

СРАВНЕНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) СНЕГОПАДОВ И СНЕЖНОГО ПОКРОВА В МОСКВЕ ЗИМОЙ 2023–2024 гг.

© 2025 г. Н. А. Буданцева^{1,*}, Ю. К. Васильчук¹, Ю. Н. Чижова²,
З. С. Ваховская^{1,3}, А. К. Васильчук¹

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

²Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: nadin.budanceva@mail.ru

Поступила в редакцию 14.06.2025 г.

После доработки 22.07.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

Цель исследования – оценить соответствие изотопных характеристик снежного покрова выпавшим в период снегонакопления атмосферным осадкам в зимний период 2023–2024 гг., отличавшийся значительной мощностью снежного покрова. Для этого производился отбор снега из выделенных горизонтов снежной толщи из шурфов на площадке на территории МГУ им. М. В. Ломоносова, на метеообсерватории МГУ отобраны все осадки, выпавшие с конца ноября 2023 г. до конца февраля 2024 г. В образцах снега и осадков выполнен изотопный анализ кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$), рассчитан дейтериевый эксцесс (d_{exc}). Установлено, что уравнения связи величин $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в осадках и снежном покрове характеризуются близкими параметрами. В феврале в снежной толще отмечено расширение диапазона значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в снеге по вертикали, а также общая тенденция увеличения значений $\delta^{18}\text{O}$ на 1.2–0.6‰ и снижение величины d_{exc} по сравнению с осадками, выпавшими в течение декабря–января. Это, скорее всего, обусловлено процессами старения снежной толщи – формированием ледяных корок и горизонтов разрыхления в нижних частях снежного покрова. В марте изотопная контрастность снежной толщи была менее выражена, и в период активного снеготаяния в конце марта диапазон вариаций значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ был минимальный. Показано, что в целом в течение зимнего периода 2023–2024 гг. в г. Москва изотопные параметры снежного покрова хорошо соответствовали средневзвешенным изотопным параметрам всех атмосферных осадков, выпавших за период наблюдений, что, скорее всего, обусловлено условиями данного зимнего периода (преобладание осадков в виде снега, редкие короткие оттепели), при которых частичное таяние приводило к формированию множества льдистых горизонтов в снежной толще, но исключало потерю талой воды.

Ключевые слова: снежный покров, зимние атмосферные осадки, изотопы кислорода и водорода, дейтериевый эксцесс

DOI: 10.7868/S2412376525040095

Снег – важное звено в годовом круговороте воды, так как талая снеговая вода – источник пополнения подземных вод и гидрологических систем в период половодья. В умеренно-континентальном климате Московского региона снег, как правило, выпадает при самых низких температурах воздуха, поэтому изотопные параметры снега и талой снеговой воды характеризуются низкими значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ по сравнению с другими природными источниками воды, участвующими в гидрологическом цикле.

Изотопные характеристики снежной толщи имеют важное значение для оценки изотопного состава талых снеговых вод, которые служат одним из основных источников питания подземных вод и рек. Кроме того, изучение снежного покрова на экспериментальной площадке важно для понимания связи между изотопными характеристиками снежного покрова, атмосферными осадками и метеорологическими условиями холодного периода. Установление этой связи позволяет оценить современные климатические

условия в труднодоступных районах, где нет сети регулярных метеорологических станций. Кроме того, изучение формирования изотопных характеристик снежного покрова и их изменения по мере его старения методически важно не только для Московского региона, но и для фундаментальных научных задач, например, в области криолитологии, связанной с формированием современных повторно-жильных льдов (Буданцева и др., 2024).

Изотопные характеристики кислорода и водорода неоднородны по вертикали снежной толщи, поскольку она формируется последовательно из осадков, выпадающих при разных метеорологических условиях и имеющих разный изотопный состав кислорода и водорода. Снежный покров – динамичная система, в которой физические и изотопные свойства изменяются по мере его аккумуляции в течение зимы и в процессе таяния. Миграция водяного пара в снежном покрове, обусловленная температурным градиентом внутри снежной толщи, сопровождается испарением, сублимацией и конденсацией, что приводит к изменению первичных изотопных характеристик выпадающих осадков, формирующих снежную толщу (Friedman et al., 1991; Lee et al., 2010; Ala-aho et al., 2017, Papina et al., 2022). Таяние верхних слоёв снежного покрова и просачивание талой воды сквозь снежный покров может приводить не только к перераспределению значений $\delta^{18}\text{O}$ (и d_{exc}), но и к частичной потере начального изотопного сигнала в случае, если талая вода покидает снежную толщу (Taylor et al., 2001; Unnikrishna et al., 2002; Rücker et al., 2019).

Цель исследования – оценить соответствие изотопных характеристик снежного покрова выпадавшим в период снегонакопления атмосферным осадкам в зимний период 2023/24 г., отличающийся значительной мощностью снежного покрова, особенно в условиях мегаполиса, когда на снежный покров в течение зимнего периода, помимо естественных факторов, может оказывать влияние тепловое поле крупного города.

Наблюдения за изотопными характеристиками атмосферных осадков в России чрезвычайно редки и непродолжительны: после окончания периода работы программы ГНИП на территории СССР в 1980–1990-х годах наблюдения были восстановлены только на метеоплощадке в Москве в 2014 г. (Васильчук и др., 2021). С тех пор ведутся непрерывные исследования изотопных параметров всех событий выпадения осадков (Васильчук и др., 2024), что позволило дополнить открытый международный репозиторий

среднемесячными данными по городу Москве. Изотопные данные по индивидуальным событиям выпадения атмосферных осадков остаются редкими и востребованными в широком спектре географических задач, в данной работе эти данные исследованы для периода залегания снежного покрова в г. Москва в 2023–2024 гг.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На метеостанции МГУ выполняли отбор осадков каждого эпизода выпадения с 23.11.2023 до 24.03.2024 г. Отбор снега из снежной толщи проводили в шурфах на опытной площадке размером 4×4 м, расположенной на территории МГУ в 300 м от метеостанции. Площадка расположена на закрытой для общего доступа территории, вдали от дорог. Шурфы закладывали в период между 25.12.2023 и 25.03.2024, всего было заложено семь шурфов. В каждом шурфе производили описание строения снежной толщи и из каждого выделенного слоя отбирали образец снега по всей мощности горизонта. При большой мощности слоя из него отбирали два образца снега. Отбирались также образцы ледяных корок (толщиной от 1 см), встреченных в снежной толще. Образцы помещали в чистые двойные пластиковые пакеты, которые затем плотно завязывали. Таяние производилось при $+3$ °С. Вода переливалась в пластиковые флаконы объёмом 15 мл. Образцы снега и осадков хранились в холодильнике при температуре $+3$ °С. Для минимизации испарения крышка флакона дополнительно покрывалась парафином.

Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода ($\delta^2\text{H}$) определяли на анализаторе Picarro L2130-i в лаборатории палеоэкологических реконструкций Института географии РАН. Для калибровки измеренных значений в каждой серии измерений анализировали международные стандарты (USGS-45, USGS-46, USGS-47). Точность измерений составила 0.14 ‰ для значений $\delta^{18}\text{O}$ и 1 ‰ для значений $\delta^2\text{H}$.

Дейтериевый эксцесс (d_{exc}), часто применяемый при изотопных исследованиях снежной толщи для оценки перераспределения изотопных сигналов в результате сублимации, таяния и повторного замерзания (Hughes et al., 2021), рассчитан как $d_{\text{exc}} = \delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ (Dansgaard, 1964).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика метеорологических параметров в период формирования снежного покрова.

Количество и тип осадков, температура воздуха фиксировались с 23.11.2023 по 25.03.2024 г. За этот период осадки выпадали в основном в виде снега – 60 %, осадки смешанного типа составили 34 %, дождь – 6 %. При этом дождь выпал только в последние два дня перед последним опробованием снежной толщи (25.03.2024). Среднесуточная температура воздуха ($T_{\text{в}}$) варьировала от -23.3 до $+4.5$ °C; количество осадков варьировало от 1 до 21.4 мм водного эквивалента (в.э.), осадки количеством более 5 мм в.э. выпали, как правило, в виде снега, реже это были осадки смешанного типа (рис. 1).

Условия аккумуляции снежного покрова в зимний период 2023/24 г. Снежный покров формировался в результате многочисленных снегопадов разной интенсивности. По данным измерений мощности снежной толщи на территории обсерватории МГУ, датой начала формирования снежного покрова можно считать 25.11.2023 (Frolov et al., 2024). В конце декабря мощность снега на опытной площадке составляла около 30 см, 25.12.2023 заложен первый шурф. До конца февраля отмечалось увеличение мощности снежного покрова: максимальная мощность снега – 67 см, отмечена в шурфе № 5, заложенном 28.02.2024. Близкие данные получены по снежному покрову на территории обсерватории МГУ в период с 29.11.2023 по 08.02.2024 г., здесь мощность снега увеличилась от 28.5 до 66 см (Frolov et al., 2024).

Увеличение мощности снежного покрова к концу февраля обусловлено снегопадами и в меньшей степени осадками смешанного типа между 6 и 26 января (10 эпизодов выпадения снега количеством от 2.6 до 8.2 мм в.э.) и между 7 и 23 февраля 2024 г. (4 эпизода выпадения снега количеством от 2 до 15.2 мм в.э.), а также отсутствием длительных оттепелей и дождевых осадков. Всего за период с 23 ноября по 11 марта 2024 г. зафиксировано четыре оттепели разной интенсивности (см. рис. 1, б): 18–23 декабря (температура воздуха повышалась до 3.5 °C), 30 декабря ($T_{\text{в}} = 2.4$ °C), 24–25 февраля ($T_{\text{в}} = 0.6$ °C) и 29 февраля – 3 марта ($T_{\text{в}}$ повышалась до 2.5 °C). С 12 марта температура воздуха была устойчиво выше 0 °C.

С 25 февраля до 25 марта 2024 г. осадки выпадали редко – зафиксировано два эпизода

осадков смешанного типа (25 февраля и 19 марта) и два эпизода осадков в виде дождя (23 и 24 марта). В марте мощность снежного покрова начала постепенно снижаться, однако 12 марта его высота всё ещё составляла 63 см. Во второй половине марта началось активное снеготаяние, в результате которого высота снежного покрова начала быстро уменьшаться, 25 марта высота снежного покрова составляла 36 см, при этом снег был очень влажный. Окончательно устойчивый снежный покров на участке исследований сошёл в начале апреля.

Строение снежной толщи в шурфах. В шурфе № 1, заложенном 25.12.2023, мощность снежной толщи составила 29 см (табл. 1, рис. 2). С поверхности залегал крупнозернистый плотный снег, ниже плотность и зернистость снега снижалась, на глубине 20–22 см отмечен горизонт очень плотного снега типа ледяной корки.

В шурфе № 2, заложенном 18.01.2024, в снежной толще мощностью 45 см, с поверхности залегал 10-сантиметровый слой свежесвыпавшего рыхлого снега, ниже выделен 10-сантиметровый слой более плотного мелкозернистого снега – скорее всего, это снег, выпадавший с 6 по 15 января. Ниже снег был заметно более плотным, с выраженными ледяными корками. Самый нижний горизонт в шурфе (глубина 36–45 см) представлен очень плотным слоем, сложенным из крупных прозрачных кристаллов льда.

В шурфе № 3, заложенном 31.01.2024, в снежной толще мощностью 55 см, с поверхности залегал 10-сантиметровый слой свежесвыпавшего рыхлого снега (снегопад 26 января), ниже выделен 15-сантиметровый слой более плотного мелкозернистого снега. Предположительно, это снег, выпадавший в предыдущие дни с 6 по 18 января, который был описан в верхней части шурфа № 2. Ниже, до глубины 51 см, залегал более плотный снег с несколькими горизонтами очень плотного снега типа ледяных корок.

В шурфе № 4, заложенном 14.02.2024, в снежной толще мощностью 59 см с поверхности был отмечен горизонт ледяной корки толщиной 2 см, наиболее вероятно, образовавшейся в результате дневных оттепелей 10–11 февраля. Вся толща представлена мелкозернистым снегом с горизонтами ледяных корок толщиной от нескольких миллиметров до 2 см (см. рис. 2, г, табл. 1).

В шурфе № 5, заложенном 28.02.2024, в снежной толще мощностью 67 см верхний слой (0–18 см) представлен мелкозернистым снегом, предположительно, выпадавшим между 15

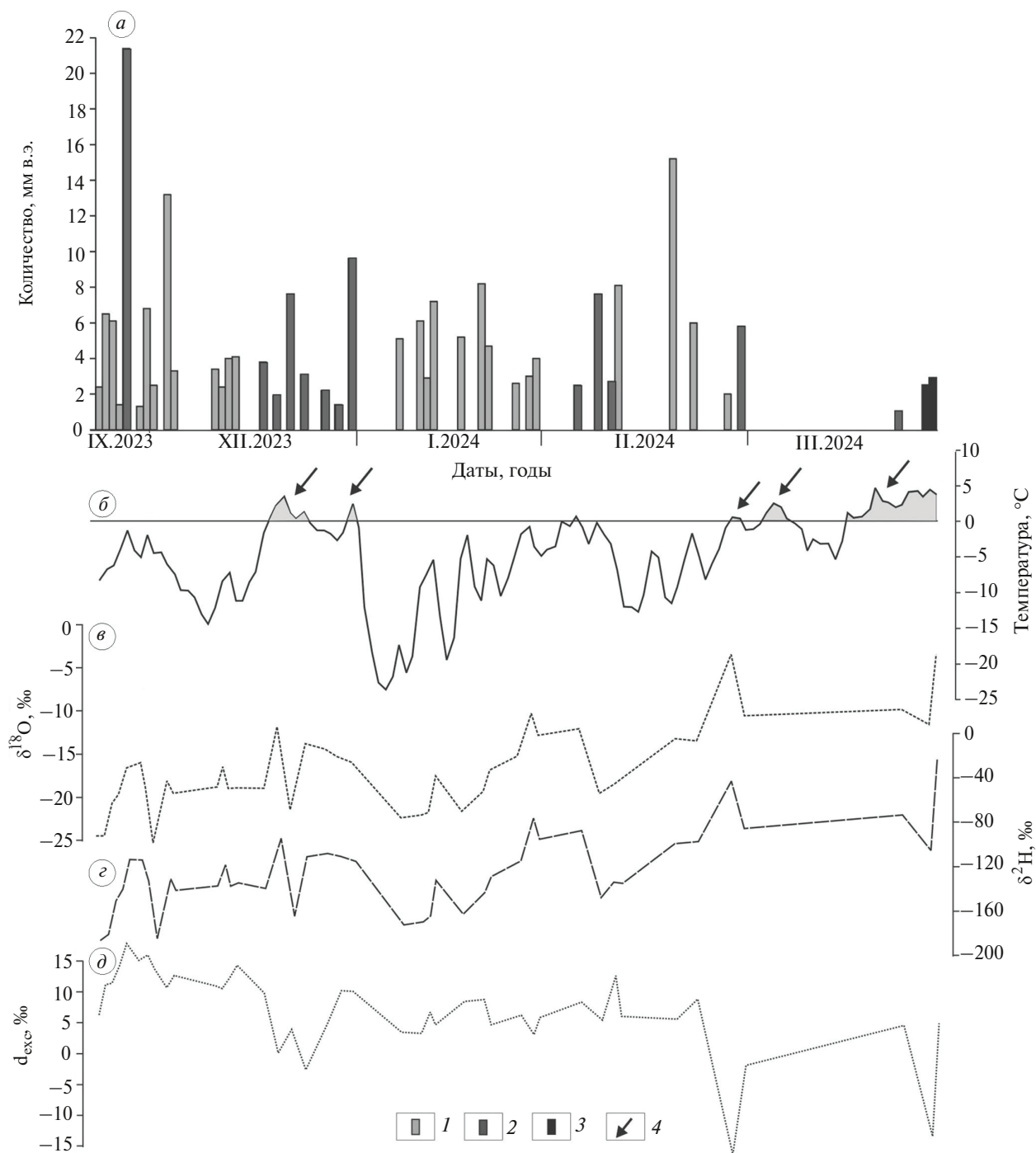


Рис. 1. Количество осадков (а), среднесуточная температура воздуха (б) по данным метеобсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова, с 23.11.2023 по 24.03.2024 г. и изотопные характеристики осадков: $\delta^{18}\text{O}$ (в); $\delta^2\text{H}$ (г); d_{exc} (д). Тип осадков (1–3): 1 – снег; 2 – смешанные осадки; 3 – дождь; 4 – периоды с температурой воздуха выше 0 °C

Fig. 1. Precipitation amount (a), average daily air temperature (б) according to data from Meteorological Observatory of Lomonosov Moscow State University, from 23.11.2023 to 24.03.2024 and isotope parameters of precipitation: $\delta^{18}\text{O}$ (в); $\delta^2\text{H}$ (г); d_{exc} (д). Type of precipitation (1–3): 1 – snow; 2 – mixed precipitation; 3 – rain; 4 – periods with air temperature above 0 °C

Таблица 1. Описание образцов и значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} в горизонтах снежной толщи

Table 1. Description of samples and values of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and d_{exc} in snow horizons

№ слоя	Глубина, см	Описание слоя	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc} , ‰
<i>25.12.2023, шурф № 1. Высота снежного покрова 29 см</i>					
1	0–9	Крупнозернистый плотный снег, сложенный смёрзшимися кристаллами размером 2–3 мм	–19.1	–143	9.8
2	9–20	Снег более рыхлый, сложен кристаллами размером около 1 мм	–19.7	–144	13.6
3	20–22	Слой очень плотного снега (ледяная корка), сложен крупными смёрзшимися кристаллами размером до 5–6 мм	–17.3	–122	16.4
4	22–29	Снег более рыхлый, мелкозернистый	–18.4	–136	11.2
<i>18.01.2024, шурф № 2. Высота снежного покрова 45 см</i>					
1	0–10	Свежевыпавший снег, мелкозернистый, рыхлый	–20.7	–161	4.6
2	10–20	Снег более плотный, мелкозернистый	–22.0	–171	5
3	20–28	Снег заметно более плотный, средне- и крупнозернистый, прослеживаются две ледяные корки на глубинах 20–23 см и 26–28 см	–18.1	–142	2.8
4	26–28	Льдистый горизонт / корки	–18.6	–137	11.8
5	29–36	Снег плотный, среднезернистый	–18.7	–139	10.6
6	36–45	Ледяная корка, очень плотная	–16.4	–118	13.2
<i>31.01.2024, шурф № 3. Высота снежного покрова 55 см</i>					
1	0–10	Снег рыхлый, мелкозернистый	–14.5	–108	8
2	10–18	Снег более плотный, мелкозернистый	–20.8	–155	10.6
3	18–25	Снег более плотный, мелкозернистый	–21.6	–165	7.8
4	25–28	Снег очень плотный, средне- и крупнозернистый, сложен прозрачными кристаллами размером от 3 до 5 мм	–17.5	–134	6
5	29–47	Снег среднезернистый, с прослоями очень плотного снега толщиной около 1 см	–18.4	–135	12.2
6	48–51	Снег очень плотный, крупнозернистый, сложен прозрачными кристаллами размером около 5 мм	–17.4	–125	14.2
7	51–55	Снег более рыхлый, среднезернистый	–17.8	–130	12.4
<i>14.02.2024, шурф № 4. Высота снежного покрова 59 см</i>					
1	0–2	Ледяная корка	–16.4	–131	0.2
2	2–10	Снег рыхлый мелкозернистый, на глубине 10–11 см ледяная корка	–19.2	–146	7.6
3	12–19	Переслаивание мелкозернистого снега и ледяных корок толщиной не более 1 см	–12.6	–96	4.8
4	20–33	Снег более плотный, мелкозернистый	–19.6	–148	8.8
5	34–36	Льдистый горизонт / корки	–18.4	–140	7.2
6	37–53	Снег плотный, мелкозернистый	–18.9	–140	11.2
7	54–56	Льдистый горизонт / корки	–14.5	–112	4
8	57–59	Снег плотный, мелкозернистый	–17.1	–127	9.8
<i>28.02.2024, шурф № 5. Высота снежного покрова 67 см</i>					
1	0–8	Снег рыхловатый, мелкозернистый	–14.5	–109	7
2	9–17	Снег более плотный, мелкозернистый	–18.2	–134	11.6
3	18–20	Льдистый горизонт/ корки	–17.8	–137	5.4

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continued

№ слоя	Глубина, см	Описание слоя	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc} , ‰
4	20–30	Переслаивание снега белого мелкозернистого и 4–6 ледяных корок толщиной до 0.5 см	–13.6	–101	7.8
5	30–31	Льдистый горизонт / корки	–15.0	–112	8
6	32–59	Снег среднезернистый, уплотненный	–19.4	–146	9.2
7	47–48	Льдистый горизонт / корки	–18.4	–140	7.2
8	59–62	Льдистый горизонт / корки	–17.1	–123	13.8
9	63–67	Снег среднезернистый	–17.0	–125	11
<i>12.03.2024, шурф № 6. Высота снежного покрова 63 см</i>					
1	0–10	Снег плотный мелко- и среднезернистый	–15.1	–114	6.8
2	11–13	Льдистый горизонт / корки	–16.9	–129	6.2
3	13–18	Снег рыхловатый, мелкозернистый	–18.0	–136	8
4	18–20	Льдистый горизонт / корки	–14.2	–105	7.8
5	20–33	Снег рыхлый, мелкозернистый	–16.9	–126	9.2
6	33–35	Льдистый горизонт / корки	–18.1	–137	7.8
7	35–55	Снег рыхлый, среднезернистый, с тонкими (до 0.5 см) ледяными корками	–18.2	–135	10.6
8	55–56	Льдистый горизонт / корки	–17.5	–125	15
9	57–63	Снег рыхлый среднезернистый	–17.7	–129	12.6
<i>25.03.2024, шурф № 7. Высота снежного покрова 36 см</i>					
1	0–5	Снег рыхлый средне- и крупнозернистый, влажный	–16.0	–120	8
2	5–10	Снег более плотный, мелко- и среднезернистый	–17.6	–133	7.8
3	10–13	Снег крупнозернистый	–17.9	–136	7.2
4	14–16	Льдистый горизонт / корки	–17.8	–132	10.4
5	17–22	Снег рыхлый, среднезернистый	–17.7	–131	9.8
6	23–29	Снег рыхлый, крупно- и среднезернистый	–17.7	–131	10.6
7	30–32	Льдистый горизонт / корки	–17.2	–125	12.6
8	33–36	Снег очень рыхлый, крупнозернистый, кристаллы размером до 1 см, насыщен водой	–16.8	–124	10.4

и 23 февраля, при этом 15 февраля за сутки выпало 15.2 мм осадка. Ниже, до глубины 31 см, был вскрыт слой мелкозернистого снега с большим количеством ледяных корок. Нижняя часть снежной толщи была сложена более плотным среднезернистым снегом, прослежены две ледяные корки толщиной 2–3 см.

В шурфе № 6, заложенном 12.03.2024, в снежной толще мощностью 63 см с поверхности отмечен 10-сантиметровый слой плотного мелко- и среднезернистого снега. Ниже снег был более рыхлым, с горизонтами ледяных корок. В шурфе № 7, заложенном 25.03.2024, мощность

снежного покрова составляла 36 см, активное таяние снежного покрова привело к его увлажнению по всей мощности и увеличению зернистости за счёт слипания мелких зёрен в более крупные.

Изотопные характеристики осадков и снежной толщи. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ осадков варьировали в широком диапазоне: от –25.1 до –9.7 ‰ и от –189 до –74 ‰ соответственно, значения d_{exc} – от –2.2 до 17 ‰ (табл. 2, см. рис. 1, в–д). Выявлена умеренно положительная корреляция значений $\delta^{18}\text{O}$ атмосферных осадков и температуры воздуха, для всех индивидуальных осадков

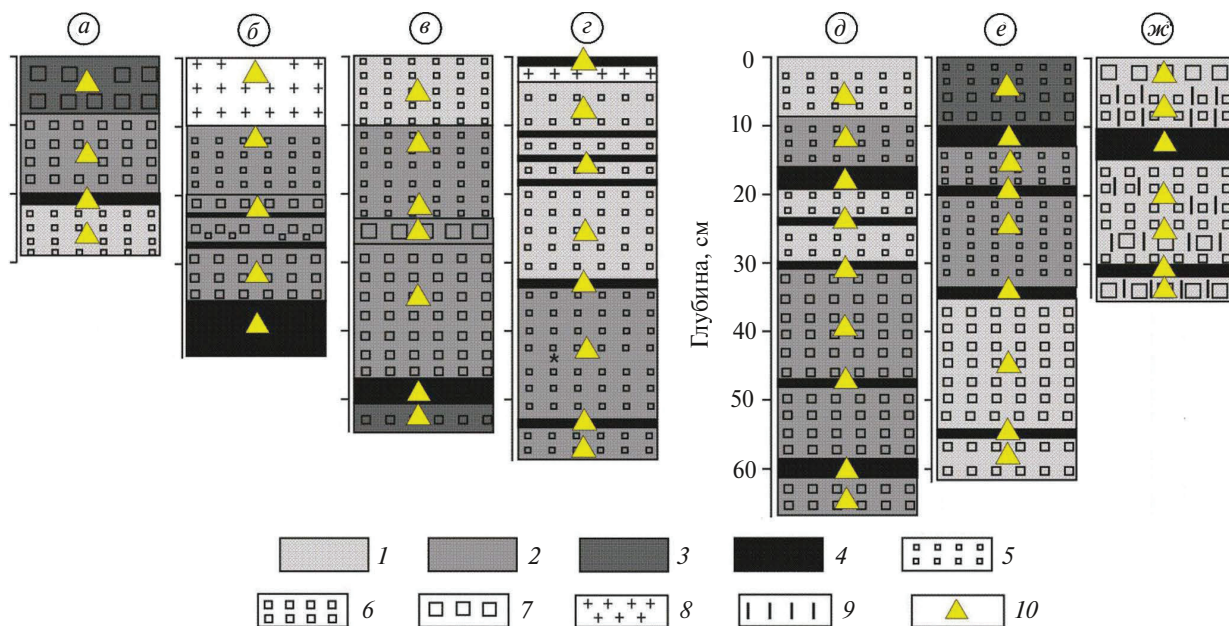


Рис. 2. Строение снежной толщи в шурфах и локализация мест отбора образцов снега для изотопного анализа кислорода и водорода: *a* – шурф 1; *б* – шурф 2; *в* – шурф 3; *г* – шурф 4; *д* – шурф 5; *е* – шурф 6; *ж* – шурф 7. Плотность снега (1–4): 1 – рыхлый; 2 – уплотнённый; 3 – плотный; 4 – ледяная корка. Размер зёрен снега (5–7): 5 – мелкий; 6 – средний; 7 – крупный; 8 – свежавыпавший снег; 9 – мокрый снег; 10 – места отбора проб для изотопного анализа. Даты заложения шурфов указаны в табл. 1

Fig. 2. Stratigraphy of the snow cover in the pits and location of sites of snow sampling for stable oxygen and hydrogen isotope analysis. *a* – pit 1; *б* – pit 2; *в* – pit 3; *г* – pit 4; *д* – pit 5; *е* – pit 6; *ж* – pit 7. Snow density (1–4): 1 – loose; 2 – compacted; 3 – dense; 4 – ice crust. Snow grain size (5–7): 5 – fine; 6 – medium; 7 – large; 8 – fresh snow; 9 – wet snow; 10 – sampling of snow for stable isotope analysis

связь значений с температурой описывается как $\delta^{18}\text{O} / T_{\text{в}} = 0.46 \text{‰} / \text{°C}$, $R^2 = 0.3$, что уже отмечалось для осадков Москвы (Васильчук и др., 2021, 2024). Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ в осадках описывается уравнением $y = 7.56x + +0.16$ (рис. 3), наклон линии соотношения довольно близок к наклону для глобальной линии метеорных вод (далее – ГЛМВ).

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ снежного покрова варьировали в более узком диапазоне, чем в осадках за период исследований. Значения $\delta^{18}\text{O}$ изменялись от -22 до -12.6‰ , значения $\delta^2\text{H}$ – от -171 до -96‰ , значения d_{ex} – от 0.2 до 16.4‰ (см. табл. 2). Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ в снежном покрове описывается уравнением $y = 7.73x + 4.5$ (см. рис. 3), что очень близко соответствует соотношению $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ для осадков.

Как правило, для верхнего горизонта снежной толщи и осадков, выпадающих в виде снега, отмечается корреляция изотопных параметров (Taylor et al., 2001; Langman et al., 2022). В исследованном снежном покрове верхний слой (горизонт 1) образован из снега, выпавшего

накануне дат отбора из шурфов. Изотопные характеристики горизонта 1 исследованной нами снежной толщи близки к изотопным характеристикам выпавшего снега (табл. 3). Наибольшее расхождение в значениях $\delta^{18}\text{O}$ осадков и поверхностного горизонта снега отмечено 28.02. (шурф № 4), что может быть обусловлено просачиванием выпавших 25.02. осадков смешанного типа со значением $\delta^{18}\text{O} = -10.5 \text{‰}$ при среднесуточной температуре воздуха $+0.5 \text{°C}$.

Сопоставить изотопные параметры более глубоких горизонтов снежной толщи и осадков можно только ориентировочно, так как уплотнение снега и преобразование первичного изотопного сигнала осадков не позволяют точно определить горизонт, соответствующий осадкам.

В снежной толще в конце декабря (шурф № 1) среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составило -18.6‰ , при этом если рассматривать только события выпадения осадков более 4 мм, то средневзвешенное значение $\delta^{18}\text{O}$ осадков, выпавших с начала периода до даты отбора в шурфе, составляет -18.9‰ . Предположено, что

Таблица 2. Значения $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} в атмосферных осадках**Table 2.** Values of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and d_{exc} in atmospheric precipitation

Тип осадка	Дата выпадения	Количество, мм	T воздуха, °C	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc} , ‰	
Снег	23.11.2023	2.4	-8.2	-24.3	-189	5.4	
	24.11.2023	6.5	-6.7	-24.3	-184	10.4	
	25.11.2023	6.1	-6.2	-20.6	-154	10.8	
	26.11.2023	1.4	-3.9	-19.5	-143	13	
Снег и дождь	27.11.2023	21.4	-1.4	-16.5	-115	17	
Снег	29.11.2023	1.3	-4.9	-16.2	-115	14.6	
	30.11.2023	6.8	-2	-18.8	-135	15.4	
	01.12.2023	2.5	-4.4	-25.1	-187	13.8	
	03.12.2023	13.2	-5.9	-17.9	-133	10.2	
	04.12.2023	3.3	-7.2	-19.3	-142	12.4	
	10.12.2023	3.4	-11.2	-18.7	-139	10.6	
	11.12.2023	2.4	-8.6	-16.2	-119	10.6	
	12.12.2023	4	-7.4	-18.8	-139	11.4	
	13.12.2023	4.1	-11	-18.8	-137	13.4	
	Снег и дождь	17.12.2023	3.8	-2.8	-18.9	-142	9.2
	Ледяной дождь	19.12.2023	1.9	2.2	-11.9	-95	0.2
	Снег и дождь	21.12.2023	7.6	1.2	-21.3	-167	3.4
		23.12.2023	3.1	1.4	-13.6	-111	-2.2
		26.12.2023	2.2	-1.1	-14.3	-110	4.4
		28.12.2023	1.4	-1.6	-15.2	-112	9.6
30.12.2023		9.6	2.4	-15.8	-116	10.4	
Снег		06.01.2024	5.1	-17.1	-22.2	-174	3.6
		09.01.2024	6.1	-9.2	-21.9	-172	3.2
		10.01.2024	2.9	-7.6	-21.6	-167	5.8
	11.01.2024	7.2	-5.5	-17.4	-134	5.2	
	15.01.2024	5.2	-5.2	-21.5	-164	8	
	18.01.2024	8.2	-10.9	-19.2	-145	8.6	
	19.01.2024	4.7	-5.3	-16.8	-130	4.4	
	23.01.2024	2.6	-5	-15.2	-116	5.6	
	25.01.2024	3	-0.7	-9.9	-76	3.2	
	26.01.2024	4	-3.5	-12.7	-96	5.6	
Снег и дождь	01.02.2024	2.5	0.7	-11.9	-88	7.2	
	04.02.2024	7.6	-0.1	-19.4	-150	5.2	
	06.02.2024	2.7	-3	-18.4	-135	12.2	
Снег	07.02.2024	8.1	-6.7	-17.8	-137	5.4	
	15.02.2024	15.2	-11.4	-13.1	-99	5.8	
	18.02.2024	6	-1.6	-13.3	-98	8.4	
Снег и дождь	25.02.2024	5.8	0.5	-10.5	-86	-2	
	19.03.2024	1	2	-9.7	-74	3.6	

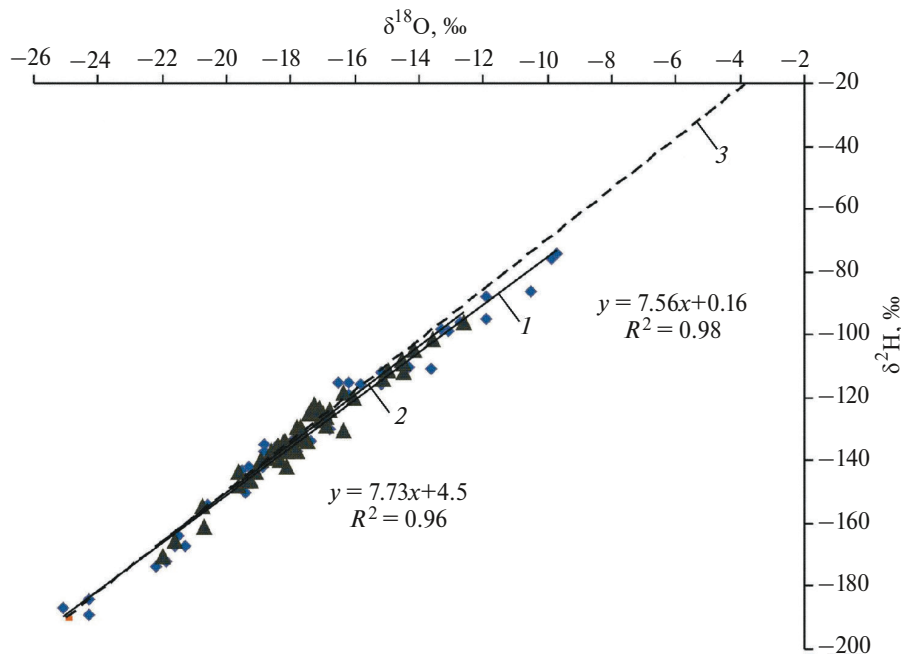


Рис. 3. Соотношение $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках зимнего периода (1) и в снежном покрове (2); глобальная линия метеорных вод (3)

Fig. 3. $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ ratio in winter precipitation (1) and in snow cover (2); global meteoric water line (3)

Таблица 3. Значения $\delta^{18}\text{O}$ верхнего горизонта снежного покрова и снежных осадков, выпадавших до отбора в шурфе

Table 3. $\delta^{18}\text{O}$ values of the upper horizon of snow cover and snowfall that fell before sampling in the snow pit

$\delta^{18}\text{O}$ в верхнем слое снега, ‰ / дата отбора	$\delta^{18}\text{O}^*$ в снежных осадках до отбора снежной толщи, ‰ / дата отбора
-19.1/ 25.12.23	-18.6 / 01–23.12.23
-20.7/ 18.01.24	-19.0 / 26.12.23–18.01.24
-14.5/ 31.01.24	-13.9 / 19–26.01.24
-19.2/ 14.01.24	-17.8 / 01–07.02.24
-14.5/ 28.02.24	-12.0 / 15–25.02.24

Примечание. * Средневзвешенное значение по количеству осадка.

в ноябре–декабре 2023 г. снежный покров сформирован большей частью за счёт осадков количеством более 4 мм. Об этом свидетельствуют близкие величины дейтериевого эксцесса: средневзвешенная величина d_{exc} для всех событий осадков до даты заложения шурфа № 1 составляет 11.5 ‰, для осадков количеством более 4 мм средневзвешенная величина d_{exc} составила 12.6 ‰ (табл. 4). Нижняя часть снежного покрова, видимо, сформирована двумя событиями выпадения осадков – 27 и 30 ноября, когда выпал снег и смешанные осадки с величинами $\delta^{18}\text{O} = -16.5$ и -18.8 ‰ и $d_{\text{exc}} = 17$ и 15.4 ‰

соответственно. О том, что это перераспределение влаги внутри снежного покрова, говорить нельзя, поскольку высокие значения d_{exc} не свидетельствуют в пользу замерзания жидкой воды или испарения.

В январе (шурфы № 2 и 3) значения $\delta^{18}\text{O}$ в верхних горизонтах снежного покрова близко соответствуют значениям $\delta^{18}\text{O}$ в выпадающих осадках (см. табл. 3), при этом предполагается, что с глубины 20–25 см снежная толща сложена снегом, выпадавшим в ноябре–декабре. Сопоставление среднего значения $\delta^{18}\text{O}$ снежной

Таблица 4. Средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ и d_{exc} в атмосферных осадках с начала периода наблюдений до даты опробования в шурфах и соответствующие им средние величины $\delta^{18}\text{O}$ и d_{exc} снежного покрова

Table 4. Weighted average values of $\delta^{18}\text{O}$ and d_{exc} in atmospheric precipitation from the beginning of the observation period to the date of sampling in pits and the corresponding average values of $\delta^{18}\text{O}$ and d_{exc} in snow cover

$\delta^{18}\text{O}$, ‰	d_{exc} , ‰	Дата опробования	№ шурфа	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	d_{exc} , ‰
<i>Осадки</i>			<i>Снежный покров</i>		
–18.9	11.5	25.12.2023	1	–18.6	12.6
–18.9	9.8	18.01.2024	2	–19.1	8.0
–18.4	9.3	31.01.2024	3	–18.3	10.3
–18.3	9.0	14.02.2024	4	–17.1	6.7
–17.4	8.2	28.02.2024	5	–16.8	8.9
–17.4	8.2	12.03.2024	6	–17.0	9.6

толщи для горизонтов 3–6 в шурфе № 2 (глубина 20–45 см) и 3–7 в шурфе № 3 (глубина 25–55 см) и среднего значения $\delta^{18}\text{O}$ в снежной толще шурфа № 1 (представляющей осадки ноября–декабря) показывает явное утяжеление изотопного состава кислорода в снежной толще в течение января. При этом средние значения $\delta^{18}\text{O}$ по всей мощности снежной толщи в январе очень близки к средневзвешенным значениям $\delta^{18}\text{O}$ осадков, выпавших с начала периода наблюдений до дат отбора снега в шурфах, и составили около –18...–19‰ (см. табл. 4).

Изменение изотопного состава свежеснеговывпавшего снега во время оттепели прослежено для поверхностного горизонта снежной толщи в шурфе № 4 (14.02). В результате таяния на поверхности снежного покрова образовалась ледяная корка со значением $\delta^{18}\text{O} = -16.4\text{‰}$ и $d_{\text{exc}} = 0.2\text{‰}$, в то время как поверхностный горизонт снега сформирован из осадков со средневзвешенным значением $\delta^{18}\text{O} = -17.8\text{‰}$ и средним значением $d_{\text{exc}} = 7.7\text{‰}$. Увеличение значения $\delta^{18}\text{O}$ при одновременном снижении величины дейтериевого эксцесса в ледяной корке связаны с процессом таяния–замерзания.

В феврале средние значения $\delta^{18}\text{O}$ по всей толще снежного покрова оказались в целом более высокие (на 0.6–1.2‰), чем средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ сформировавших их осадков (см. табл. 4). В ранее проведенном исследовании снежного покрова на метеоплощадке МГУ в конце февраля 2019 г. было показано, что значения $\delta^{18}\text{O}$ в осадках, отобранных в день их выпадения, в среднем на 1.3–2.5‰ ниже, чем в снежном покрове, представляющем те же осадки, но к моменту максимума снегонакопления (Sokratov et al., 2024).

В снежной толще в январе–феврале в целом изменение первоначальных изотопных характеристик снега выражено слабо. Исключение составляет изотопная запись по снежной толще в шурфе № 4 (14.02.), где и в верхнем, и в придонном горизонтах заметны эффекты таяния–замерзания, выраженные в повышении значений $\delta^{18}\text{O}$ при одновременном уменьшении дейтериевого эксцесса (см. табл. 2). Затем этот эффект был затушеван последующими снегопадами, оседанием снежной толщи и перераспределением пара и жидких плёнок в нижних горизонтах.

Установлено, что диапазон вариаций изотопных значений в снежной толще возрастал от декабря к концу февраля (рис. 4). В конце декабря (шурф № 1) контрастность изотопных значений в снежной толще была незначительной, значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали в диапазоне 2.4‰ – от –19.7 до –17.3‰. В январе–феврале диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ в снежной толще был более выраженным и варьировал от 4‰ в шурфе № 2 (18.01.) до 6–7‰ в шурфах № 3, 4 и 5 (31.01., 14.02. и 28.02.). Более выраженная изотопная стратификация снежной толщи и повышение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ снежного покрова по сравнению с осадками, отмеченное в феврале, обусловлены как выпадением осадков с широким диапазоном изотопных значений, так и процессами старения снежной толщи, формированием ледяных корок, горизонтов разрыхления (Friedman et al., 1991; Taylor et al., 2001). Исследования показывают, что к изотопному “утяжелению” и снижению значений d_{exc} в снежной толще приводят сублимация и миграция водяного пара внутри снежной толщи, а также сублимация поверхностного слоя снега при отсутствии осадков (Sokratov,

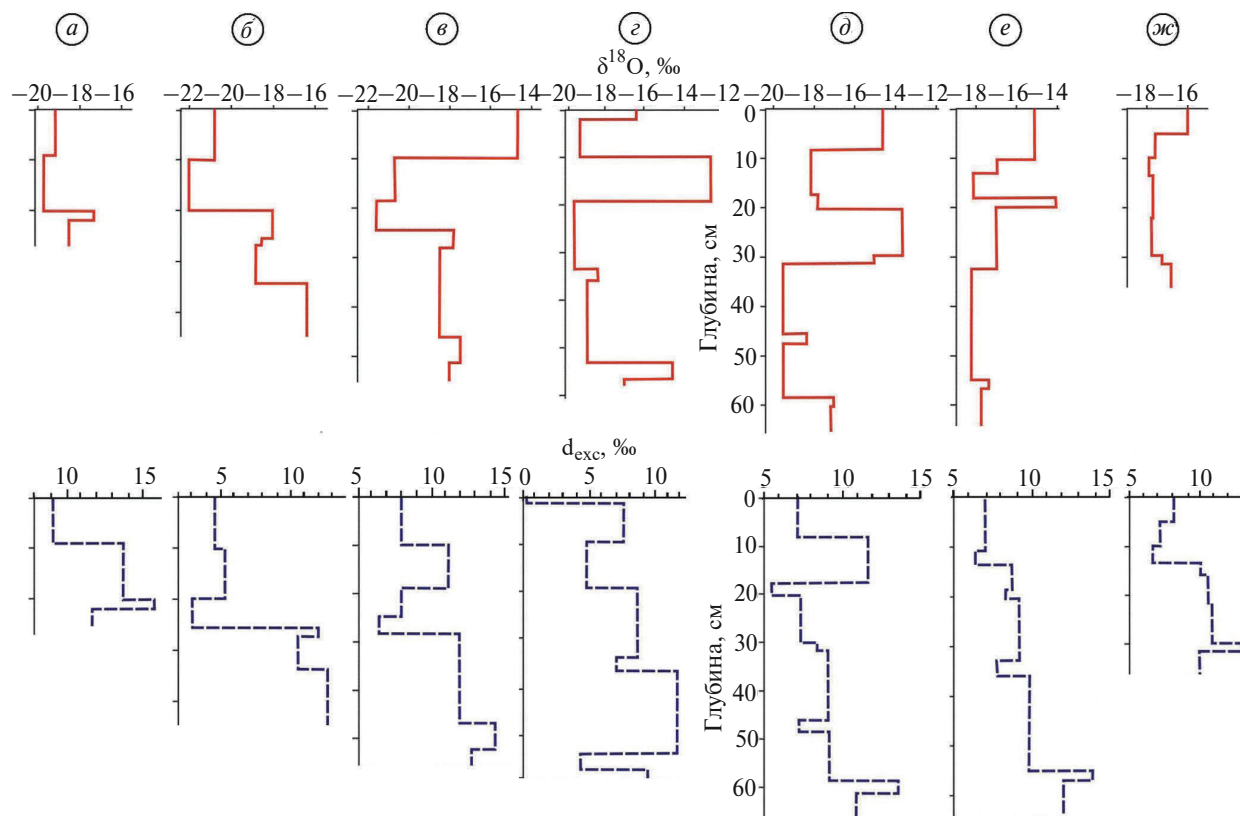


Рис. 4. Распределение по глубине значений $\delta^{18}\text{O}$ и d_{exc} в снежной толще в шурфах 1–7: *a* – шурф 1; *б* – шурф 2; *в* – шурф 3; *г* – шурф 4; *д* – шурф 5; *е* – шурф 6; *ж* – шурф 7

Fig. 4. Vertical profiles of $\delta^{18}\text{O}$ and d_{exc} values in the snow cover in pits 1–7: *a* – pit 1; *б* – pit 2; *в* – pit 3; *г* – pit 4; *д* – pit 5; *е* – pit 6; *ж* – pit 7

Golubev, 2009; Hughes et al., 2021; Langman et al., 2022; Stuart et al., 2023).

В марте в снежном покрове отмечено снижение изотопной контрастности. В исследованном нами снежном покрове значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от -18.2 до -14.2 ‰ в середине марта, а в конце марта, при активном снеготаянии, отмечалось снижение диапазона значений $\delta^{18}\text{O}$ по вертикали до 2‰ – от -17.9 до -16 ‰ (см. рис. 4, *ж*).

В шурфе № 6 в середине марта (12.03) можно было проследить изменение изотопного сигнала всех выпавших ранее осадков, так как новых не выпадало с 25.03. Если условно разделить снежную толщу по глубине на три части, то нижние два горизонта (глубина 55–63 см, среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -17.6$ ‰), скорее всего, представляют осадки начала зимы (ноябрь–декабрь), средние горизонты снежной толщи (глубина 20–55 см, среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -17.7$ ‰) – осадки января и верхние горизонты снежной толщи (глубина 0–20 см, среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -16$ ‰) – осадки февраля. Для нижнего горизонта снежной

толщи отмечено повышение значений $\delta^{18}\text{O}$ снега относительно значений $\delta^{18}\text{O}$ в осадках ноября–декабря (более чем на 2‰), в то время как для верхней части снежной толщи в марте – снижение значений $\delta^{18}\text{O}$ по сравнению со средневзвешенным значением $\delta^{18}\text{O}$ в осадках, выпадавших в феврале (-14.8 ‰).

Значения дейтериевого эксцесса в снежном покрове были довольно высокими с декабря до середины марта, средние значения d_{exc} варьировали от 6.7 до 12.6‰, что согласуется с высокими значениями d_{exc} в осадках в этот период (средневзвешенные значения варьируют от 8.2 до 11.5‰, см. табл. 4). В придонной части снежного покрова значения d_{exc} оставались высокими на протяжении всего периода существования снежного покрова и варьировали от 9 до 15‰ (см. рис. 4), что может говорить о сохранности сигнала ранних зимних осадков, характеризовавшихся высокими значениями d_{exc} .

Наиболее интригующий эффект, установленный при сопоставлении изотопных параметров

выпадающих осадков и снежной толщи, — это увеличение d_{exc} в снежной толще по сравнению с выпадающими осадками. С конца декабря до середины февраля средняя величина d_{exc} всего снежного покрова менялась от 12.5‰ (шурф 1) до 6.4‰ (шурф 4), что объясняется не только поступлением жидких осадков с низкими значениями d_{exc} , но и старением снежного покрова и формированием ледяных корок. К концу февраля — середине марта значения d_{exc} увеличились до 8.9‰ (шурф 5) и 9.5‰ (шурф 6), что может быть связано с процессом конденсации водяного пара на снежных и ледяных кристаллах.

В целом, при рассмотрении средних значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ осадков и сформированного ими снежного покрова в течение зимнего периода 2023–2024 гг. (23.11.2023–12.03.2024) отмечено, что для снежного покрова в конце периода снегонакопления (12 марта) средние значения $\delta^{18}\text{O} = -17\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -126\text{‰}$, $d_{\text{exc}} = 9.5\text{‰}$. При этом средневзвешенные по количеству значения всех выпавших осадков составили: $\delta^{18}\text{O} = -17.4\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -131\text{‰}$, $d_{\text{exc}} = 8.3\text{‰}$. Это говорит о том, что изотопные параметры снежного покрова близко соответствовали изотопным параметрам выпавших осадков за весь период залегания снежного покрова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аккумуляция снежного покрова в Москве в районе главного здания МГУ им. М.В. Ломоносова в зимний период 2023–2024 гг. началась в конце ноября 2023 г., а окончательный сход снежного покрова отмечен в начале апреля 2024 г. Мощность снежной толщи возрастала с конца декабря (30 см) до конца февраля (67 см).

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ снежного покрова находятся внутри диапазона значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для осадков, уравнения соотношения $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ в снежном покрове и осадках характеризуются очень близкими параметрами. Для верхнего горизонта снежного покрова и осадков, выпадающих в виде снега, была выявлена выраженная корреляция изотопных значений на протяжении декабря–февраля.

В феврале отмечена общая тенденция увеличения значений $\delta^{18}\text{O}$ снега на 1.2–0.6‰ по сравнению с осадками, выпадавшими в декабре–январе. Также отмечено снижение значений дейтериевого эксцесса в снежной толще. Предположительно это связано с процессами, происходившими в снежной толще, — формированием

ледяных корок и горизонтов разрыхления в нижних частях снежного покрова. Однако эти признаки затухают к началу марта, вероятно, процессами перераспределения жидкой воды и последующего её замерзания на поверхности кристаллов, а также конденсации водяного пара внутри и на поверхности снежного покрова.

Показано, что в течение зимнего периода 2023–2024 гг. в Москве изотопные параметры снежного покрова, формирующегося в условиях большого количества осадков, низких температур воздуха, редких и коротких оттепелей, хорошо соответствуют средневзвешенным изотопным параметрам всех атмосферных осадков, выпавших за период наблюдений. Высокие значения дейтериевого эксцесса в нижних горизонтах снежного покрова сохранялись в течение всего периода залегания, что может говорить о сохранности сигнала ранних зимних осадков, характеризовавшихся высокими значениями d_{exc} . Вероятно, во многом это обусловлено значительной толщиной снежного покрова, когда частичное таяние приводило к формированию множества льдистых горизонтов, но исключало потерю талой воды.

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’” (Мегаполис).

Acknowledgments. This research project was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Изоскейпы и палеоизотермы среднеянварской температуры воздуха в голоцене на севере Западной Сибири (по данным изотопно-кислородного состава повторно-жильных льдов) // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2024. Т. 79. № 3. С. 78–88.
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.7>
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Д.Ю., Ерёмкина И.Д., Блудушкина Л.Б. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ и содержание водорастворимых солей в атмосферных осадках Москвы

- в 2014–2016 гг. // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2021. Т. 2. С. 35–43.
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Д.Ю., Васильчук А.К., Еремина И.Д., Чижова Ю.Н.* Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в атмосферных осадках Москвы в 2017–2019 гг. // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2024. Т. 79. № 1. С. 114–124.
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.9>
- Ala-aho P., Tetzlaff D., McNamara J.P., Laudon H., Korras 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>
- 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>
- Friedman I., Benson C., Gleason J.* Isotopic changes during snow metamorphism // *Stable Isotope Geochemistry: A tribute to Samuel Epstein* / Eds.: H.P. Taylor Jr., J.R. O’Neil, I.R. Kaplan, The Geochemical Society. Special Publication. 1991. № 3. P. 211–221.
- Frolov D.M., Seliverstov Yu.G., Koshurnikov A.V., Gagarin V.E., Nikolaeva E.S.* Snow accumulation specifics in Moscow in winter 2023/24 // *BIO Web of Conferences*. 2024. № 93. P. 04010.
<https://doi.org/10.1051/bioconf/20249304010>
- Hughes A.G., Wahl S., Jones T.R., Zuhr A., Hörhold M., White J.W.C., Steen-Larsen H.C.* The role of sublimation as a driver of climate signals in the water isotope content of surface snow: Laboratory and field experimental results // *The Cryosphere*. 2021. № 15. P. 4949–4974.
<https://doi.org/10.5194/tc-15-4949-2021>
- Langman J.B., Martin J., Gaddy E., Boll J., Behrens D.* Snowpack aging, water isotope evolution, and runoff isotope signals, Palouse Range, Idaho, USA // *Hydrology*. 2022. V. 9. № 94.
<https://doi.org/10.3390/hydrology9060094>
- 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>
- Papina T., Eirikh A., Noskova T.* Factors influencing changes of the initial stable water isotopes composition in the seasonal snowpack of the south of Western Siberia, Russia // *Applied Sciences*. 2022. № 12. 625 p. <https://doi.org/10.3390/app12020625>
- Rücker A., Boss S., Kirchner J.W., von Freyberg J.* Monitoring snowpack outflow volumes and their isotopic composition to better understand streamflow generation during rain-on-snow events // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019. № 23. P. 2983–3005.
<https://doi.org/10.5194/hess-23-2983-2019>
- Sokratov S.A., Golubev V.N.* Snow isotopic content change by sublimation // *Journ. of Glaciology*. 2009. V. 55. № 193. P. 823–828.
- Sokratov S.A., Komarov A.Y., Vasil’chuk Y.K., Budantseva N.A., Vasil’chuk D.Yu., Seliverstov Yu.G., Grebennikov P.B., Frolov D.M.* Spatial-temporal variability of the $\delta^{18}\text{O}$ values and the snow cover structure on the territory of the Meteorological Observatory of the Moscow State University // *Water Resources*. 2024. V. 51. № S1. P. S89–S99.
<https://doi.org/10.1134/S0097807824701367>
- Stuart R.H., Faber A.-K., Wahl S., Hörhold M., Kipfstuhl S., Vasskog K., Behrens M., Zuhr A.M., Steen-Larsen H.C.* Exploring the role of snow metamorphism on the isotopic composition of the surface snow at EastGRIP // *The Cryosphere*. 2023. V. 17. P. 1185–1204.
<https://doi.org/10.5194/tc-17-1185-2023>
- Taylor S., Feng X., Kirchner J.W., Osterhuber R., Klau 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>
- Unnikrishna P.V., McDonnell J.J., Kendall C.* Isotope variations in a Sierra Nevada snowpack and their relation to meltwater // *Journ. of Hydrology*. 2002. № 260. P. 38–57.

Citation: *Budantseva N.A., Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Ju.N., Vakhovskaya Z.S., Vasil'chuk A.C.* Comparison of the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of snowfall and snow cover in Moscow in the winter of 2023/24. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (4): 643–657. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525040095.

Comparison of the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of snowfall and snow cover in Moscow in the winter of 2023/24

© 2025 N. A. Budantseva^{a,#}, Yu. K. Vasil'chuk^a,
Yu. N. Chizhova^b, Z. S. Vakhovskaya^a, A. C. Vasil'chuk^a

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^bInstitute of Geography RAS, Moscow, Russia

[#]e-mail: nadin.budanceva@mail.ru

Received April 14, 2025; revised July 22, 2025; accepted September 25, 2025

The aim of the study was to estimate the agreement between the isotope composition of snow cover and precipitation in Moscow during the winter season of 2023/24 characterized by a particularly deep snow cover. We sampled selected layers in snow cover on the campus of the Lomonosov Moscow State University (MSU). All precipitation falling from late November 2023 to late February 2024 at the Moscow State University weather station was sampled. Stable oxygen and hydrogen isotope ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) composition was analyzed in snow and precipitation samples, and the deuterium excess (d_{exc}) has been calculated. It has been found that equations of $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$ ratio in precipitation and snow cover are similar. In February, the snow column showed an expansion of the range of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values, as well as a general trend of increasing of $\delta^{18}\text{O}$ values by 1.2–0.6‰ and a decrease in d_{exc} values compared with December–January precipitation. This is most likely due to the aging processes of the snow cover, such as the formation of ice crusts and horizons of loose snow in the lower layers of the snow thickness. In March, the isotopic contrast of the snow column was less pronounced, and during the period of active snowmelt in late March, the range of variations in $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values was minimal. It has been shown that, in general, during the winter period of 2023/24 in Moscow, the isotopic characteristics of the snow cover were in good agreement with the weighted average isotopic data for all precipitation fallen during the observational period. That happened mostly due to the conditions of the winter period (predominance of snow precipitation, rare short thaws). Under these conditions partial melting resulted in the formation of ice crusts in the snow cover, but prevented the loss of meltwater.

Keywords: snow cover, winter precipitation, oxygen isotopes, hydrogen isotopes, deuterium excess

REFERENCES

- Budantseva N.A., Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C.* Isoscapes and paleoisotherms of the Holocene mean January air temperature on the northwestern Siberia (based on stable oxygen isotope composition of ice wedges). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. Moscow University Bull. Series 5: Geography. 2024, 79 (3): 78–88
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.7> [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk J.Yu., Eremina I.D., Bludushkina L.B.* Variations of the $\delta^{18}\text{O}$ values and water-soluble salts in precipitation in Moscow during 2014 to 2016. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. Moscow University Bull. Series 5: Geography. 2021, 2: 35–43. [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk J.Yu., Vasil'chuk A.C., Eremina I.D., Chizhova Yu.N.* Variations of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values of precipitation in Moscow from 2017 to 2019. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. Moscow University Bull. Series 5: Geography*. 2024, 79 (1): 114–124.
<https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.9> [In Russian].
- Ala-aho P., Tetzlaff D., McNamara J.P., Laudon H., Korimos 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>
- Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964, 16 (4): 436–468.
<https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>

- Friedman I., Benson C., Gleason J.* Isotopic changes during snow metamorphism. *Stable Isotope Geochemistry: A tribute to Samuel Epstein / Eds.: H.P. Taylor Jr., J.R. O'Neil, I.R. Kaplan.* The Geochemical Society. Special Publication. 1991, 3: 211–221.
- Frolov D.M., Seliverstov Yu.G., Koshurnikov A.V., Gagarin V.E., Nikolaeva E.S.* Snow accumulation specifics in Moscow in winter 2023/24. *BIO Web of Conferences.* 2024, 93: 04010. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249304010>
- Hughes A.G., Wahl S., Jones T.R., Zuhr A., Hörhold M., White J.W.C., Steen-Larsen H.C.* The role of sublimation as a driver of climate signals in the water isotope content of surface snow: Laboratory and field experimental results. *The Cryosphere.* 2021, 15: 4949–4974. <https://doi.org/10.5194/tc-15-4949-2021>
- Langman J.B., Martin J., Gaddy E., Boll J., Behrens D.* Snowpack aging, water isotope evolution, and runoff isotope signals, Palouse Range, Idaho, USA. *Hydrology.* 2022: 9 (94). <https://doi.org/10.3390/hydrology9060094>
- 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>
- Papina T., Eirikh A., Noskova T.* Factors influencing changes of the initial stable water isotopes composition in the seasonal snowpack of the south of Western Siberia, Russia. *Applied Sciences.* 2022, 12: 625. <https://doi.org/10.3390/app12020625>
- Rücker A., Boss S., Kirchner J.W., von Freyberg J.* Monitoring snowpack outflow volumes and their isotopic composition to better understand streamflow generation during rain-on-snow events. *Hydrology and Earth System Sciences.* 2019, 23: 2983–3005. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2983-2019>
- Sokratov S.A., Golubev V.N.* Snow isotopic content change by sublimation // *Journ. of Glaciology.* 2009, 55 (193): 823–828.
- Sokratov S.A., Komarov A.Y., Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk D.Yu., Seliverstov Yu.G., Grebennikov P.B., Frolov D.M.* Spatial-temporal variability of the $\delta^{18}\text{O}$ values and the snow cover structure on the territory of the Meteorological Observatory of the Moscow State University Water Resources. 2024, 51 (S1): S89–S99. <https://doi.org/10.1134/S0097807824701367>
- Stuart R.H., Faber A.-K., Wahl S., Hörhold M., Kipfstuhl S., Vasskog K., Behrens M., Zuhr A.M., Steen-Larsen H.C.* Exploring the role of snow metamorphism on the isotopic composition of the surface snow at EastGRI P. *The Cryosphere.* 2023, 17: 1185–1204. <https://doi.org/10.5194/tc-17-1185-2023>
- 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>
- Unnikrishna P.V., McDonnell J.J., Kendall C.* Isotope variations in a Sierra Nevada snowpack and their relation to meltwater. *Journ. of Hydrology.* 2002, 260: 38–57.