

УДК 551.578.46

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ЗНАЧЕНИЙ $\delta^{18}\text{O}$ И СТРУКТУРЫ СНЕЖНОЙ ТОЛЩИ НА ТЕРРИТОРИИ МЕТЕООБСЕРВАТОРИИ МГУ

© 2023 г. С. А. Сократов^{1,*}, А. Ю. Комаров¹, Ю. К. Васильчук¹, Н. А. Буданцева¹,
Дж. Ю. Васильчук¹, Ю. Г. Селиверстов¹, П. Б. Гребенников¹, Д. М. Фролов¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: sokratov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 03.07.2023 г.

После доработки 04.09.2023 г.

Принята к публикации 02.10.2023 г.

Представлены результаты сравнения изотопного состава (значений $\delta^{18}\text{O}$) разновозрастных слоёв снега, слагающих снежную толщу к моменту максимального водозаписа, с изотопным составом осадков, сформировавших эти слои в течение зимнего сезона 2018/19 г. на территории метеообсерватории МГУ. Установлено, что ожидаемое утяжеление изотопного состава от времени выпадения до времени отбора образцов практически не зависело от возраста слоёв.

Ключевые слова: снежный покров, стабильные изотопы воды, стратиграфия снежного покрова, пространственная неоднородность, зимние осадки, изменение во времени

DOI: 10.31857/S2076673423040154, **EDN:** IEP1BP

ВВЕДЕНИЕ

Результатом послойного определения изотопного состава снежного покрова являются значения содержания изотопов (кислорода и водорода) в осадках каждого снегопада, изменённого в результате различных процессов, приводящих к изотопному фракционированию (Cooper, 1998; Wahl et al., 2022). Понимание таких изменений необходимо как для интерпретации палеоклиматических данных, представляемых ледниковыми кернами (Екайкин и др., 2007, 2019) или грунтовыми льдами (Konishchev et al., 2003; Vasil'chuk et al., 2023), так и для гидрологических расчётов, основанных на разделении гидрографа (Taylor et al., 2001; Veria et al., 2018).

Данные, представляемые глобальной сетью “Изотопы в осадках” (<https://nucleus.iaea.org/wis-er/>) позволяют делать выводы о многолетних трендах содержания изотопов в осадках, что важно для гидрологических исследований (Зыкин и др., 2021). Межсезонный и внутрисезонный ход изотопного состава выпадающих осадков в основном коррелирует с сезонным ходом температуры и достаточно хорошо документирован (Allen et al., 2019). Ему же соответствуют ряды данных, в некоторых случаях — высокого временного разрешения, представляемые ледяными кернами (Mikhalev et al., 2015; Kozachek et al., 2017). К сегодняшнему дню уже накоплена информация о

региональных закономерностях изменения изотопного состава зимних атмосферных осадков (Бородулина и др., 2021), его локальной специфике (Васильчук и др., 2017), зависимости от абсолютной высоты (Vasil'chuk et al., 2020), экспозиции (Dietermann, Weiler, 2013), характере растительности (Koeniger et al., 2008), разнице в изотопном составе сформировавшейся снежной толщи и формируемой ею талой воды (Penna et al., 2014).

Основными процессами, отвечающими за изменение начального изотопного состава по мере аккумуляции твёрдых осадков, являются сублимация и таяние (Lee et al., 2010; Ala-aho et al., 2017), интенсивность которых в снежной толще представляется её стратиграфией. Сублимация верхних слоёв снежной толщи в атмосферу приводит к утяжелению изотопного состава остающегося снега. Просачивание вызывает перенос части материала с соответствующим изотопным составом в нижележащие слои, тем самым изменяя их изотопный состав. Непосредственной связи между классами форм зёрен снега (Фирц и др., 2012), составляющим определённый слой в шурфе, и его изотопным составом не установлено, хотя такие попытки были (Чижова и Васильчук, 2017; Чижова и др., 2019). Результаты детальных экспериментальных исследований, в том числе с контролируемым составом изотопного состава водяного пара в потоке воздуха через образец, по-

казали значительное изменение начального изотопного состава снега при перекристаллизации за счёт определяемых установленным температурным градиентом диффузией, сублимацией и возгонкой (Ebner et al., 2017). Однако возможная разнонаправленность вследствие суточных колебаний температур и различная «степень открытости» для потоков пара и влаги слоёв в природном снежном покрове ограничивают возможность прямого использования таких данных для моделирования и, скорее, заставляют искать связи между интенсивностью изменения изотопного состава в снежной толще и, к примеру, классами снежного покрова (Sturm et al., 1995), по сути представляющими собой типичные для определённых климатических условий стратиграфические колонки на момент начала весеннего снеготаяния, а не классы форм зёрен снега в каждой из них (Фирц и др., 2012). Для этого необходимы данные по изменению первоначального содержания изотопов в осадках для разных типов стратиграфических колонок, а также понимание возможных масштабов таких изменений.

Проведение исследований пространственно-временной неоднородности структуры снежного покрова на территории метеообсерватории (МО) МГУ (Фролов и др., 2019), а также наличие данных по изотопному составу осадков (Vasil'chuk et al., 2022) позволили провести сравнение изотопного состава разновозрастных слоёв снега зимнего сезона 2018/19 г. и осадков, их сформировавших. Детальные метеорологические характеристики этих лет также доступны (Эколого-..., 2019).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Условия аккумуляции снежного покрова зимой 2018/19 г. На основе данных наземных измерений высоты, плотности и строения снежного покрова, которые были выполнены с шагом 1 м в траншеях протяжённостью 20 м, произведены расчёты и построены схемы пространственной изменчивости измеренных характеристик снежного покрова и отдельных его слоёв в траншеях. Исследования проводились три раза за зиму: 24.12.2018, 22.01.2019 и 26.02.2019. Дополнительно были описаны снежные шурфы 15 января, 29 января и 21 февраля 2019 года. На основе полученных описаний и данных метеорологических наблюдений на станции выполнен анализ изменений, происходивших в снежной толще в течение зимнего периода 2018/19 г. и построена схема развития стратиграфии снежного покрова в течение этого зимнего периода (рис. 1; табл. 3–5 в приложении с <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19005.64489>).

Аккумуляция снежного покрова зимой 2018/19 г. началась в Москве в конце ноября, однако устой-

чивый снежный покров установился только 1.12.2018. В течение зимнего периода аккумуляция снежного покрова происходила в результате многочисленных снегопадов небольшой интенсивности. В начале зимы толща характеризовалась преобладанием рыхлого мелкозернистого снега средневзвешенной плотностью около 140 кг/м³. К концу декабря средневзвешенная плотность снега увеличилась до 180 кг/м³, а высота снежного покрова достигла 30 см. Сильные снегопады, в результате которых прирост высоты снежного покрова составлял более 10 см, были редки (всего два за период с 1.12.2018 до 26.02.2019). За снегопадами часто следовали оттепели, в результате которых происходило оседание, таяние и просачивание воды сквозь снежную толщу. Всего за период с 1 декабря по 26 февраля было зафиксировано шесть оттепелей разной интенсивности. Несмотря на то, что средняя суточная температура воздуха ниже –10°С наблюдалась лишь в период с 23 по 25 января, уже к середине января в нижней и средней частях снежной толщи сформировались слои зёрен с огранкой и глубинной изморози, что было обусловлено небольшой высотой снежного покрова и значительными температурными градиентами в толще в декабре и январе. К концу января высота снежного покрова достигла 50 см, а его средневзвешенная плотность возросла до 210 кг/м³. Сильная оттепель в середине февраля обусловила оседание, уплотнение снежной толщи и формирование мощного слоя таяния–замерзания с просачиванием воды вглубь снежной толщи, что привело к увеличению её неоднородности из-за появления ледяных включений – линз, корок и пальцев просачивания (см. рис. 1). К концу февраля высота снежного покрова составила 35 см, а средневзвешенная плотность снега достигла 285 кг/м³. В марте началось активное снеготаяние, в результате которого высота снежного покрова начала быстро уменьшаться, а его средневзвешенная плотность достигла значений 320 кг/м³.

Характеристика строения и свойств снежного покрова 26 февраля 2019 г. Отбор образцов снега на изотопный состав был произведён на момент максимального водозапаса – 26 февраля 2019 г. К этому времени изначальная стратиграфия снежного покрова была уже во многом нарушена процессами гравитационного оседания, метаморфизма и просачивания жидкой воды. Сформировалась снежная толща, которая была условно разделена на четыре слоя (см. рис. 1; табл. 1).

Стратиграфические описания и измерения высоты, плотности и водного эквивалента снега (далее – ВЭС) в снежной толще и в её отдельных слоях проводились вдоль траншеи протяжённостью 20 м с интервалом 1 м, в результате чего были получены схемы пространственной

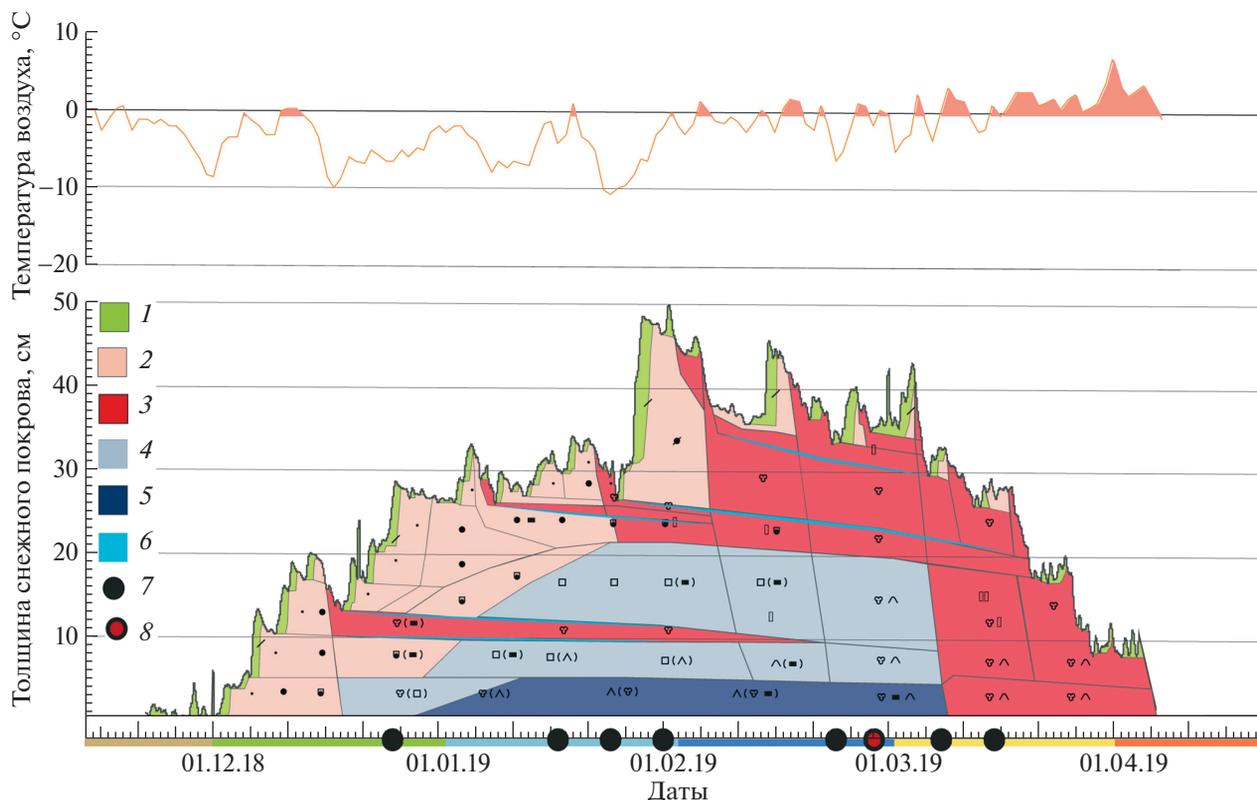


Рис. 1. Схема изменения строения снежной толщи в Москве зимой 2018/19 г. и температура воздуха по данным измерений на метеорологической обсерватории МГУ (Москва): 1 – свежесвыпавший снег; 2 – мелкозернистый и среднезернистый осевший; 3 – таяния–замерзания; 4 – с огранкой; 5 – глубинная изморозь; 6 – лёд; 7 – даты измерений в шурфах и траншеях; 8 – даты отбора проб в траншее. Условные и цветовые обозначения соответствуют (Фирц и др., 2012).

Fig. 1. Scheme of the evolution of snow stratigraphy in Moscow in winter 2018/19 and simultaneous air temperature change at the site of the Meteorological observatory MSU (Moscow): 1 – fresh snow; 2 – fine-grained and medium-grained settled snow; 3 – melt-freeze layers; 4 – faceted crystals; 5 – depth hoar; 6 – ice; 7 – dates of measurements in pits and trenches; 8 – date of snow sampling in trench. Notations and colors correspond to (Fierz et al., 2009).

неоднородности структуры снежного покрова. Особенности пространственной неоднородности снежного покрова в траншее 26 февраля 2019 г. показаны на рис. 2.

Нижний слой № I был сложен крупнозернистыми кристаллами с огранкой и глубинной изморозью, в значительной степени оплавленными. Преобладали кубические и призматические формы кристаллов размером до 1–2.5 мм. Наблюдались многочисленные льдистые включения и неоднородности, связанные как с оплавлением и таянием от поверхности грунта, так и с просачиванием воды из вышележащих слоёв. Грунт под снегом был талый. Толщина рассматриваемого слоя составила от 10 до 15 см при средней толщине 12 см и стандартном отклонении 1.1 см (коэффициент вариации, т.е. относительное стандартное отклонение (далее – КВ) равен 0.11). Плотность снега в слое изменялась от 265 по 310 кг/м³ при среднем значении 286 кг/м³ и стандартном отклонении 15 кг/м³ (КВ = 0.05).

Слой № II был сложен крупнозернистыми кристаллами до 2–3 мм со следами огранки, в значительной степени оплавленными. Как и в нижнем слое, наблюдались льдистые включения и неоднородности, связанные с просачиванием воды сквозь снежную толщу. В целом, слой был похож по своим свойствам на нижележащий, но отличался от него меньшей твёрдостью, меньшим размером кристаллов и большей неоднородностью. Толщина слоя изменялась в траншее от 4 до 10 см при среднем значении 9 см и стандартном отклонении 1.4 см (КВ 0.18). Плотность снега в слое менялась вдоль траншеи от 270 до 325 кг/м³ при среднем значении 295 кг/м³ и стандартном отклонении 14.3 кг/м³.

Слой № III был сложен крупными смёрзшими кристаллами преимущественно округлых форм размером до 2–3 мм со следами огранки и осложнён многочисленными льдистыми включениями. В результате неоднократного таяния и последующего замерзания, а также просачивания

Таблица 1. Пример описания шурфа на 26 февраля 2019 г.

№	Н (от поверхности грунта), см	Описание слоя
IV	30–37	Свежевыпавший снег, насыщенный жидкой водой. Сложен из округлых оплавленных зёрен диаметром до 0.5 мм. <i>Сформировался в результате снегопадов 17–26 февраля.</i> <i>Возраст: 0–4 дня</i>
III	21–30	Неоднородный влажный слой таяния–замерзания с корками до 1–2 см, Сложен крупными оплавленными смёрзшимися зёрнами диаметром 2–3 мм (до 6 мм), местами со следами огранки. <i>Сформировался в результате снегопадов с 5 января по 13 февраля. Преимущественно сложен снегом снегопадов 23–27 января и 11–13 февраля. В результате оттепелей 2–5 февраля и 14–21 февраля – активное оседание и просачивание жидкой воды в нижние горизонты.</i> <i>Возраст: 11–50 дней</i>
II	12–21	Крупнозернистый снег, сложенный кристаллами со следами огранки и неоднородными льдистыми включениями. Влажный, с диаметром кристаллов до 2–3 мм. <i>Слой сформировался в результате снегопадов с 19 декабря по 4 января (особенно 19–25 декабря). Возможно, было просачивание в феврале.</i> <i>Возраст: 51–71 день</i>
I	0–12	Крупнозернистый снег с кристаллами глубинной изморози в стадии оплавления, рыхлый, низкой твёрдости. Преобладают полые призмы и кубические формы. Имеются льдистые включения. Внизу талый грунт. Обнаружено множество ходов грызунов по этому слою. <i>Слой сформировался в результате снегопадов с 25 ноября по 18 декабря.</i> <i>Возможно просачивание в грунт.</i> <i>Возраст: 76–84 дня</i>

воды сквозь снежную толщу снег в этом слое оказался весьма неоднороден по плотности и твёрдости и был идентифицирован нами как слой таяния–замерзания с многочисленными корками, линзами и пальцами просачивания. Толщина слоя изменялась в траншее от 5 до 12 см при среднем значении 9 см и стандартном отклонении 1.5 см (КВ 0.16). Плотность снега в слое менялась вдоль траншеи от 260 до 340 кг/м³ при среднем значении 294 кг/м³ и стандартном отклонении 21.5 кг/м³.

Верхний слой № IV был в наименьшей степени подвержен процессам таяния–замерзания и метаморфизма, поскольку сформировался в результате снегопадов 22–26 февраля, то есть его возраст на момент измерений не превышал 4 дней. Слой был сложен свежевыпавшим, осевшим рыхлым влажным снегом. Размер кристаллов не превышал 0.5 мм, преобладали округлые формы, но местами встречались не полностью разрушенные фрагменты снежинок, сильно оплавленные. Слой был неоднороден по плотности, однако корки и линзы практически отсутствовали. Толщина слоя изменялась в траншее от 6 до 14 см при

среднем значении 8 см и стандартном отклонении 1.8 см (КВ 0.21). Плотность снега в слое менялась вдоль траншеи от 230 до 305 кг/м³ при среднем значении 260 кг/м³ и стандартном отклонении 27.9 кг/м³ (КВ 0.21). Таким образом, несмотря на свой молодой возраст, этот слой оказался даже более неоднороден, чем нижележащие слои.

Анализ пространственной изменчивости значений высоты снежного покрова вдоль траншеи показал, что значения КВ составили в среднем 0.07. При этом изменчивость отдельных слоёв оказалась больше и составила от 0.11 до 0.26, увеличиваясь от нижних слоёв к верхним. Изменчивость средневзвешенных по шурфам значений плотности и ВЭС снега, измеренные вдоль траншеи, составили соответственно 0.05 и 0.11. Изменчивость отдельных слоёв оказалась больше и составила от 0.05 до 0.11 для плотности и от 0.12 до 0.31 для ВЭС.

Наибольшая изменчивость исследуемых параметров наблюдалась в верхних слоях толщи, в то время как в нижних слоях значения КВ были почти вдвое меньше. Наибольшая изменчивость на-

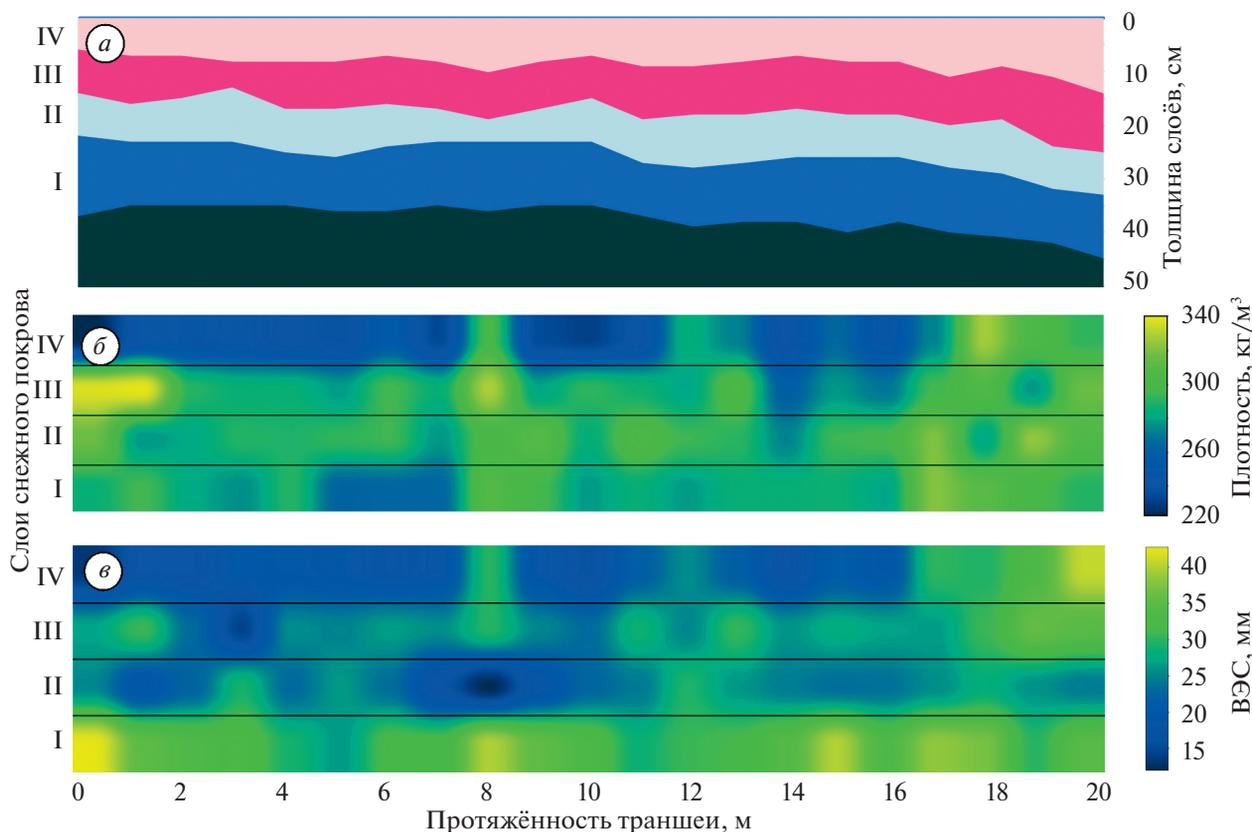


Рис. 2. Пространственная неоднородность распределения: толщины (а), плотности (б) и ВЭС слоёв снежного покрова по данным измерений 26 февраля 2019 г. в траншее на площадке МО МГУ(в).

Fig. 2. Spatial inhomogeneity in the distribution of: depth (a), density (б) and SWE on February 26, 2019. in the transect at the area of MO MSU (в).

блюдалась для значений ВЭС, меньшая – для высоты и плотности. Анализ корреляционных связей между рассматриваемыми послойно параметрами показал, что наблюдаются умеренные положительные связи между ними. Коэффициент корреляции между значениями плотности и высоты снежного покрова, осреднённых по траншее, составил 0.48, между значениями плотности и ВЭС – 0.77, однако статистическая значимость отсутствует.

Изотопный состав зимних осадков. В течение зимы было отобрано 55 образцов снежных осадков. Снег растапливался в полиэтиленовых пакетах при температуре не выше 20°C, затем вода переливалась в пластиковые флаконы, для минимизации испарения крышка флакона дополнительно покрывалась парафином. До изотопных определений флаконы с образцами хранились в холодильнике при температуре +3°C.

Определение изотопного состава кислорода для снега и кислорода, и водорода для осадков выполнялось в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V

Plus с использованием комплекса газ-бенч. Для калибровки измерений использовались международные стандарты V-SMOW, GRESP, SLAP. Погрешность определений составила (по данным повторных анализов) ±1‰ для δ²H и ±0.2‰ для δ¹⁸O. Значения δ¹⁸O и δ²H выражены в промилле относительно V-SMOW. Дейтериевый эксцесс d_{exc} был рассчитан по формуле В. Дансгора для метеостанций Северного полушария (Dansgaard, 1964): δ²H = 8.0 × δ¹⁸O + 10.

Анализ изотопного состава осадков, которые были отобраны непосредственно в день их выпадения, показал, что значения δ¹⁸O этих осадков изменялись от –11.2 до –23.5‰. Анализ корреляционных связей δ¹⁸O с температурой воздуха, которая наблюдалась в день их выпадения, показал, что наблюдается умеренная положительная связь этих параметров со значением коэффициента корреляции 0.40, параметры уравнения линейной регрессии статистически значимы.

Значения δ¹⁸O осадков в период с середины ноября до середины декабря составили в среднем –16.5‰ при средней температуре воздуха –3°C,

Таблица 2. Послойные осреднённые значения $\delta^{18}\text{O}$ и разница в величинах $\delta^{18}\text{O}$ между осадками и разновозрастным снегом

№ слоя	Средневзвешенное значение $\delta^{18}\text{O}$ осадков, сложившихся в слое, ‰	Средневзвешенное значение $\delta^{18}\text{O}$ осадков, сложившихся отобранный образец, ‰ (см. рис. 3, б)	Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ в отобранных по слою образцах снега, ‰	Разница метод 1, ‰	Разница метод 2, ‰
IV	–15.51	–17.84	–15.36	2.48	2.52
III	–17.58	–16.86	–14.79	2.07	2.10
II	–20.24	–20.96	–19.41	1.54	1.58
I	–18.64	–20.13	–18.84	1.29	1.33

с середины декабря до середины января -20% при температуре воздуха -7.4°C , с середины января до начала марта -15.8% при температуре -3.7°C .

Изотопный состав осадков, аккумуляция которых привела к формированию верхнего слоя снежной толщи (рис. 3, слой IV; см. табл. 1), заметно варьировал. Значения $\delta^{18}\text{O}$ составили от -11.2 до -19.3% . Средневзвешенные с учётом количества выпавших осадков значения $\delta^{18}\text{O}$ составили -15.5% . Для расположенного ниже слоя (слой III) эти значения варьировали от -15.6 до -23.6% при средневзвешенном значении -17.5% . Для слоя II, расположенного ещё ниже в толще, значения $\delta^{18}\text{O}$ осадков, выпавших в период его формирования, составили от -11.9 до -22.7% (средневзвешенное значение -20.2%), а для нижнего слоя (слой I), сложенного крупнозернистыми кристаллами с огранкой и глубинной изморозью – от -17.3 до -21.6% (средневзвешенное значение -19.8%). Таким образом, начальный изотопный состав двух нижних слоёв оказался более “лёгким” по сравнению с расположенными выше слоями.

Изотопный состав снежного покрова. В траншее, стратиграфия которой представлена выше, были отобраны пробы снега для анализа изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$) и его изменчивости. Пробы отбирали с интервалом 2 м вдоль траншеи протяжённостью 20 м (11 профилей) в четырёх основных стратиграфических слоях при помощи плотномера прямоугольного сечения объёмом 100 см^3 и высотой 3 см (Proksch et al., 2016), которым измеряли и плотность снега (44 пробы). Пробы отбирали из центральной части каждого слоя таким образом, чтобы толщина слоя ниже и выше места отбора была одинаковой, что было обусловлено необходимостью увязки изотопного состава проб снега со снегопадами, сформировавших этот слой. Каждая проба была взвешена для определения плотности.

Учитывая, что высота плотномера (пробоотборника) составляет 3 см и пробы отбираются из центра слоя, часть снега в слое (выше и ниже ме-

ста отбора пробы) не попадала в пробоотборник. Следовательно, полученный нами из проб изотопный состав слоёв в действительности характеризует лишь центральную их часть толщиной около 3 см.

Исходя из этого, изотопный состав снега, отобранного в центральных частях слоёв, корректнее сравнивать с изотопным составом не всех осадков, которые привели к формированию этого слоя, а именно тех, которые были отобраны на анализ (см. рис. 3, 4).

По данным анализа изотопного состава проб снега (рис. 5 и 6; табл. 6–8 в приложении с <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19005.64489>), отобранных в траншее 26.02.2019, значения $\delta^{18}\text{O}$ изменялись от -13.9% до -20.2% . Наиболее “тяжёлый” изотопный состав был характерен для двух верхних слоёв № III и № IV (влажного свежевыпавшего снега, возраст которого составил на момент измерений 2–4 дня и подстилающего слоя таяния–замерзания, возраст которого составил 11–50 дней). Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ верхнего слоя № IV составили от -14.2 до -16.9% при среднем значении $\delta^{18}\text{O} -15.4\%$ и стандартном отклонении 0.9% . Значения $\delta^{18}\text{O}$ расположенного ниже слоя № III изменялись от -13.9 до -16.3% при среднем значении $\delta^{18}\text{O} -14.8\%$ и стандартном отклонении 0.8% для подстилающего слоя (см. рис. 5).

Более “лёгкий” изотопный состав был характерен для двух нижних слоёв. Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ составили -19.4% для слоя № II (от -18.6 до -20.2%) и -18.8% для слоя № I (от -16.6 до -18.2%). Значения стандартного отклонения составили 0.5% для слоя I и 0.3% для слоя II (0.5 и 0.6% для слоёв III и IV соответственно). При отборе образцов в пробоотборник технически не попадали крупные ледяные корки и “пальцы просачивания”, которые и должны были содержать в себе воду из изотопно- более “тяжёлых” вышележащих слоёв. Возможно, в случае включения и этих образований в анализируемые образцы, разница в изотопном составе этих слоёв и сформировавших их осадков оказалась бы ещё меньше.

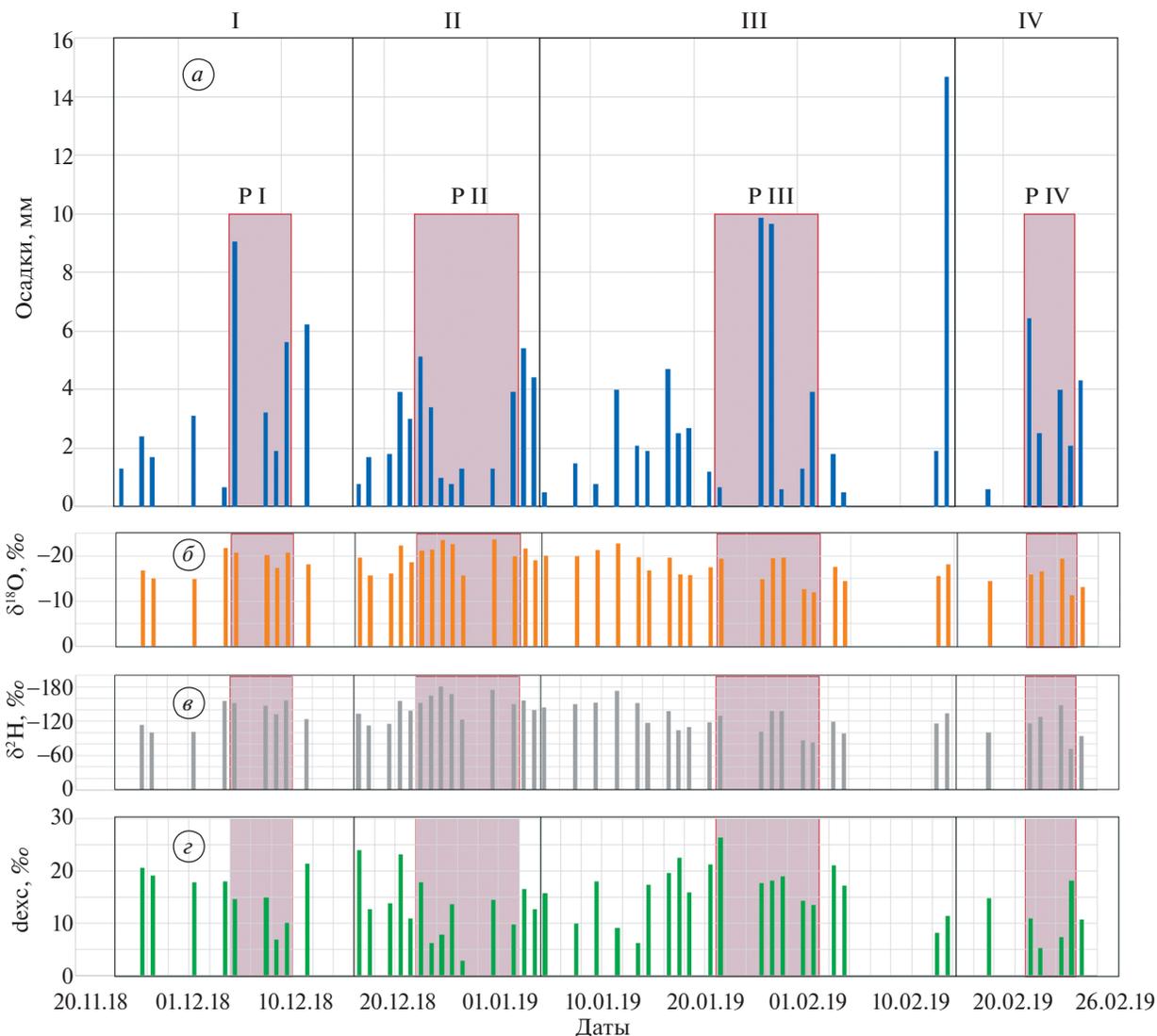


Рис. 3. Вариации значений: количества осадков (а), $\delta^{18}\text{O}$ (б), $\delta^2\text{H}$ (в), d_{exc} в осадках (снеге) (г), отобранных на метеороbservатории МГУ в день их выпадения, в чёрные рамки заключены осадки, в результате аккумуляции, которых сформировалась слой I, II, III и IV; тёмным фоном выделены осадки, в результате аккумуляции которых сформировалась часть слоя (проба), отобранная для определения $\delta^{18}\text{O}$ (см. рис. 4).

Fig. 3. Variability of: amount of precipitation (a), $\delta^{18}\text{O}$ (б), $\delta^2\text{H}$ (в), d_{exc} in precipitation (snow) (г), collected at the meteorological observatory of MSU at each precipitation event. black frames show all the precipitation gradually constructing layers I, II, III and IV; dark background shows the parts corresponding to samples collected for $\delta^{18}\text{O}$ analysis (see Fig. 4).

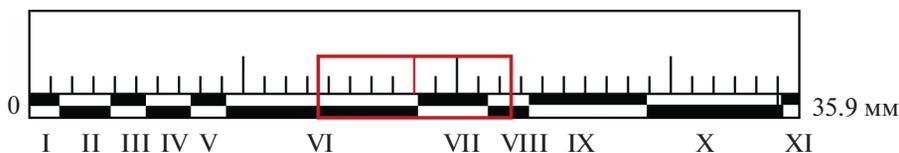


Рис. 4. Схема определения количества осадков, формирующих пробу снега в шурфе на примере слоя I; римскими цифрами показаны номера снегопадов (от I до XI), длина плашек пропорциональна количеству осадков (мм), выпавших во время каждого снегопада; в красную рамку заключены только осадки, сформировавшие часть слоя, попавшую в створ плотномера при отборе пробы на изотопный состав.

Fig. 4. Scheme of determination of the quantity of precipitation (mm), forming sample for isotopic analysis in layer I as an example; the Roman numerals show the number of snowfalls (from I to XI), the length of bars is proportional to the quantity of precipitations during each precipitation event; red frame shows the part of total precipitations, collected by the sampler for the isotopic analysis.

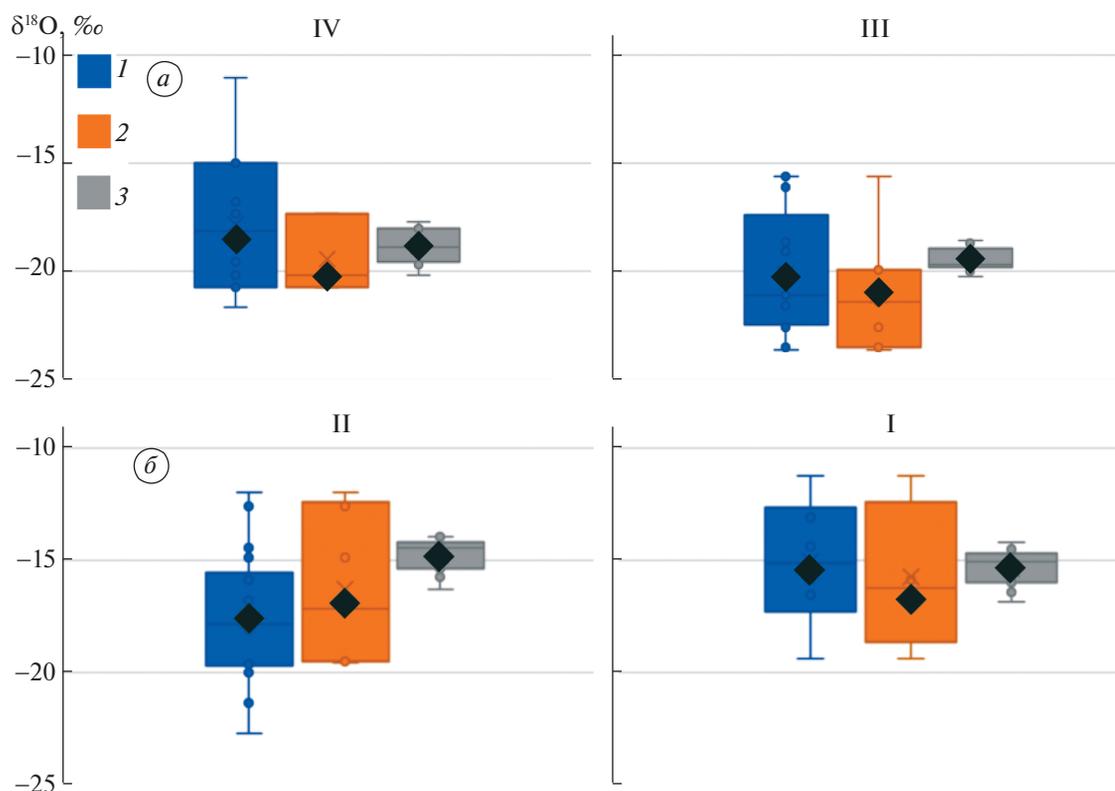


Рис. 5. Диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ осадков, отобранных в день их выпадения: 1 – относящихся ко всему слою; 2 – относящиеся к пробам (см. рис. 4); 3 – диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ для послойно отобранного снега вдоль траншеи; чёрными ромбами показаны средневзвешенные значения, римскими цифрами – номера слоёв.

Fig. 5. The range of values of $\delta^{18}\text{O}$ of precipitation events: 1 – covering whole layer; 2 – corresponding to the samples of snow (see Fig. 4) in the layers; 3 – the range of values of $\delta^{18}\text{O}$ for the snow samples in a layer along the transect; black diamond show weighted mean values, roman numbers – the number of a layer.

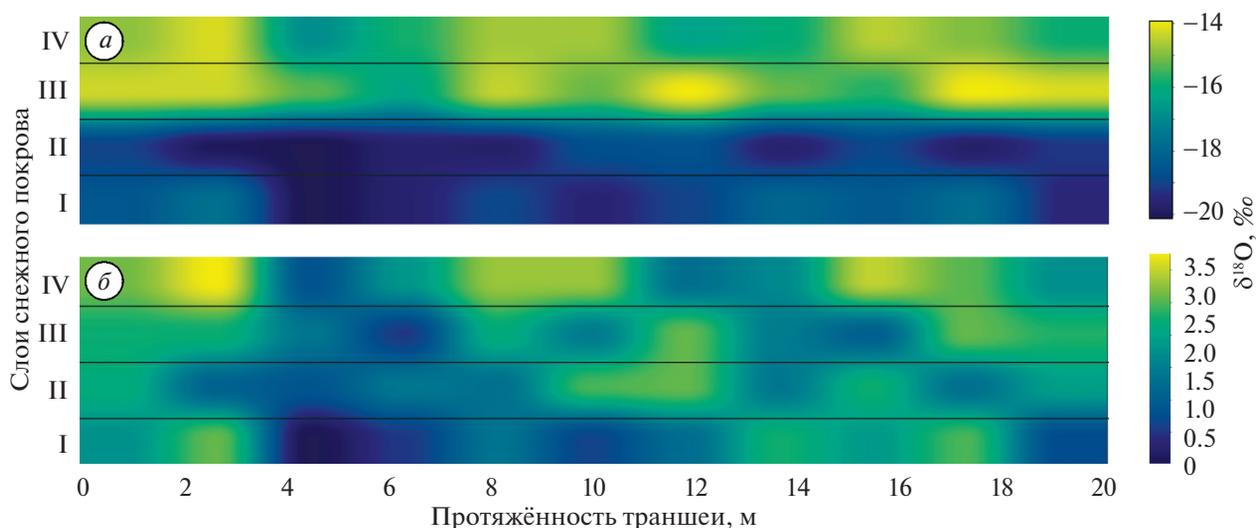


Рис. 6. Пространственная неоднородность распределения: значений $\delta^{18}\text{O}$ в слоях снежного покрова (а), различия изотопного состава отобранного снега от изотопного состава осадков. Этот снег сформировавших по данным измерений 26 февраля 2019 г. в траншее на площадке МО МГУ (б).

Fig. 6. Spatial inhomogeneity of: $\delta^{18}\text{O}$ in snow layers (a), difference between the isotopic composition of the collected snow samples from the isotopic composition of the precipitations, forming this snow. Along the transect at the area of MO MSU (б).

Анализ корреляционных связей между плотностью и изотопным составом проб снега показал, что наблюдается слабая положительная корреляция между этими двумя параметрами. Коэффициент корреляции средневзвешенных значений плотности и $\delta^{18}\text{O}$ составил 0.43. Наиболее ярко выраженная положительная корреляция была установлена для нижнего слоя № 1 (0.45) и слоя № 2 (0.27), наименьшая — для верхних двух слоёв (0.19 и 0.23 для слоёв № 3 и 4 соответственно). Однако статистическая значимость параметров уравнения линейного тренда отсутствует. Таким образом, пробы с повышенной плотностью характеризовались более “тяжёлым” изотопным составом, чем менее плотные. Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ в пробах плотностью менее 280 кг/м^3 составили -19.4‰ , а в пробах плотностью более 300 кг/м^3 — -18.8‰ .

Значения коэффициента корреляции между значениями толщины снежного покрова и средневзвешенными по толщине значениями $\delta^{18}\text{O}$ составили 0.40. Наиболее выраженная положительная корреляция наблюдалась в нижнем слое № I (0.37) и слое № II (0.24). В то же время, в слое № III корреляция отсутствовала, а в верхнем слое № IV была отрицательной (-0.23). Статистическая значимость уравнений линейного тренда рассмотренных параметров отсутствует. Значения коэффициента корреляции между средневзвешенными значениями ВЭС и $\delta^{18}\text{O}$ составили 0.58. Корреляция была положительной во всех слоях, кроме верхнего, где значения коэффициента корреляции составили -0.9 . В слоях № III и № II они составили 0.15 и 0.34, соответственно, а в нижнем слое № I был наибольшим и составил 0.55, однако статистическая значимость уравнений линейного тренда отсутствует как для значений, осреднённых по толщине, так и для отдельных слоёв.

Таким образом, в нижних трёх слоях наблюдалась положительная корреляция между значениями $\delta^{18}\text{O}$, плотности, ВЭС и толщины слоёв, причём наибольшие значения коэффициента корреляции отмечены в нижнем слое. Следовательно, слоям повышенной толщины и плотности соответствовал более “тяжёлый” изотопный состав. В то же время, в верхнем слое, подверженном процессам таяния и просачивания жидкой воды, значения коэффициентов корреляции между значениями $\delta^{18}\text{O}$, толщины и ВЭС слоя оказались отрицательными, а между значениями $\delta^{18}\text{O}$ и плотности — положительными.

Разница между значениями $\delta^{18}\text{O}$ осадков и сформированного ими разновозрастного снега в слоях может быть определена простым вычитанием одного из другого (метод 1). Общепринятый расчёт δ отобранных образцов включает в себя отношения к эталонным значениям (Environmental..., 2020), в нашем случае — V-SMOW и для осад-

ков, и для снега в траншее. Для определения пост-депозиционных изменений более логичным выглядит прямое определение разницы в значениях $\delta^{18}\text{O}$ осадков и сформированного ими снега, с сокращением эталонных значений (метод 2, использованный при построении рис. 6, б):

$$\left(\frac{\frac{\delta_{sn}}{1000} + 1}{\frac{\delta_{pr}}{1000} + 1} - 1 \right) \times 10^3 \text{‰},$$

где δ_{sn} — значение $\delta^{18}\text{O}$ в образце снега; δ_{pr} — значение $\delta^{18}\text{O}$ в осадках, сложивших этот образец.

Пространственная изменчивость значений $\delta^{18}\text{O}$ в траншее оказалась меньше, чем вариации толщины, плотности и ВЭС. Величина КВ для значений $\delta^{18}\text{O}$ составила в среднем 0.045 (0.8‰). Наибольшие значения КВ наблюдались в верхних двух слоях (0.05), меньшие — для нижних слоёв (0.03 и 0.04 для слоёв № II и № I соответственно).

Погрешности в определении разницы между начальным и изменённым содержанием $\delta^{18}\text{O}$ в слоях снега может быть обусловлена пространственной изменчивостью толщины самих слоёв (при неизменной высоте пробоотборника), а также смещением пробоотборника по вертикальной оси относительно центра слоя, что часто происходит при отборе пробы в поле. В рамках исследования была проанализирована изменчивость разницы начальных значений изотопного состава осадков, относящихся к пробе, и самой пробы при смещении пробоотборника на 1 см вверх и вниз относительно центра толщи. Установлено, что различия в изотопном составе осадков при смещении пробоотборника составили в среднем 0.5‰, то есть различались незначительно. В обоих случаях разница между изначальным и изменённым содержанием $\delta^{18}\text{O}$ в слоях оказались положительными, то есть изотопный состав стал с течением времени тяжелее во всех слоях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты определения изотопного состава осадков, отобранных в день их выпадения, и изотопного состава проб снега, отобранных на максимум водозапаса (26 февраля 2019 г.) вдоль траншеи протяжённостью 20 м, было установлено, что самые низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ (-19.4 и -18.8‰) соответствуют пробам, отобранным из нижних слоёв снежной толщи. Они сформировались в первой половине зимы при более низких температурах, по сравнению с верхними слоями, значения $\delta^{18}\text{O}$ в которых составили -15.4 и -14.8‰ соответственно.

Пространственная изменчивость изотопного состава снежного покрова в рассматриваемых слоях оказалась относительно невысока и составила от 0.6 до 0.8‰. Анализ корреляционных связей между значениями $\delta^{18}\text{O}$ и плотностью отобранных проб позволил установить, что наблюдается устойчивая положительная связь между рассматриваемыми послойно изотопными и структурными параметрами. Наибольшие значения корреляции наблюдаются в нижнем слое. При рассмотрении слоёв по отдельности (одно-возрастной снег) более плотному снегу соответствует более тяжёлый изотопный состав, что может быть обусловлено формированием соответствующих слоёв при влиянии метелевого переноса и преимущественного накопления более плотного метелевого снега в микропонижениях рельефа.

Сравнение начальных значений $\delta^{18}\text{O}$ в осадках, отобранных в день их выпадения, и значений в пробах, представляющих те же осадки, но к моменту максимума снегонакопления, показало, что во всех слоях значения $\delta^{18}\text{O}$ в пробах оказались выше, чем в осадках, что свидетельствует об “утяжелении” изотопного состава снега с течением времени. При этом, изменения в изотопном составе снега оказались практически независимы от продолжительности залегания слоёв. Более того, наибольшие изменения произошли в верхних двух слоях, продолжительность залегания которых была значительно меньше, чем в двух нижних слоях, а температура, при которой происходило их формирование и последующее залегание, — выше. Такой результат может свидетельствовать о преимущественном влиянии процессов испарения с поверхности снежной толщи на изменение изотопного состава, тогда как процессы температурно-градиентного метаморфизма и метаморфизма таяния—замерзания в условиях района исследования (Москва) имеют меньшее или нивелирующее влияние на такое изменение.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 19–77–30004 “Технология оценки экологического состояния Московского мегаполиса на основе анализа химического состава микрочастиц в системе “атмосфера—снег—дорожная пыль—почвы—поверхностные воды” Мегалополис”), изотопные определения; и по теме гос. задания “Опасность и риск природных процессов и явлений” (121051300175-4), полевые исследования и анализ полученных результатов.

Acknowledgments: This research project was supported by the Russian Science Foundation (grant № 19–77–30004, “Integrated technology for environment assessment of Moscow megacity based on chemical analysis of microparticle composition in the ‘atmosphere – snow – road dust – soil – surface water’ system Megacity”), isotope analyses; and the State

Assignment “Danger and risk of nature processes and phenomena” (121051300175-4), field work and analysis of the obtained results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бородулина Г.С., Токарев И.В., Левичев М.А.* Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) снежного покрова Карелии // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 4. С. 521–532. <https://doi.org/10.31857/S2076673421040105>
- 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. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.3.24402>
- Екайкин А.А., Владимиров Д.О., Тебенькова Н.А., Бровков Е.В., Верес А.Н., Ковязин А.В., Козачек А.В., Линдрен М., Шибяев Ю.А., Преображенская А.В., Липенков В.Я.* Пространственная изменчивость изотопного состава и скорости накопления снега на снегомерном полигоне станции Восток (Центральная Антарктида) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 1. С. 46–62. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-46-62>
- Екайкин А.А., Липенков В.Я., Сократова И.Н., Преображенская А.В.* Изотопный состав снега и льда в Антарктиде: климатический сигнал и постдепозиционный шум // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 2 (76). С. 96–105.
- Зыкин Н.Н., Токарев И.В., Виноград Н.А.* Мониторинг стабильных изотопов ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) в осадках Москвы (Россия): сравнение периодов 2005–2014 и 1970–1979 гг. // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Науки о Земле. 2021. Т. 66. № 4. С. 723–733. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.405>
- Фирц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д.М., Нишимура К., Сатъявали П.К., Сократов С.А.* Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова) Русское издание (Материалы гляциологических исследований, 2012, № 2). М.: Ин-т географии РАН, Гляциологическая ассоциация, 2012. 80 с.
- Фролов Д.М., Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Турчанинова А.С., Гребенников П.Б.* Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи на площадке МО МГУ зимой 2018/2019 г. // Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова. М.: МАКС Пресс, 2019. С. 225–230.
- Чижова Ю.Н., Васильчук Ю.К.* Дейтериевый эксцесс в снеге и ледниках Полярного Урала и ластовых льдах юга Ямала и побережья Байдаракской губы // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 100–111. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.2.23342>
- Чижова Ю.Н., Михаленко В.Н., Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Козачек А.В., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И.* Изотопный состав кислорода снежно-фирновой толщи на Восточной вершине Эльбруса // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 3. С. 293–305. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-426>

- Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М. В. Ломоносова / Ред. М. А. Локощенко. М.: МАКС Пресс, 2019. 277 с. <https://doi.org/>
- Ala-aho P., Tetzlaff D., McNamara J.P., Laudon H., Kormos P., Soulsby C.* Modeling the isotopic evolution of snowpack and snowmelt: Testing a spatially distributed parsimonious approach // *Water Resources Research*. 2017. V. 53. № 7. P. 5813–5830. <https://doi.org/10.1002/2017WR020650>
- Allen S.T., Jasechko S., Berghuijs W.R., Welker J.M., Goldsmith G.R., Kirchner J.W.* Global sinusoidal seasonality in precipitation isotopes // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019. V. 23. № 8. P. 3423–3436. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3423-2019>
- Beria H., Larsen J.R., Ceperley N.C., Michelson A., Vennemann T., Schaeffli B.* Understanding snow hydrological processes through the lens of stable water isotopes // *WIREs Water*. 2018. V. 5. № 6. e1311. <https://doi.org/10.1002/wat2.1311>
- Cooper L.W.* Isotopic fractionation in snow cover // *Isotope tracers in catchment hydrology* / Eds. C. Kendall, J. J. McDonnell. New York: Elsevier Sci., 1998. P. 119–136. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-81546-0.50011-2>
- Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. V. 16. № 4. P. 436–468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
- Dietermann N., Weiler M.* Spatial distribution of stable water isotopes in alpine snow cover // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013. V. 17. № 7. P. 2657–2668. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2657-2013>
- Ebner P.P., Steen-Larsen H.C., Stenni B., Schneebeli M., Steinfeld A.* Experimental observation of transient $\delta^{18}\text{O}$ interaction between snow and advective airflow under various temperature gradient conditions // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. № 4. P. 1733–1743. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1733-2017>
- Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications (IHP-V IAEA Technical Documents in Hydrology, No. 39). V. 1 / Ed. W.G. Mook. IAEA, UNESCO, 2001 (reprint [2020]). 164 p.
- Koeniger P., Hubbard J.A., Link T., Marshall J.D.* Isotopic variation of snow cover and streamflow in response to changes in canopy structure in a snow-dominated mountain catchment // *Hydrological Processes*. 2008. V. 22. № 4. P. 557–566. <https://doi.org/10.1002/hyp.6967>
- Konishchev V.N., Golubev V.N., Sokratov S.A.* Sublimation from a seasonal snow cover and an isotopic content of ice wedges in the light of a palaeoclimate reconstruction // *ICOP 2003. Permafrost. Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost, 21–25 July 2003, Zürich, Switzerland*. V. 1 / Eds. M. Phillips, S.M. Springman, L.U. Arenson. Lisse: Swets & Zeitlinger, 2003. P. 585–590.
- Kozachek A., Mikhailenko V., Masson-Delmotte V., Ekaykin A., Ginot P., Kutuzov S., Legrand M., Lipenkov V., Preunkert S.* Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt El'brus ice cores // *Climate of the Past*. 2017. V. 13. № 5. P. 473–489. <https://doi.org/10.5194/cp-13-473-2017>
- Lee J., Feng X., Faiia A.M., Posmentier E.S., Kirchner J.W., Osterhuber R., Taylor S.* Isotopic evolution of a seasonal snowcover and its melt by isotopic exchange between liquid water and ice // *Chemical geology*. 2010. V. 270. № 1–4. P. 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.11.011>
- Mikhailenko V., Sokratov S., Kutuzov S., Ginot P., Legrand M., Preunkert S., Lavrentiev I., Kozachek A., Ekaykin A., Faïn X., Lim S., Schotterer U., Lipenkov V., Toropov P.* Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. № 6. P. 2253–2270. <https://doi.org/10.5194/tc-9-2253-2015>
- Penna D., Ahmad M., Birks S.J., Bouchaou L., Brenčić M., Butt S., Holko L., Jeelani G., Martínez D.E., Melikadze G., Shanley J.B., Sokratov S.A., Stadnyk T., Sugimoto A., Vreča P.* A new method of snowmelt sampling for water stable isotopes // *Hydrological Processes*. 2014. V. 28. № 22. P. 5637–5644. <https://doi.org/10.1002/hyp.10273>
- Proksch M., Rutter N., Fierz Ch., Schneebeli M.* Intercomparison of snow density measurements: bias, precision, and vertical resolution // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. № 1. P. 371–384. <https://doi.org/10.5194/tc-10-371-2016>
- Sturm M., Holmgren J., Liston G.L.* A seasonal snow cover classification system for local to global applications // *Journ. of Climate*. 1995. V. 8. № 5 (Part 2). P. 1261–1283. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<1261:ASSCCS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<1261:ASSCCS>2.0.CO;2)
- Taylor S., Feng X., Kirchner J.W., Osterhuber R., Klaue B., Renshaw C.E.* Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt // *Water Resources Research*. 2001. V. 37. № 3. P. 759–769. <https://doi.org/10.1029/2000WR900341>
- Vasil'chuk Yu., Chizhova Ju., Budantseva N., Vystavna Yu., Eremina I.* Stable isotope composition of precipitation events revealed modern climate variability // *Theoretical and Applied Climatology*. 2022. V. 147. № 3–4. P. 1649–1661. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03900-w>
- Vasil'chuk Yu., Chizhova Ju., Frolova N., Budantseva N., Kireeva M., Oleynikov A., Tokarev I., Rets E., Vasil'chuk A.* A variation of stable isotope composition of snow with altitude on the Elbrus Mountain, Central Caucasus // *Geography, Environment, Sustainability*. 2020. V. 13. № 1. P. 172–182. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-22>
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A.* Holocene January paleotemperature of northwestern Siberia reconstructed based on stable isotope ratio of ice wedges // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2023. V. 34. № 1. P. 142–165. <https://doi.org/10.1002/ppp.2177>

Wahl S., Steen-Larsen H.C., Hughes A.G., Dietrich L.J., Zuhr A., Behrens M., Faber A.-K., Hörhold M. Atmosphere-snow exchange explains surface snow isotope

variability // *Geophysical Research Letters*. 2022. V. 49. № 20. e2022GL099529. <https://doi.org/10.1029/2022GL099529>

Citation: Sokratov S.A., Komarov A.Yu., Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk J.Yu., Seliverstov Yu.G., Grebennikov P.B., Frolov D.M. Spatial-temporal variability of the $\delta^{18}\text{O}$ values and the snow structure on the territory of the Meteorological Observatory of the Lomonosov Moscow State University. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (4): 569–582 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423040154

Spatial-Temporal Variability of the $\delta^{18}\text{O}$ Values and the Snow Cover Structure on the Territory of the Meteorological Observatory of the Lomonosov Moscow State University

S. A. Sokratov^{a, #}, A. Yu. Komarov^a, Yu. K. Vasil'chuk^a, N. A. Budantseva^a, J. Yu. Vasil'chuk^a, Yu. G. Seliverstov^a, P. B. Grebennikov^a, and D. M. Frolov^a

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[#]e-mail: sokratov@geogr.msu.ru

Received July 3, 2023; revised September 4, 2023; accepted October 2, 2023

The isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ values) of snow layers, constructing snow cover to the time of reaching maximum snow water equivalent (SWE), was compared with the isotopic content of snow precipitated over the whole the winter season 2018/19 on the territory of the Meteorological Observatory of the Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia). Snow-sampling was carried out in a trench 20 m long simultaneously with detailed measurements of spatial variability of the structural characteristics of snow depth. Sampling was conducted for each precipitation event over the winter season, with the amount of precipitation also documented. It was found that the spatially-distributed enrichment with heavy oxygen isotopes along the trench fell within the range of 0–3.5‰, with average values for the four main formed snow layers changing from 1.3 to 2.5‰. The enrichment was not much dependent on the age of snow layer in the snowpack, and it was even more pronounced in the upper layers. This suggests that the post-precipitated change in the isotopic composition of snow cover for the conditions of the investigated site mainly took place when the snow was exposed to the atmosphere (due to sublimation and evaporation), while the processes of dry and wet metamorphism were either less important or even led to leveling the effects of isotopic fractionation. A positive correlation was found between the isotope composition of snow and the spatially varying snow density in each layer. This is most probably related to involvement of wind influence into the snow accumulation resulting in more dense snow. The spatial variability of the isotope composition of snow in each layer was smaller than changes in snow density and snow water equivalent.

Keywords: snow cover, stable water isotopes, snow stratigraphy, spatial variability, winter precipitations, temporal variability

REFERENCES

- Borodulina G.S., Tokarev I.V., Levichev M.A. Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of Karelian snow cover. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 61 (4): 521–532 [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S2076673421040105>
- Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Yu.N., Budantseva N.A., Ly-chagin M.Y., Popovnin V.V., Tkachenko A.N. Isotopic composition of winter snow on the Aibga Ridge (Krasnaya Polyana), Western Caucasus. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2017, (3): 99–118 [In Russian]. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.3.24402>
- Ekaykin A.A., Vladimirova D.O., Tebenkova N.A., Brovko E.V., Veres A.N., Kovyazin A.V., Kozachek A.V., Lindren M., Shibaev Yu.A., Preobrazhenskaya A.V., Lipenkov V.Ya. Spatial variability of snow isotopic composition and accumulation rate at the stake farm of Vostok station (Central Antarctica). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (1): 46–62 [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-1-46-62>
- Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Sokratova I.N., Preobrazhenskaya A.V. Isotopic composition of snow and ice in Antarctica: Climate signal and post-depositional noise. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2007, 2 (76): 96–105 [In Russian].
- Zykin N.N., Tokarev I.V., Vinograd N.A. Monitoring of stable isotopes ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) in precipitations of Moscow (Russia): Comparison for 2005–2014 and 1970–1979 periods. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*.

- Nauki o Zemle*. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2021, 66 (4): 723–733 [In Russian]. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.405>
- Fierz Ch., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. *International classification for seasonally falling snow (a guide to the description of snow thickness and snow cover) Russian edition (Data of Glaciological Studies, 2012–2)*. International classification for seasonally falling snow (a guide to the description of snow thickness and snow cover) Russian edition (Data of Glaciological Studies, 2012–2). Moscow: Institute of Geography RAS, Glaciological Association, 2012: 80 [In Russian].
- Frolov D.M., Komarov A.Yu., Seliverstov Yu.G., Sokratov S.A., Turchaninova A.S., Grebennikov P.B. Study of spatial-temporal heterogeneity of snow cover at the territory of MO MSU in Winter 2018/2019. *Ekologo-klimaticheskie harakteristiki atmosfery Moskvy v 2018 g. po dannym Meteorologicheskoy observatorii MGU imeni M.V. Lomonosova*. Environmental and climate characteristics of the atmosphere in Moscow in 2018 according to the measurements of the Moscow State University Meteorological Observatory. Moscow: MAKS Press, 2019. 225–230 [In Russian].
- Chizhova Ju.N., Vasil'chuk Yu.K. Deuterium excess in the snow and glaciers of the Polar Ural and massive ice of the south of the Yamal Peninsula and the coast of Baydaratskaya Bay. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2017, (2): 100–111 [In Russian]. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.2.23342>
- Chizhova Yu.N., Mikhalenko V.N., Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Kozachek A.V., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I. Isotopic composition of oxygen in snow-and-firn thickness on the Eastern peak of Elbrus, the Caucasus. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (3): 293–305 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-426>
- Ekologo-klimaticheskie harakteristiki atmosfery Moskvy v 2018 g. po dannym Meteorologicheskoy observatorii MGU imeni M.V. Lomonosova*. Environmental and climate characteristics of the atmosphere in Moscow in 2018 according to the measurements of the Moscow State University Meteorological Observatory. Moscow: MAKS Press, 2019: 277 [In Russian]. <https://doi.org/10.29003/m856.atm-2018>
- Ala-aho P., Tetzlaff D., McNamara J.P., Laudon H., Kormos P., Soulsby C. Modeling the isotopic evolution of snowpack and snowmelt: Testing a spatially distributed parsimonious approach. *Water Resources Research*. 2017, 53 (7): 5813–5830. <https://doi.org/10.1002/2017WR020650>
- Allen S.T., Jasechko S., Berghuijs W.R., Welker J.M., Goldsmith G.R., Kirchner J.W. Global sinusoidal seasonality in precipitation isotopes. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019, 23 (8): 3423–3436. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3423-2019>
- Beria H., Larsen J.R., Ceperley N.C., Michelon A., Vennemann T., Schaefli B. Understanding snow hydrological processes through the lens of stable water isotopes. *WIREs Water*. 2018, 5 (6): e1311. <https://doi.org/10.1002/wat2.1311>
- Cooper L.W. Isotopic fractionation in snow cover. In Kendall C., McDonnell J.J. (Eds.) *Isotope tracers in catchment hydrology*. New York: Elsevier Sci., 1998: 119–136. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-81546-0.50011-2>
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964, 16 (4): 436–468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
- Dietermann N., Weiler M. Spatial distribution of stable water isotopes in alpine snow cover. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013, 17 (7): 2657–2668. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2657-2013>
- Ebner P.P., Steen-Larsen H.C., Stenni B., Schneebeli M., Steinfeld A. Experimental observation of transient $\delta^{18}\text{O}$ interaction between snow and advective airflow under various temperature gradient conditions. *The Cryosphere*. 2017, 11 (4): 1733–1743. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1733-2017>
- Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications (IHP-V IAEA Technical Documents in Hydrology, No. 39). V. 1. Ed. W.G. Mook. IAEA, UNESCO, 2001 (reprint [2020]): 164 p.
- Koeniger P., Hubbart J.A., Link T., Marshall J.D. Isotopic variation of snow cover and streamflow in response to changes in canopy structure in a snow-dominated mountain catchment. *Hydrological Processes*. 2008, 22 (4): 557–566. <https://doi.org/10.1002/hyp.6967>
- Konishchev V.N., Golubev V.N., Sokratov S.A. Sublimation from a seasonal snow cover and an isotopic content of ice wedges in the light of a palaeoclimate reconstruction. In Phillips M., Springman S.M., Arenson L.U. (Eds.) *ICOP 2003. Permafrost. Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost*, 21–25 July 2003, Zürich, Switzerland. Vol. 1. Lisse: Swets & Zeitlinger, 2003: 585–590.
- Kozachek A., Mikhalenko V., Masson-Delmotte V., Ekaykin A., Ginot P., Kutuzov S., Legrand M., Lipenkov V., Preunkert S. Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt El'brus ice cores. *Climate of the Past*. 2017, 13 (5): 473–489. <https://doi.org/10.5194/cp-13-473-2017>
- Lee J., Feng X., Faiia A.M., Posmentier E.S., Kirchner J.W., Osterhuber R., Taylor S. Isotopic evolution of a seasonal snowcover and its melt by isotopic exchange between liquid water and ice. *Chemical geology*. 2010, 270 (1–4): 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.11.011>
- Mikhalenko V., Sokratov S., Kutuzov S., Ginot P., Legrand M., Preunkert S., Lavrentiev I., Kozachek A., Ekaykin A., Faïn X., Lim S., Schotterer U., Lipenkov V., Toropov P. Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia. *The Cryosphere*. 2015, 9 (6): 2253–2270. <https://doi.org/10.5194/tc-9-2253-2015>
- Penna D., Ahmad M., Birks S.J., Bouchaou L., Brenčić M., Butt S., Holko L., Jeelani G., Martínez D.E., Melikadze G., Shanley J.B., Sokratov S.A., Stadnyk T., Sugimoto A., Vreča P. A new method of snowmelt sampling for water stable isotopes. *Hydrological Processes*. 2014, 28 (22): 5637–5644. <https://doi.org/10.1002/hyp.10273>

- Proksch M., Rutter N., Fierz Ch., Schneebeli M.* Intercomparison of snow density measurements: bias, precision, and vertical resolution. *The Cryosphere*. 2016, 10 (1): 371–384.
<https://doi.org/10.5194/tc-10-371-2016>
- Sturm M., Holmgren J., Liston G.L.* A seasonal snow cover classification system for local to global applications. *Journ. of Climate*. 1995, 8 (5 (Part 2)): 1261–1283.
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<1261:ASSCCS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<1261:ASSCCS>2.0.CO;2)
- Taylor S., Feng X., Kirchner J.W., Osterhuber R, Klaue B., Renshaw C.E.* Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt. *Water Resources Research*. 2001, 37 (3): 759–769.
<https://doi.org/10.1029/2000WR900341>
- Vasil'chuk Yu., Chizhova Ju.N., Budantseva N., Vystavna Yu., Eremina I.* Stable isotope composition of precipitation events revealed modern climate variability. *Theoretical and Applied Climatology*. 2022, 147(3–4): 1649–1661.
<https://doi.org/10.1007/s00704-021-03900-w>
- Vasil'chuk Yu., Chizhova Ju.N., Frolova N., Budantseva N., Kireeva M., Oleynikov A., Tokarev I., Rets E., Vasil'chuk A.* A variation of stable isotope composition of snow with altitude on the Elbrus Mountain, Central Caucasus. *Geography, Environment, Sustainability*. 2020, 13 (1): 172–182.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-22>
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A.* Holocene January paleotemperature of northwestern Siberia reconstructed based on stable isotope ratio of ice wedges. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2023, 34 (1): 142–165.
<https://doi.org/10.1002/ppp.2177>
- Wahl S., Steen-Larsen H.C., Hughes A.G., Dietrich L.J., Zuhr A., Behrens M., Faber A.-K., Hörhold M.* Atmosphere-snow exchange explains surface snow isotope variability. *Geophysical Research Letters*. 2022, 49 (20): e2022GL099529.
<https://doi.org/10.1029/2022GL099529>