агрегатами из мелких (0.5–1.0 мм) округлых и гранных снежных зерен. Эти гранные кристаллы становятся хорошо заметными в зоне контакта с *пятым слоем*, который образован оледенелыми агрегатами снежных зерен, образовавшихся во время январской оттепели. Из-за оптической анизотропии снежных слоев зона верхнего и нижнего контакта визуально различима достаточно четко. Предполагается, что механизм образования горизонтальной слоистости оледенелых агрегатов связан с миграцией капиллярной влаги. Считается, что при потеплении капиллярная влага с поверхности снежных зерен мигрирует в нижележащие слои холодного снега, образуя при этом субгоризонтальные ледяные образования в виде

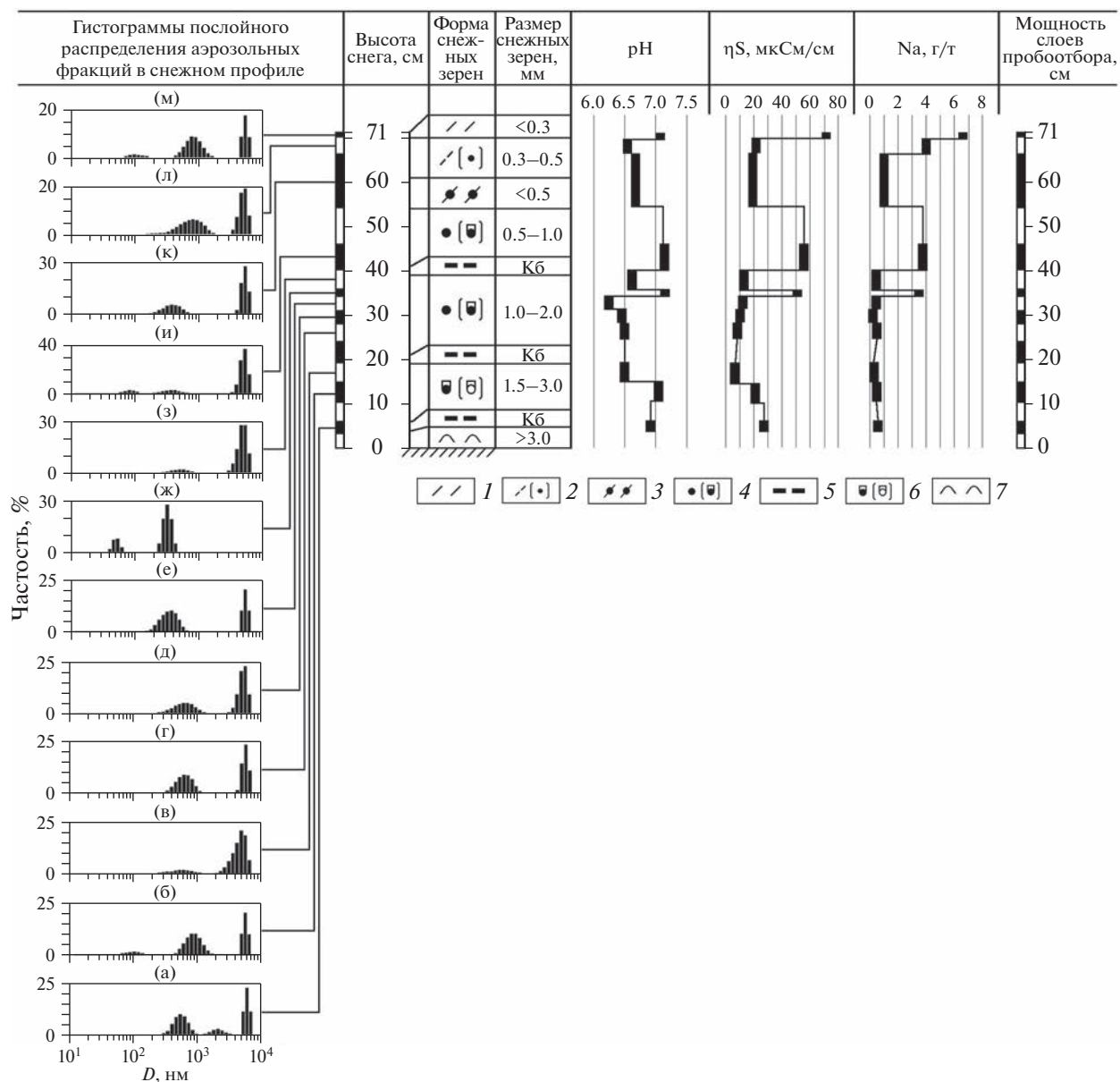


Рис. 3. Послойное распределение аэрозольных частиц по размерам в снежной толще, сопряженное с интегральными показателями геохимической активности снежного покрова: водородным показателем (pH), электропроводностью (ηS , мкСм/см). Услов. обозн.: 1 – свежесыпавший снег (иней) (PP), 2 – недавно отложенный снег (DFbk) с округлыми зернами (RGsr), 3 – ветровая упаковка мелкозернистых частиц снега (RGwr), 4 – округлые снежные зерна и округлые частицы с гранями (RGlr/RGxf), 5 – горизонтальный оледенелый слой из агрегатов крупных снежных зерен (IFil), осуществляющий функции капиллярного геохимического барьера (Кб); 6 – округлые частицы с гранями и округляющиеся снежные зерна с гранями (RGxf/FCxr); 7 – глубинная изморозь (DNxr) (классификация форм зерен дана по работе (Фирц и др., 2012)).

прослоев, не всегда выдержанных по простира-нию. Ледяные прослои сохраняют некоторую степень проницаемости (Фирц и др., 2012), что обеспечивает их рост в снежной толще за счет намерзания капиллярной влаги на этих образованиях. Предполагается, что подобные горизонтальные ледяные образования, ограничивающие вертикальную миграцию капиллярной влаги, могут

выполнять функцию своеобразного капиллярно-геохимического барьера.

Шестой слой, мощностью до 20 см, характеризуется укрупнением размеров округлых частиц с гранями. Оно становится заметным в зоне контакта с *седьмым слоем*, представленный оледенелыми агрегатами снежных зерен. Данный оледенелый слой, мощностью до 2 см, также, как и

верхний, образовался в декабре в период кратковременной оттепели. *Восьмой слой* (до 13 см), сложен округлыми частицами с гранями. *Девятый слой* представлен оледенелым прослоем, сформировавшимся во время ноябрьской оттепели. Данный слой перекрывает самый нижний *десятый слой*. Он образован изоморфными кристаллами глубинной изморози (до 3 мм). Мощность этих нижних двух слоев 3 и 4 см соответственно.

*Межслоевая изменчивость
геохимических показателей в снежной толще*

Водородный показатель относится к интегральным геохимическим показателям. Колебания водородного показателя (рН) в снеговой воде варьируют в диапазоне от 6.2 до 7.3 (рис. 2). Обращает внимание послойная изменчивость единичных значений кислотности в средней части снежной толщи. Разница между значениями рН в слое—*е* и слое—*ж* составляет единицу. Ниже и выше этой зоны по профилю межслойные различия значений рН колеблются в пределах десятых долей с трендом смещения от слабокислых к нейтральным. Следует заметить, что максимальные значения рН наряду со слоем—*м* фиксируются также в слое—*ж* и слое—*и*, приуроченные к верхнему капиллярному барьеру. Средний и нижний капиллярные барьеры в снежном профиле менее заметны. Следует заметить, что наблюдаемая динамика изменений водородного показателя дает мало информации о геохимических условиях, формирующихся в снежной толще, поскольку рН отражает интегральную характеристику всей совокупности щелочно-кислотных взаимодействий в снежном покрове. Представляется, что анализ электропроводности снеговой воды может оказаться более информативным в условиях подщелачивания снежной толщи осаждающимся аэрозольным веществом.

Электропроводность снеговой воды измеряли кондуктометрическим методом. Анализ вертикального распределения значений электропроводности снега выявили два пика (рис. 3). Оба они фиксируются в снежных слоях в средней части снежного разреза, прилегающих к капиллярному барьеру. Синхронный ход кривой распределения значений концентрации Na и электропроводности в этой зоне свидетельствует о том, что изменение электропроводности определяется в первую очередь изменением концентрации натрия на геохимических барьерах.

Не исключается также и то, что источником натрия может быть ветровой перенос антиголедных препаратов. Возможно, что их осаждение на поверхность снега совместно с аэрозолями увеличивает содержание легкогидролизуемых соединений. Участие данных соединений в реакциях низкотемпературного (криогенного) комплексоб-

разования инициирует увеличение концентрации свободных ионов и усиление электропроводности в зоне геохимических барьеров. Вместе с тем, измерение электропроводности в средней части снежной толщи выявило малопонятный факт — наличие между слоями с высокими значениями электропроводности слой с низкими показателями измеренного параметра. Такое контрастное снижение электропроводности в зоне капиллярного барьера возможно при наличии разнонаправленной миграции аэрозольного вещества в составе поровой капиллярной влаги. Но данное предположение требует дополнительной проверки.

*Частотное распределение аэрозольных частиц
в снежных слоях хронологически привязанных
к стратиграфически значимым снегопадам*

На рис. 3. представлены послойные распределения субмикронных фракций аэрозольного вещества по размерам. Хронологическую привязку слоев осуществляли по времени выпадения стратиграфически значимых снегопадов (рис. 2б). Анализ частотного распределения субмикронных частиц по размерам четко показал наличие для поверхностного инея (слой—*м*) и глубинной изморози (слои—*а*, —*б*) трехмодального, а для основной толщи (за исключением слоя—*и*) — бимодального типов распределения (слой—*л*, —*к*, —*ж*, —*з*, —*е*, —*д*, —*г*, —*в*).

В слоях с бимодальным типом распределения частиц, образовавшихся в результате снегопадов, наблюдается устойчивая привязка совокупностей к определенным интервалам размерной шкалы. Так, одна фиксируется с пологовершинными и островершинными пиками с максимумами в интервале 345–898 и 4540–5586 нм. В указанных слоях постоянно преобладает доля крупных частиц (8–48% против 42–92%). Исключение составляют слой—*ж*. Слой—*ж* резко выделяется из остальных тем, что при его бимодальном распределении фракций в нем, по сравнению с остальными пробами, существенно увеличена доля мелкодисперсной фракции с островершинными пиками на отметках 55 и 345 нм. Во всех остальных случаях она меньше на порядок. Такое соотношение фракций аэрозольного вещества в слое—*ж* — отражение постседиментационного перераспределения аэрозолей, которое происходило в снежных слоях, прилегающих к зоне капиллярного барьера в результате нисходящей миграции капиллярной влаги. В итоге, нижележащий слой—*е* значительно обогащался среднедисперсной фракцией. При этом, если во всех рассмотренных до этого случаях грубодисперсная фракция преобладала над среднедисперсной, то в слое—*е* при размере средне- и грубодисперсных фракций с хорошо выраженными пиками с максимумами 379 и 5590 нм

соответственно, доля среднedisперсной фракции составляет 58% против 42.

Влиянием капиллярного механического барьера можно также объяснить и появление мелкодисперсной фракции в слое—*и*. Как следует из рис. 3, нижележащие четыре слоя (—*и*, —*з*, —*ж*, —*е*) приурочены к снежному горизонту, снегонакопление в котором шло очень быстро и в нем залегает первый капиллярный барьер (рис. 2а). При этом для слоя—*и* зафиксированы все три размерные фракции частиц с пиками в области 116, 394 и 5332 нм. Считать, что это является следствием осаждения сухих аэрозолей у нас нет оснований, поскольку время и характер выпадения твердых осадков показывает (рис. 2б), что в этот период прирост снежной толщи происходил только за счет снегопадов. Поэтому правильным будет то, что первоначально в слое—*и*, образовавшимся после снегопадов, было две фракции — средне- и крупнодисперсные, появление же мелкодисперсной — результат межслоевого перераспределения частиц за счет их термодиффузиофореза. При этом источником поступления частиц мог быть слой—*з*. Для данного слоя характерно бимодальное распределение средне- и крупнодисперсной фракций с отметками 519 и 5045 нм, но в соотношении фракций доля крупнодисперсной фракции значительно преобладает над среднedisперсной — 92% против 8. Заметим, что в слое—*к*, перекрывающим слой—*и*, соотношение указанных фракций ~ 1 : 3.

В слоях с трехмодальным типом распределения частиц анализ соотношения дисперсных фракций показал, что в поверхностном инее (слой—*м*) первая фракция имеет интервал от 60 до 180 нм с пологим пиком в отметке 98 нм. Две другие фракции выделяются в широком интервале от 400—1900 до 4500—7000 нм с хорошо выраженными пиками в области 554 и 5560 нм соответственно. При этом если доля мелкодисперсной фракции составляет 3%, то доли средне- и грубодисперсной фракций примерно равны — 46 и 51% соответственно. Слой—*м* образовался в перерыве между снегопадами. Поэтому его гранулометрический состав отражает особенности сухого осаждения аэрозолей и связан с образованием поверхностной изморози (иней).

Вместе с тем для глубинной изморози (слои—*б*, —*а*) отмечается трехмодальный состав фракций. Особенностью распределения дисперсных фракций аэрозольного вещества в слое—*а* является то, что размерный интервал сильно смещен вправо. При этом одна совокупность характеризует среднedisперсную фракцию с хорошо выраженным пиком с максимумом 549 нм, а две других — с пологовершинным и островершинным пиками с отметками 2018 и 6086 нм — грубодисперсную. Судя по соотношению фракций (45, 8, 47% соответственно) появление второй грубодисперсной фракции

связано с увеличением концентрации частиц в капиллярной жидкости за счет вертикальной миграции растворимых соединений в составе почвенной влаги. Основанием для данного предположения являются относительное увеличение электропроводности в этой части снежного профиля (рис. 3). Возможно, что термодиффузиофорез паров почвенной влаги достаточно интенсивен, поскольку в граничащем со слоем—*а* в слое—*б* появилась мелкодисперсная фракция с отметкой 112 нм в интервале 65—150 нм. При этом среднedisперсная фракция имеет интервал 450—2000 нм с островершинным пиком в отметке 898 нм, а грубодисперсная фракция выделяется в интервале 4600—7000 нм с хорошо выраженным пиком в отметке 5586 нм. Отмеченные изменения в гранулометрическом составе слоев—*а*, —*б*, возможно связаны с особенностями постседиментационного преобразования аэрозольного вещества в припочвенном слое снега, к которому приурочено формирование морозного (криогенного) термодиффузионного геохимического барьера. Следует заметить, что предпосылками появления геохимических барьеров в снежном покрове служат природные эффекты и явления (термофорез, диффузиофорез, капиллярные силы, адгезия (смачиваемость)), обусловленные физическими свойствами снежного покрова.

Особенности геохимического барьерообразования на поверхности снега и снежной толще

По данным количественного масс-спектрального анализа были построены графики послойного распределения содержаний химических элементов в снежном профиле (рис. 4). Из данного рисунка следует, что в снежной толще выделяют три зоны накопления элементов-примесей.

Первая зона фиксируется в слое—*м* и индицируется широким спектром элементов-примесей, накапливающихся на поверхностном термодиффузионном геохимическом барьере (рис. 4). Его проявление в зоне контакта “снег—атмосфера” обусловлено зимними особенностями осаждения сухих аэрозолей. 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, что способствует сильному выхолаживанию снежного покрова и возникновению инверсии температур (“снеговая инверсия”, по: Рихтер, 1948). Кроме того, поверхность снежного покрова характеризуется не только высокой отражательной и излучательной способностью (Кузьмин, 1957), но и оказывает иссушающее влияние на приземный слой воздуха (Рихтер, 1948). В условиях наличия градиента температур и влажности снежный покров, вбирая в себя из приземного слоя воздуха избыток влаги, инициирует нисходящую мигра-

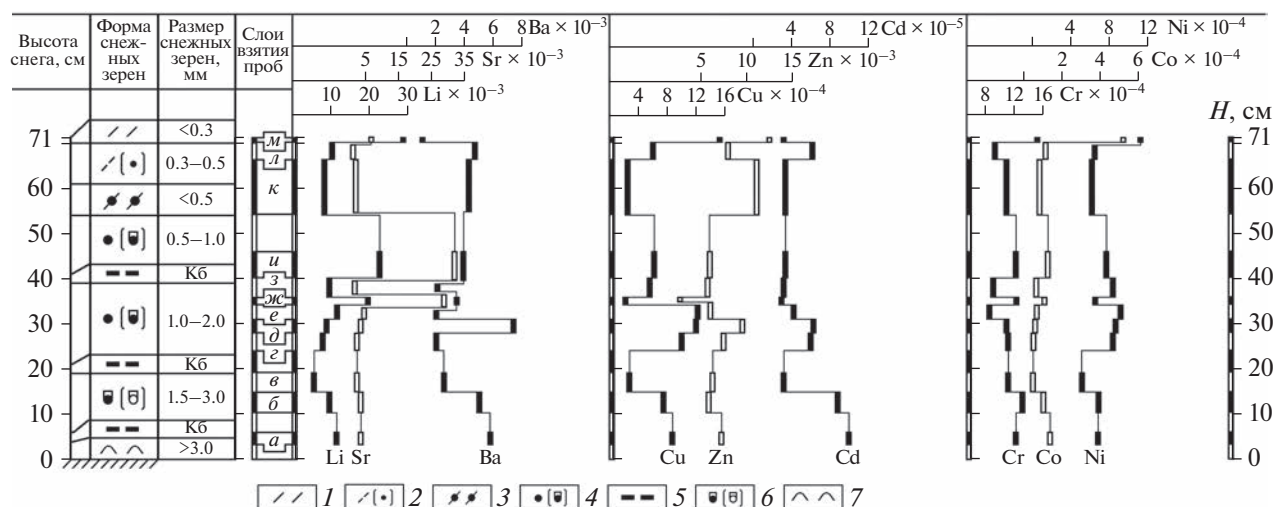


Рис. 4. Накопление элементов-примесей на геохимических барьерах в сезонном снежном покрове (снегомерная площадка во внутреннем сквере Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, разрез 27). Услов. обозн.: 1 – свежесвыпавший снег (иней) (PP), 2 – недавно отложенный снег (DFbk) с округлыми зернами (RGsr), 3 – ветровая упаковка мелкозернистых частиц снега (RGwp), 4 – округлые снежные зерна и округлые частицы с гранями (RGlR/RGxf), 5 – горизонтальный оледенелый слой из агрегатов крупных снежных зерен (IFil); 6 – округлые частицы с гранями и округляющиеся снежные зерна с гранями (RGxf/FCxr); 7 – глубинная изморозь (DNxr) (классификация форм (F) зерен дана по работе (Фирц и др., 2012)).

цию воздуха. В результате формируется устойчивый массоперенос водяных паров по направлению к снежному покрову. Данное обстоятельство вызывает сток аэрозольного вещества из приземной атмосферы. Процесс сопровождается увеличением концентрации элементов-примесей на поверхности снежного покрова (рис. 4).

Вторая зона накопления элементов-примесей находится в средней части снежного профиля и приурочена к механическому капиллярному барьеру, который, в свою очередь, сформировался в оледенелом прослое снега, образовавшегося во время оттепелей. Заметим, что правильность определения положения механического капиллярного барьера коррелировалась совпадением пиков элементов-примесей, образующих парagenную геохимическую ассоциацию, что отражает реальные снегеохимические процессы, обеспечивающие накопление элементов-примесей на механическом капиллярном геохимическом барьере. Предполагается, что механизм накопления элементов-примесей связан с образованием клатратов.

Известно, что переход воды из жидкого в кристаллическое состояние происходит при строго определенной температуре – при 0°C . Однако присутствие растворенного вещества понижает точку замерзания воды. Точка замерзания в соответствии с законом Рауля снижается пропорционально молярной концентрации растворенного вещества. Охлаждение разбавленного раствора при температуре ниже 0°C вызовет кристаллизацию льда и фазовое разделение. При дальнейшем

снижении температуры количество объемного льда увеличивается, а остаточный раствор становится более концентрированным, пока не будет достигнута эвтектическая концентрация и температура. В данной точке растворенное вещество и остальной растворитель кристаллизуются и выпадают в осадок в виде взаимопроникающих областей растворенного вещества и льда, т.е. образуют клатратное соединение (Глинка, 1987). Известно, что при его образовании определяющую роль играет не реакционная способность компонентов, а пространственное соответствие областей (комплементарность) окристаллизованного растворенного вещества и чистого объемного льда.

Следует заметить, что второй пик концентрации элементов-примесей, образовавшийся ниже капиллярного геохимического барьера, приурочен к слою перехода снежных зерен от мелкозернистых к среднезернистым. Его появление в средней части снежной толщи объясняется следующим. Известно, что из-за высокого альбедо, температура снежного покрова, как правило, ниже температуры приснежного слоя воздуха. В последнем это вызывает уменьшение относительной влажности, которое приводит к дефициту концентрации водяного пара в воздухе над снежной поверхностью. Однако, дефицит пара в приснежном слое воздуха может восполняться за счет возгонки (аблимации) ледяных кристаллов. Поскольку аблимационный переход из кристаллической фазы в парообразную идет с поглощением тепла, то температура верхнего слоя снега снижается еще больше. Вследствие чего в средней части

снежной толщии возникает градиент температур и связанное с ним подтягивание водяного пара из нижних относительно теплых слоев снега в верхние — более холодные.

В результате этого в верхней части снежной толщии возникает градиент упругости водяного пара, обусловленный градиентом температур. Вследствие чего водяные пары поступают к снежной поверхности как из глубины, так и из средней части снежной толщии. Однако в средней части снежной толщии этот процесс может нарушаться. Известно, что в сухом снеге при средней плотности 0.28 г/см^3 суточные колебания температуры воздуха могут достигать до глубины 50 см, ниже которой полностью затухают (Кузьмин, 1957). Между тем наблюдения (Тентюков, 2021) за динамикой структурно-текстурных преобразований в свежавыпавшем слое снега при его переходе в стратиграфически значимый слой снегонакопления позволяют предположить, что глубина проникновения суточных температурных колебаний воздуха и связанные с ними постседиментационные преобразования твердых осадков, при прочих равных условиях, будут ограничиваться встречным диффузионным массопереносом паров почвенной влаги. Этот процесс возникает в нижней части снежного профиля в результате внутриснежной температурной инверсии (в подошве снежной толщии температура всегда выше, чем в ее средней части). Возможность развития данных процессов в снежной толще показана в работах (Гуртовая, 1961; Sokratov, Maeno, 2000; Sokratov, 2001; Pinzer et al., 2012). Следовательно, появление второго пика концентрации элементов-примесей в средней части снежной толщии связано с межслоевым перераспределением аэрозольного вещества, вызванного изменением миграции капиллярной влаги в зоне контакта нисходящего фронта суточных колебаний температур и встречного диффузионного массопереноса паров почвенной влаги.

Третья зона накопления элементов-примесей фиксируется в нижней части снежного разреза и также, как и во второй зоне, концентрирование элементов-примесей приурочено к капиллярному геохимическому барьеру. Однако механизм его формирования отличается. Так, известно, что плотность почвы и, следовательно, ее объемная теплоемкость в несколько раз больше аналогичных показателей для снега (Гуртовая, 1961). Это приводит к тому, что в зоне контакта “снег—почва” возникает температурный градиент, что вызывает приток субохлажденных поровых почвенных растворов, который, в свою очередь, вызывает перекристаллизацию ранее выпавших снежных зерен и формирование кристаллов глубинной изморози. Их дальнейший рост происходит в результате неоднократной перекристаллизации, поддерживаемой постоянным диффузионным массоперено-

сом почвенной влаги. В связи с этим постулируется, что в нижней части сезонной снежной толщии существует своеобразная кристаллообразующая среда, для которой характерно наличие определенных параметров, обеспечивающие генерирование условий для зарождения и роста кристаллов глубинной изморози. К ним относятся изменение термодинамических и физико-химических параметров среды. К наиболее информативным можно отнести показатели кислотности и электропроводимости, а также плотность снежного слоя в приконтактной зоне (рис. 4). А поскольку наибольшая диффузия пара и самые высокие температуры снега фиксируются, как правило, в нижней части снежной толщии (Коломыц, 2013), то именно в приконтактном слое снега с относительно невысокой плотностью происходит ускоренный рост и перекристаллизация ледяных кристаллов глубинной изморози с образованием клатратов, что приводит к накоплению элементов-примесей в кристаллах глубинной изморози (рис. 4). Следовательно, барьерообразование и накопление элементов-примесей на термодиффузионном геохимическом барьере в нижней части сезонной снежной толщии обеспечиваются существованием в этой переходной зоне особой кристаллообразующей среды. При этом поступление элементов-примесей в эту зону обеспечивается за счет термодиффузиофореза почвенной влаги и растворенного почвенного вещества.

Особенности формирования зимнего аэрозольного поля над городской территорией и межслоевые различия в распределении элементов-примесей

Если сопоставить межслоевое накопление элементов-примесей, а также сравнить характер кривых распределения содержания элементов-примесей в снежной толще (рис. 4), то самый верхний слой-м выделяется широким спектром накопления элементов. Однако, анализируя вертикальное распределение элементов-примесей, можно заметить, что группа из трех элементов — Co—Cr—Ni отличается от двух других (Li—Sr—Ba и Cu—Zn—Cd) более монотонным ходом кривых распределения. Объяснить данный факт только особенностями постседиментационного перераспределения аэрозольного вещества при формировании геохимических барьеров будет не совсем корректным. Было предположено, что при формировании над городской территорией зимнего аэрозольного поля траектории движения воздушных масс, с которыми связано выпадение стратиграфически значимых снегопадов, могут определенным образом наследоваться в снежных слоях при нарастании снежной толщии и тем самым влиять на особенности вертикального распределения элементов-примесей. Для проверки

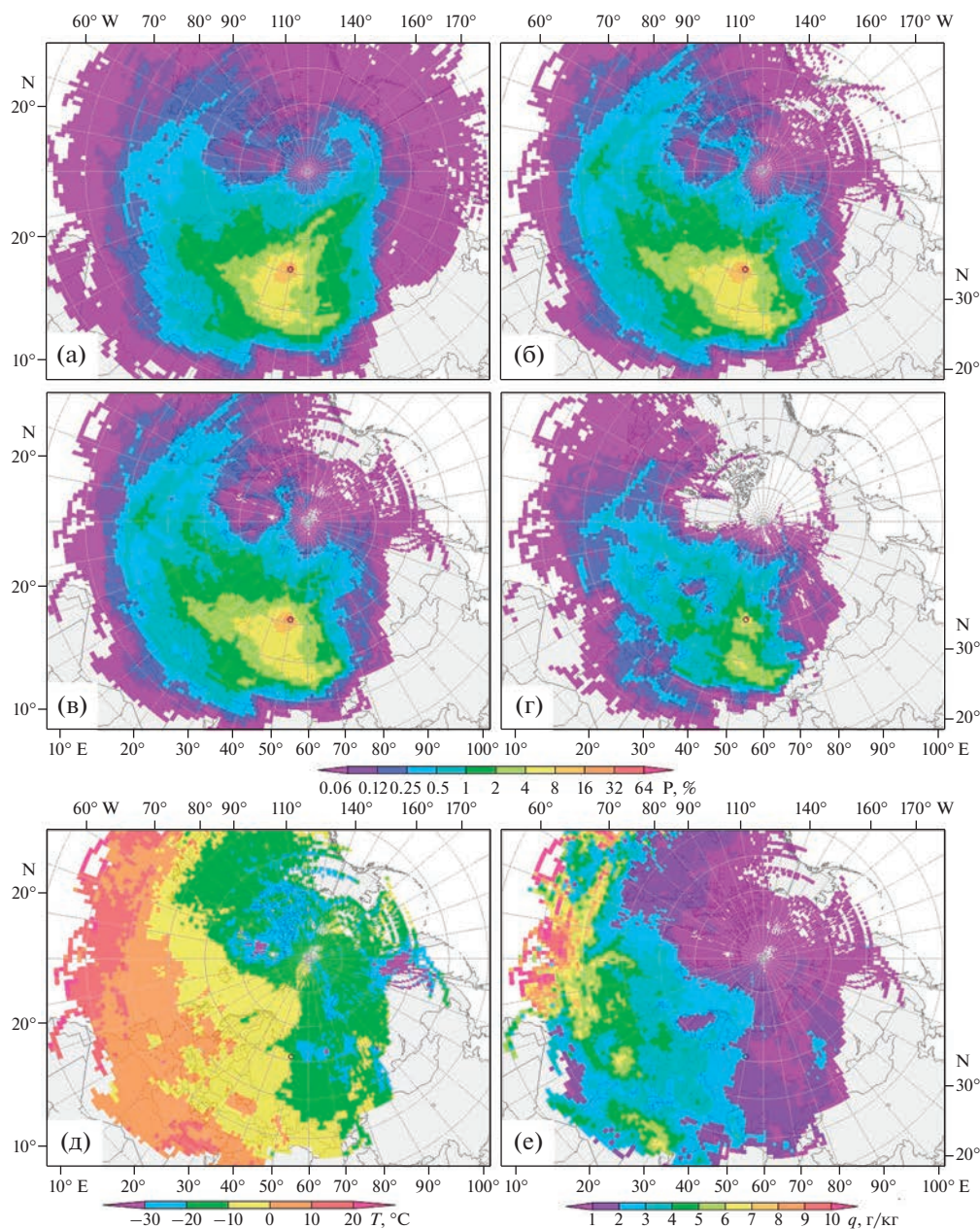


Рис. 5. Средняя вероятность переноса воздушной частицы, $P[\%]$, над регионом по пути к Сыктывкару (отмечен кружком) зимой 2021 г. (а) По всем траекториям в слое 10–2010 м. (б) Как в (а), но только по траекториям с относительной влажностью над Сыктывкаром более 90% и отрицательной температурой воздуха. (в) Как в (б), но с ограничением по удельной влажности (см. в тексте). (г) Как в (в), но только для участков траекторий, пролегающих в атмосферном пограничном слое. (д) Средняя температура воздуха, $T[^\circ\text{C}]$, в области переноса. (е) Средняя удельная влажность воздуха, $q[\text{г/кг}]$, в области переноса. Здесь и далее размер ячейки $1^\circ \times 1^\circ$.

данного предположения был выполнен траекторный анализ атмосферного переноса примесей.

Анализ атмосферного переноса примесей, с которыми связано формирование зимнего аэрозольного поля над городской территорией в дни со снегопадами. Для этого, используя 10-суточные обратные траектории движения воздушных частиц, прибывавших ежедневно с 08.11.2020 по 28.03.2021 в слой 10–2010 м (нижняя тропосфера; шаг по высоте

100 м) над Сыктывкаром (всего 54000) для всех дней, была получена диаграмма, характеризующая региональную вероятность переноса воздушных частиц над поверхностью при движении к точке наблюдения, в данном случае — к г. Сыктывкару (рис. 5а).

Вместе с тем известно, что выпадение твердых осадков возможно при отрицательной температуре воздуха, $T[^\circ\text{C}]$, и относительной влажности

воздуха, r [%], вблизи 100%. Поэтому было предположено, что более точно региональную вероятность переноса воздушных частиц связанных с осадками в Сыктывкаре можно восстановить если в расчет брать траектории только тех воздушных частиц, для которых $r_0 > 90\%$ и $T_0 < 0^\circ\text{C}$ над Сыктывкаром. Таких траекторий оказалось 17000 из первоначального массива. Региональная вероятность переноса, восстановленная по этим траекториям показана (рис. 5б). Отметим, что при приближении r_0 к 100% поле региональной вероятности переноса качественно меняется незначительно по сравнению с порогом $r_0 = 90\%$.

Траектории учитываются только до того часа от конечной точки (Сыктывкара), где удельная влажность воздуха, q [г/кг], падает ниже 5% от удельной влажности над Сыктывкаром, q_0 . То есть считаем, что от тех регионов, над которыми $q < 0.05q_0$, переносом влаги к Сыктывкару можно пренебречь. Региональная вероятность с учетом этого условия показана на (рис. 5в). Сравнение диаграмм рис. 5а–5б показало небольшое отличие двух последних от первой, и это отличие, как мы полагаем, может характеризовать траектории, с которыми связано сухое осаждение аэрозолей в перерывах между снегопадами. Поскольку и влага, и аэрозоль попадают в нижнюю тропосферу из атмосферного пограничного слоя (АПС), а оттуда – с поверхности, то была построена диаграмма вероятности переноса, так же, как и для рис. 5в, но только по тем участкам траекторий, которые находились в региональном атмосферном пограничном слое. Эта диаграмма представлена на рис. 5г.

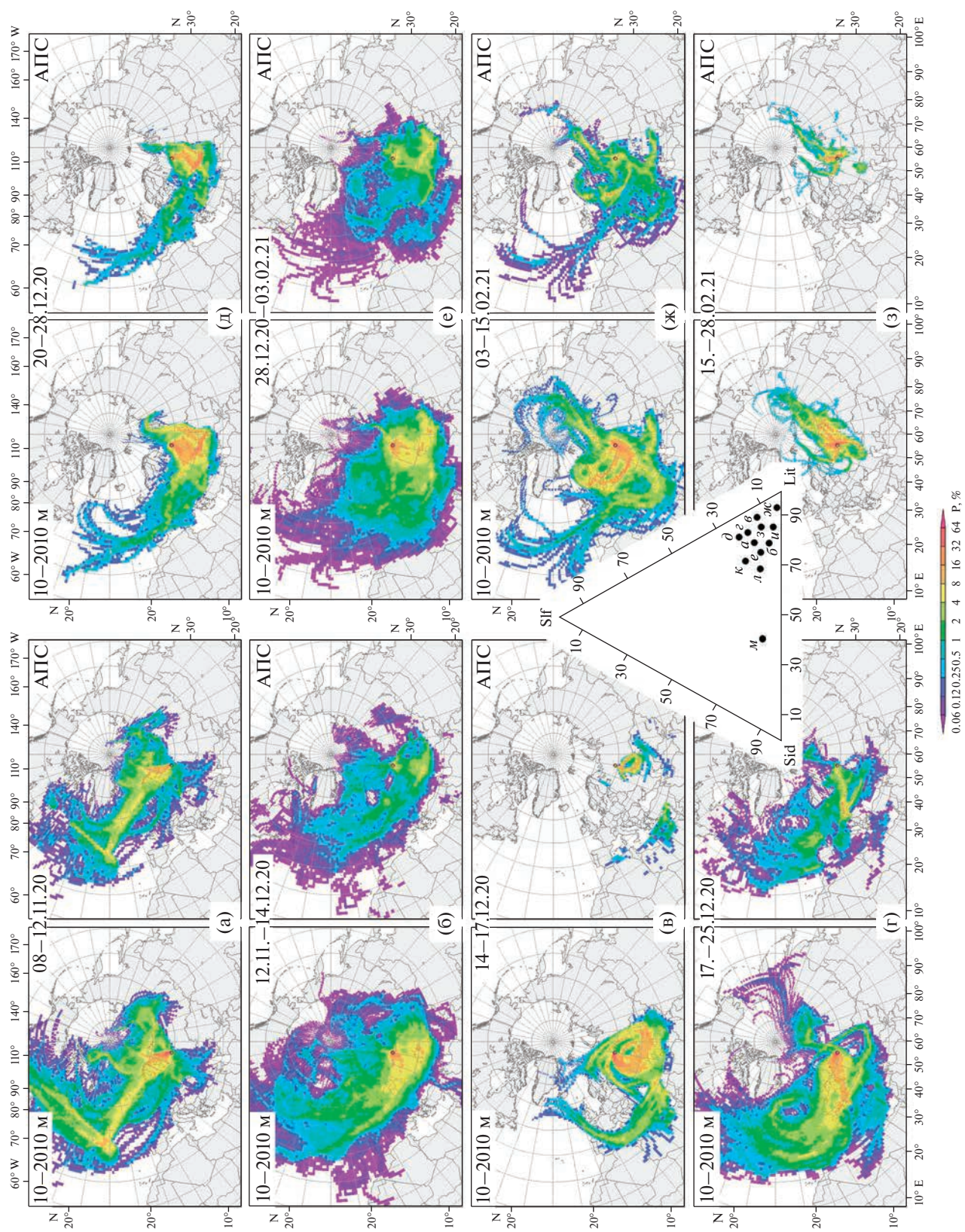
Судя по диаграммам (рис. 5а–5г), можно сказать, что в дни со снегопадами особенности формирования аэрозольного поля над городской территорией связаны с воздушными частицами, которые с наибольшей вероятностью прибывали по антициклонической дуге, полегавшей над регионами вдоль меридиана Сыктывкара (50 в.д.) и над северо-западом Казахстана, в том числе над севером частично опустыненного Арало-Каспийского аридного региона (АКАР). Антициклоничность переноса из АПС может свидетельствовать о том, что обстановка, способствовавшая снегопадам в Сыктывкаре ($r_0 > 90\%$) зимой 2021 г. возникла вследствие вторжения западного отрога Сибирского антициклона на ЕТР. По всей видимости, холодный (рис. 5д) и сухой (рис. 5е) воздух антициклона, прошедший через АПС над потенциально пылящими регионами АКАР и юга Рос-

сии и, следовательно, с большой вероятностью несущий аэрозольные ядра конденсации, сталкивался над Сыктывкаром с влажным (рис. 5е) и более теплым (рис. 5д) воздухом, поступавшим с западных направлений. Подробный анализ метеоусловий в области переноса воздушных частиц требует отдельного исследования и выходит за рамки данной статьи.

Между тем следует заметить, что характер вертикального распределения элементов-примесей в снежном профиле (рис. 4) не дает оснований однозначно перенести полученные результаты на снежные слои, образовавшиеся до 28 февраля. Однако учет временных периодов выпадения стратиграфически значимых снегопадов (рис. 2б) позволил построить обратные траектории поля вероятности переноса воздушных частиц, и для нижележащих слоев (см. парные диаграммы на рис. 6а–6з). При этом левые части сдвоенных диаграмм на рис. 6а–6з построены по траекториям для всего диапазона высот 10–2010 м, а правые – только по участкам траекторий, попадавшим в атмосферный пограничный слой (АПС) как над городом, так и на всем протяжении траекторий.

Из анализа послойных диаграмм (рис. 6а–6з) следует, что формирование химического состава снежных слоев а–д, образовавшихся в период с 08.11 по 26.12.2020 г., преимущественно связано с западным атмосферным переносом, тогда как накопление фракций в слоях е–з, формировавшихся с 25.12.2020 г. по 28.02.2021 г., шло при доминировании восточного переноса воздушных масс. Однако во всех проанализированных снежных слоях, нарастание которых шло при разных траекториях движения воздушных масс, отмечается преимущественное накопление литофильной группы элементов. Чтобы показать это была использована треугольная диаграмма Гиббса–Розебома, позволяющая изобразить процентное соотношение отдельных составляющих в трехкомпонентной системе, образованной тремя элементными парагенезисами (элементами-литофилами (Lit): Li, Sr, Ba, Be, B, P, Sc, Ga, Ge, Y, Ti, Sn, V, Mo; -сидерофилами (Sid): Cr, Mn, Co, Ni, Pd; сульфосолами (Slf): Cu, Zn, Cd, Pb, Sb). Химические элементы в этих группах имеют близкие свойства, определяющие общие особенности миграции и концентрации в различных геохимических обстановках. Так, элементы-сидерофилы имеют увеличенное сродство к кислороду и образуют металлические связи. Активность их миграции в ландшафтах и концентрация

Рис. 6. Послойные парные диаграммы вероятности переноса воздушных частиц, P [%] на 20 уровнях, приходящие в слой 10–2010 м (левые части сдвоенных диаграмм) и в пределах атмосферного пограничного слоя (АПС; правые части сдвоенных диаграмм). На врезке показаны распределение элементных групп (сульфофилы, литофилы, сидерофилы) в снежных слоях хронологически привязанные к периодам выпадения стратиграфически значимых снегопадов: слой–а – 08–12.11.20; слой–б – 12.11–14.12.20; слой–в – 14–17.12.20; слой–г, –д – 17–25.12.20; слой–е, –ж, –з, –и – 20–28.12.20; слой–к – 28.12.20–03.02.21; слой–л – 03–15.02.21; слой–м – 15–28.02.21.



на геохимических барьерах во многом определяются окислительно-восстановительными обстановками. Группу элементов-сульфофилов отличает то, что они имеют тенденцию к образованию ковалентных связей и характеризуются повышенным сродством к сере, образуя с ней нерастворимые сульфиды. Для группы элементов-литофилов общим является в разной степени выраженная тенденция к образованию ионных связей. Последнее хорошо объясняет их высокую растворимость некоторых солей, их белый цвет, щелочно-кислотные свойства растворов (Перельман, Касимов, 1999). Используя три параметра можно графически отразить пропорциональное соотношение этих групп, что дает возможность сопоставить их межслоевую изменчивость в снежной толще и повышает информативность результатов (см. врезку на рис. 6).

Расчеты показали, что процентное соотношение трех групп элементов литофилов (Lit), сульффилов (Slf) и (сидерофилов (Sid) составляет 74 : 11 : 14 соответственно. Следовательно, во всех снежных слоях, слагающие снежную толщу, устойчиво преобладает накопление литофильной группы элементов. Поэтому полученные межслоевые соотношения элементных групп в сопряжении с траекторным анализом движения воздушных масс не позволяют однозначно интерпретировать их как отображение зимнего аэрозольного поля, формирующееся над городской территорией в результате дальнего переноса. В связи с этим предполагается, что межслоевое соотношение элементных парагенезисов, устойчиво сохраняющееся в снежном покрове при его нарастании, может выступать в качестве геохимического маркера застойных зон в городском острове тепла при эколого-геохимической оценке загрязнения атмосферы в пределах урбанизированных территорий. Следует заметить, что в качестве геохимических маркеров застойных зон в городском острове тепла могут выступать любые типоморфные группы химических элементов из состава осевшего аэрозольного вещества. Принципиальным является лишь требование, чтобы они были связаны с конкретной промышленной специализацией территории, а их межслоевое соотношение устойчиво сохранялось в сезонной снежной толще при ее нарастании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ послойных постседиментационных преобразований гранулометрического состава осевшего аэрозольного вещества в снежной толще, выполненных с помощью метода динамического рассеяния света показал, что полидисперсность аэрозольного вещества в инее и глубинной изморози существенно выше, чем в снежных слоях, хронологически привязанных к стратиграфи-

чески значимым снегопадам. Предполагается, что такие особенности в распределении частиц по размерам в ледяных кристаллах поверхностной и глубинной изморози связаны природными эффектами и явлениями (термофорез, диффузиофорез, капиллярные силы, адгезия), обусловленные физическими свойствами снежного покрова.

Выполненные сравнительные исследования послойной изменчивости химического состава осевшего аэрозольного вещества позволили обнаружить межслоевое соотношение трех групп элементов (сидерофилов (Sid) сульффилов (Slf), литофилов (Lit)), относительно устойчиво сохраняющееся в снежном покрове при его нарастании. Траекторный анализ переноса воздушных масс к Сыктывкару, с которыми связано выпадение стратиграфически значимых снегопадов, не позволил соотнести обнаруженный геохимический феномен с предположением, что зимнее аэрозольное поле, формируемое над городом при разных траекториях движения воздушных масс, может определенным образом наследоваться в снежных слоях при нарастании снежной толщи и тем самым влиять на особенности вертикального распределения элементов-примесей. Очевидно, что обнаруженное в снежной толще устойчивое межслоевое соотношение трех групп элементов-примесей отражает наличие застойных зон в городском острове тепла. Следует заметить, что геохимические проявления феномена городского острова тепла для северных городов, в которых продолжительность залегания снежного покрова составляет 6–8 месяцев и более, неизвестны. Между тем, главной особенностью зимних метеорологических процессов в северных широтах является высокая частота повторяемости атмосферных инверсий (Nygård et al., 2014; Wetzel, Brümmer, 2011). Формирующиеся в этот период пограничные слои атмосферы, характеризуются устойчивостью и наличием маломощного подынверсионного слоя перемешивания, что способствует накоплению техногенных эмиссий тепла и загрязняющих веществ в приземном слое воздуха. Их плотность в локальных зонах в пределах городской территории может достигать таких значений, при которых сильно уменьшается суммарная солнечная радиация и задерживается встречное инфракрасное излучение подстилающей поверхности. Все это вместе взятое в сочетании с теплоотдачей жилых и промышленных зданий и объектов приводит к появлению над городом местного “парникового эффекта” и формированию своеобразного аэрозольного купола. Его плотность такова, что нивелирует влияние зимнего аэрозольного поля, формирующегося в результате дальнего переноса над городской территорией. Поэтому, несмотря на разные направления поступления воздушных масс к городу, с которыми связано нарастание снежного покрова,

межслоевые соотношения трех групп элементов-примесей остаются устойчивыми.

Следовательно, межслоевые соотношения элементных парагенезисов, сохраняющие свою устойчивость в снежной толще при ее нарастании, могут быть использованы в качестве геохимического маркера при обнаружении застойных зон в городском острове тепла при эколого-геохимической оценке распределения загрязняющих веществ в сезонном снежном покрове города. В таком контексте предложенный метод геохимического исследования снежного покрова может рассматриваться дополнительным инструментом при изучении мелкомасштабной динамики турбулентных воздушных потоков и переноса загрязняющих веществ в городской среде, органично дополняя известные методы моделирования при выявлении особенностей переноса загрязняющих веществ в условиях городской среды и воспроизведения пространственной динамики аномалий температуры (Atlaskin, Vihma, 2012; Глазунов, 2014; Anderson et al., 2015; Li et al., 2016; Sadique et al., 2017).

Лазерная гранулометрия образцов талого снега выполнены в Центре коллективного пользования “Химия” Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, а их химический анализ – в ЦКП “Геонаука” ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геохимия окружающей среды.* (1990) М.: Недра, 335 с.
- Глазунов А.В. (2014) Численное моделирование устойчивостратифицированных турбулентных течений над поверхностью городского типа. Спектры и масштабы, параметризация профилей температуры и скорости. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* **50**(4), 406-410.
- Глинка Н.Л. (1987) *Общая химия: учеб. пособие для вузов.* Л.: Химия, 704 с.
- Гуртовая Е.Е. (1961) *Некоторые вопросы температурного режима снежного покрова. Роль снежного покрова в природных процессах.* М.: Изд-во АН СССР, 121-131.
- Ивлев Л.С. (2011) Аэрозольное воздействие на климатические процессы. *Оптика атмосферы и океана.* **24**(5), 392-410.
- Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. (1999) Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 258 с.
- Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. (2016) *Геохимия ландшафтов Восточной Москвы.* М.: АПР, 276 с.
- Коломыц Э.Г. (2013) *Теория эволюции в структурном снеговедении.* М.: Геос, 482 с.
- Кузьмин П.П. (1957) *Физические свойства снежного покрова.* Л.: Гидрометеиздат, 179 с.
- Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Соромотин А.В. (2021) Геохимическая характеристика снежного покрова г. Тобольск. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* **332**(5), 156-169.
- Патент 2411487 Российская Федерация, МПК8 G01N1/04 (2006.01). (2011) Снегоотборник Тентюкова / Тентюков М.П.; заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН – № 2009131266/05; заявл. 17.08.2009; опубл. 10.02.2011; *Бюл.* № 4. 10 с. URL: <https://ib.komisc.ru/files/innov/2411487.pdf>. (дата обращения 19.02.2022).
- Патент на промышленный образец 89907 Российская Федерация, МКПО10 10-04. (2014) Устройство для измерения высоты снежного покрова и прироста инея / Тентюков М.П.; заявитель и патентообладатель Институт биологии Коми НЦ УрО РАН – № 2012503457; заявл. 01.10.2012; опубл. 16.09.2014. *Бюл.* № 9. 2 с. URL: <https://ib.komisc.ru/files/innov/89907.pdf>. (дата обращения 19.02.2022).
- Перельман А.И., Касимов Н.С. (1999) *Геохимия ландшафта.* М.: Астрей-2000, 768 с.
- Рихтер Г.Д. (1948) *Роль снежного покрова в физико-географическом процессе. Труды Института географии АН СССР.* **40.** М.–Л.: Изд-во АН СССР, 171 с.
- Тентюков М.П. (2021) Визуализация структурно-текстурных изменений в новообразующемся снежном слое при длительном снегопаде. *Лед и снег.* **61**(2), 222-231.
- Фирц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д.М., Нишимура К., Сатъявали П.К., Сокрытов С.А. (2012) Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова). *Материалы гляциологических исследований.* (2), 80 с.
- Экогеохимия городских ландшафтов (1995) (Под. ред. Н.С. Касимова). М.: Изд-во Моск. ун-та, 336 с.
- Anderson W., Li Q., Bou-Zeid E. (2015) Numerical simulation of flow over urban-like topographies and evaluation of turbulence temporal attributes. *J. Turbul.* **16**(9), 809-831.
- Atlaskin E., Vihma T. (2012) Evaluation of NWP results for wintertime nocturnal boundary-layer temperatures over Europe and Finland. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **138**(667), 1440-1451. <https://doi.org/10.1002/qj.1885>
- Draxler R.R., Hess G.D. (1998) An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.* **47**, 295-308.
- Hsu Y.-K., Holsen T., Hopke P. (2003) Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago. *Atmos. Environ.* **37**, 545-562.
- 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. (2001) The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **82**(2), 247-268.
- Li X.X., Britter R., Norford L.K. (2016) Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: A large-eddy simulation. *Atmos. Environ.* **144**, 47-59.

- 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. (2010) Observed 20th century desert dust variability: impact on climate and biogeochemistry. *Atmos. Chem. Phys.* **10**(22), 10875-10893.
- Nygård T., Valkonen T., Vihma T. (2014) Characteristics of Arctic low-tropospheric humidity inversions based on radio soundings. *Atmos. Chem. Phys.* **14**, 1959-1971. <https://doi.org/10.5194/acp-14-1959-2014>
- 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. *Cryos.* **6**(5), 1141-1155.
- Sadique J., Yang X.I.A., Meneveau C., Mittal R. (2017) Aerodynamic properties of rough surfaces with high aspect-ratio roughness elements: effect of aspect ratio and arrangements. *Bound.-Layer Meteorol.* **163**(2), 203-224.
- Shukurov K.A., Borovski A.N., Postlyakov O.V., Dzholala A.V., Grechko E.I., Kanaya Y. (2018) Potential sources of tropospheric nitrogen dioxide for western Moscow region, Russia. *Proc. SPIE.* **10833**, 108337N.
- Shukurov K.A., Chkhietiani O.G. (2017) Probability of transport of air parcels from the arid lands in the Southern Russia to Moscow region. *Proc. SPIE.* **10466**, 104663V.
- Sokratov S.A. (2001) Parameters influencing the recrystallization rate of snow. *C. R. Sci. Techn.* **33**(2-3), 263-274.
- Sokratov S.A., Maeno N. (2000) Effective water vapor diffusion coefficient of snow under a temperature gradient. *Water Resour. Res.* **36**, 1269-1276.
- Wetzel C., Brümmer B. (2011) An Arctic inversion climatology based on the European Centre Reanalysis ERA-40. *Meteorol. Zeitschrift.* **20**(6), 589-600.