

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ

УДК 556.362:550.42:551.345

DOI: 10.15372/KZ20220402

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ
АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
В ЯКУТСКЕ (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)

А.А. Галанин, М.Р. Павлова, А.Н. Васильева, Г.И. Шапошников, Н.В. Торговкин

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; agalanin@gmail.com, nigaer@yandex.ru, vasilievaanhela230894@mail.ru, gregory_shaposhnikov@list.ru, nick1805torg@gmail.com

На шести площадках вдоль 25-километрового профиля от г. Якутска исследован изотопный (^{18}O , D) и химический состав атмосферных осадков (1–2 мм слой снега на поверхности снежного покрова и кристаллическая изморозь), выпавших в декабре 2020–январе 2021 г. в период экстремально низких температур (от -47 до -52 °C) в условиях антициклональной погоды и плотных ледяных туманов. Пробы с поверхности снежного покрова характеризуются наиболее легкими составами ($\delta^{18}\text{O} = -41.04 \pm 5.11$ ‰, $\delta\text{D} = -326.43 \pm 34.16$ ‰, $d_{\text{exc}} = 1.91 \pm 7.72$ ‰) и заметно истощены по дейтерию. От окраин к центру Якутска установлено значительное утяжеление составов (на 10 ‰ по $\delta^{18}\text{O}$, на 80 ‰ по δD), снижение дейтериевого эксцесса от +10 до -6 ‰, 4-кратное увеличение минерализации из-за примесей карбоната кальция. Для проб кристаллической изморозы установлены изотопные составы ($\delta^{18}\text{O} = -30.89 \pm 5.62$ ‰, $\delta\text{D} = -285.88 \pm 12.82$ ‰, $d_{\text{exc}} = -28.79 \pm 32.53$ ‰), которые не характерны для атмосферных осадков, льдов и вод региона. Они испытывают наибольшие вариации по величине $\delta^{18}\text{O}$ – от -24 ‰ в г. Якутске до -37 ‰ на расстоянии 25 км от его центра; величина δD изменяется от -255.4 до -285.9 ‰, d_{exc} возрастает от -80 до $+11.5$ ‰. Изотопные и химические составы исследованных осадков указывают на значительную долю техногенного водяного пара, поступающего в атмосферу при сжигании углеводородного топлива. На основе модели гауссовской смеси и дейтериевого эксцесса исследованных проб установлено, что в кристаллической изморозии доля техногенной воды вблизи теплогенерирующих станций составляет 26–32 ‰, в центральной части города 13–18 ‰, на окраинах 6.5–8.8 ‰; в поверхностном слое снежного покрова составляет 5–6 ‰ в центральной части Якутска и уменьшается к окраинам до 1 ‰ и менее.

Ключевые слова: стабильные изотопы воды, атмосферные осадки, снег, кристаллическая изморозь, ледяной туман, низкие температуры, техногенные источники осадков, фракционирование, Якутск, Восточная Сибирь.

ORIGIN AND ISOTOPIC COMPOSITION OF PRECIPITATION AT EXTREMELY LOW TEMPERATURES
IN YAKUTSK (EASTERN SIBERIA)

A.A. Galanin, M.R. Pavlova, A.N. Vasil'eva, G.I. Shaposhnikov, N.V. Torgovkin

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Merzloynaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; agalanin@gmail.com

Isotopic (^{18}O , D) and chemical composition of atmospheric precipitation (1–2-cm snow layer on the surface of the snow cover and crystalline hoar), that fell in December 2020–January 2021 at anticyclonic weather, extremely low temperatures from -47 to -52 °C and dense ice fogs, has been studied at 6 sites along a 25-kilometer profile from Yakutsk. Samples from the surface of the snow cover are characterized by the lightest compositions ($\delta^{18}\text{O} = -41.04 \pm 5.11$ ‰, $\delta\text{D} = -326.43 \pm 34.16$ ‰, $d_{\text{exc}} = 1.91 \pm 7.72$ ‰) and are noticeably depleted with deuterium. From the outskirts to the center of Yakutsk, a significant weighting of the compositions has been established (by 10 ‰ in $\delta^{18}\text{O}$, by 80 ‰ in δD), a decrease in d_{exc} (from +10 to -6 ‰), and a 4-fold increase in mineralization due to impurities of calcium carbonate. The isotopic compositions ($\delta^{18}\text{O} = -30.89 \pm 5.62$, $\delta\text{D} = -285.88 \pm 12.82$, $d_{\text{exc}} = -28.79 \pm 32.53$) have been established for samples of crystalline rime, which are not typical for any atmospheric sediments, waters and ice of the region. They experience the greatest variations in $\delta^{18}\text{O}$ (from -24 ‰ in Yakutsk to -37 ‰ at a distance of 25 km from its center); the value of δD varies from -255.4 to -285.9 ‰, d_{exc} increases from -80 to $+11.5$ ‰. The isotopic and chemical compositions of the investigated sediments indicate a significant proportion of technogenic water vapor entering the atmosphere during the combustion of hydrocarbon fuel. Based on the model of the Gaussian mixture and deuterium excess of the studied samples, it has been found that in crystalline hoar, the maximum share of technogenic moisture reaches 26–32 ‰ near heat-generating stations, in the central part of the city – 13–18 ‰, and on the outskirts – 6.5–8.8 ‰; on the outskirts – 6.5–8.8 ‰; in the surface layer of the snow cover – 5–6 ‰ in the central part of Yakutsk and decreases to the outskirts to 1 ‰ or less.

Key words: stable isotopes of water, atmospheric precipitation, snow, crystalline hoar, ice fog, low temperatures, technogenic sources of precipitation, fractionation, Yakutsk, Eastern Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

В холодных регионах с резко континентальным климатом понижение температуры ниже $-35...-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ нередко сопровождается специфическими атмосферными осадками: морозной дымкой, ледяным (морозным) туманом и кристаллической изморозью. Эти виды осадков формируются при ясной антициклональной погоде путем конденсации остатков водяного пара из крайне обезвоженной и переохлажденной атмосферы.

Ледяные туманы и кристаллическая изморозь постоянно наблюдаются в Антарктиде [Екайкин, 2016], континентальных районах Аляски, Канады [Bowling et al., 1968], на севере Европы [Gallagher, 2020], в Сибири [Климат..., 1982], северном Китае [Xing et al., 2020] и других регионах (рис. 1). Они оказывают сильное негативное влияние на все виды наземного и воздушного транспорта, затрудняют видимость, приводят к обледенению воздушных судов и линий электропередач.

Принято считать, что главными причинами возникновения ледяных туманов являются адвекция холодных воздушных масс и связанные с ней вертикальные температурные инверсии, способствующие глубокому выхолаживанию нижних слоев тропосферы [Bowling et al., 1968; Gallagher, 2020]. Однако наиболее плотные ледяные туманы и мощная изморозь чаще возникают в пределах крупных населенных пунктов и являются результатом сжигания различных видов топлива [Климат..., 1982; Bowling et al., 1968; Xing et al., 2020]. Выбросы пыли, сажи и аэрозолей горения дополнительно способствуют формированию ледяных туманов, вызывая конденсацию переохлажденной атмосферной воды даже при низких значениях относительной влажности [Gallagher, 2020; Xing et al., 2020].



Рис. 1. Ледяной туман и кристаллическая изморозь на ветках деревьев, регулярно наблюдающиеся с декабря по февраль в Якутске и окрестностях при температурах $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже.

В Солт-Лейк-Сити (США) в наиболее холодные периоды года доля атмосферного водяного пара от сжигаемого углеводородного топлива (ВСУТ) достигает 10–13% [Gorski et al., 2015; Fiorella et al., 2018]. На территории мегаполиса Сиань (северо-восточный Китай) средняя доля ВСУТ в формировании зимних осадков составляет 6.2%, достигая в отдельные периоды 16.2% [Xing et al., 2020]. В абсолютном выражении в атмосферу Сианя ежегодно выбрасывается около 10 млн т ВСУТ, из которых 52.5% приходится на природный газ, 45.8% на каменный уголь и 1.7% на остальные виды углеводородов. Выбрасываемый ВСУТ имеет следующие изотопные характеристики [Xing et al., 2020]: природный газ – $\delta^{18}\text{O} = +13.2 \pm 0.7\text{ }_{\text{‰}}$, $\delta\text{D} = -160.8 \pm 2.8\text{ }_{\text{‰}}$, $d_{\text{exc}} = -266.5 \pm 3.8\text{ }_{\text{‰}}$; каменный уголь – $\delta^{18}\text{O} = +4.2 \pm 1.3\text{ }_{\text{‰}}$, $\delta\text{D} = -102.2 \pm 16.3\text{ }_{\text{‰}}$, $d_{\text{exc}} = -135.5 \pm 26.4\text{ }_{\text{‰}}$. При сжигании разных марок бензина и дизельного топлива формируются наиболее истощенные дейтерием составы ($-270\text{ }_{\text{‰}} > d_{\text{exc}} > -330\text{ }_{\text{‰}}$). Близкие величины ВСУТ ($-308\text{ }_{\text{‰}} < d_{\text{exc}} < -125\text{ }_{\text{‰}}$) получены для территории Солт-Лейк-Сити [Gorski et al., 2015; Fiorella et al., 2018].

Экзотический состав ВСУТ обусловлен как исходным изотопным составом углеводородного топлива, так и особенностями его окисления при сжигании. Водяной пар образуется в ходе реакции атмосферного кислорода, обогащенного атомами ^{18}O относительно морской воды на $\delta^{18}\text{O} = +23.9\text{ }_{\text{‰}}$ [Fiorella et al., 2018], и водорода топлива, значительно обедненного дейтерием вследствие биохимических реакций при синтезе метана [Sessions et al., 1999; Whiticar, 1999]. Поэтому образующийся в ходе горения водяной пар характеризуется необычно низким дейтериевым эксцессом [Gorski et al., 2015; Fiorella et al., 2018; Xing et al., 2020] по сравнению с естественной атмосферной влагой.

Неестественный, крайне обедненный дейтерием изотопный состав ВСУТ резко отличается от естественного состава приземного слоя тропосферы, в котором среднее значение d_{exc} вблизи точки росы составляет примерно $+10\text{ }_{\text{‰}}$ [Dansgaard, 1964]. В верхних слоях тропосферы данная величина достигает $+200\text{ }_{\text{‰}}$, а в наиболее испарительных фракционированных поверхностных водах снижается до $-60\text{ }_{\text{‰}}$ [Fiorella et al., 2018]. Изотопные характеристики ВСУТ и формирующихся из него атмосферных осадков позволяют не только идентифицировать источник их происхождения, но и приближенно оценить объемы сжигаемого углеводородного топлива для конкретных территорий [Xing et al., 2020].

В Якутске понижение температуры ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ежегодно сопровождается застойными явлениями в атмосфере, появлением специфического ледяного тумана и кристаллической изморозь

(см. рис. 1). Плотность тумана и скорость роста изморози возрастают с понижением температуры. Так, в центральной части Якутска при -45°C видимость не превышает 1 км, а при -50°C она не более 100 м. Период непрерывных ледяных туманов в Якутске, как правило, длится около 2 месяцев с начала декабря по конец января, за исключением непродолжительных оттепелей, когда температура повышается до $-40\dots-35^{\circ}\text{C}$. На протяжении периода зимних туманов на поверхности снежного покрова, крышах домов, ветвях деревьев и кустарников практически непрерывно оседают мелкие кристаллы льда размером 1 мм и менее, имеющие

вид иголок, пластинок и шестилучевых снежинок. В этот период ветки деревьев, электрические провода и другие тонкие предметы инкрустируются корками мелкокристаллической изморози толщиной 4–5 см. В конце зимнего периода при повышении температуры до -35°C и выше происходит усиление ветра, морозные туманы не проявляются, а корки изморози на деревьях и других предметах постепенно исчезают в результате сублимации и осыпания.

К настоящему времени получены данные об изотопном составе (^{18}O и D) ВСУТ и установлена его существенная роль в динамике атмосферы над

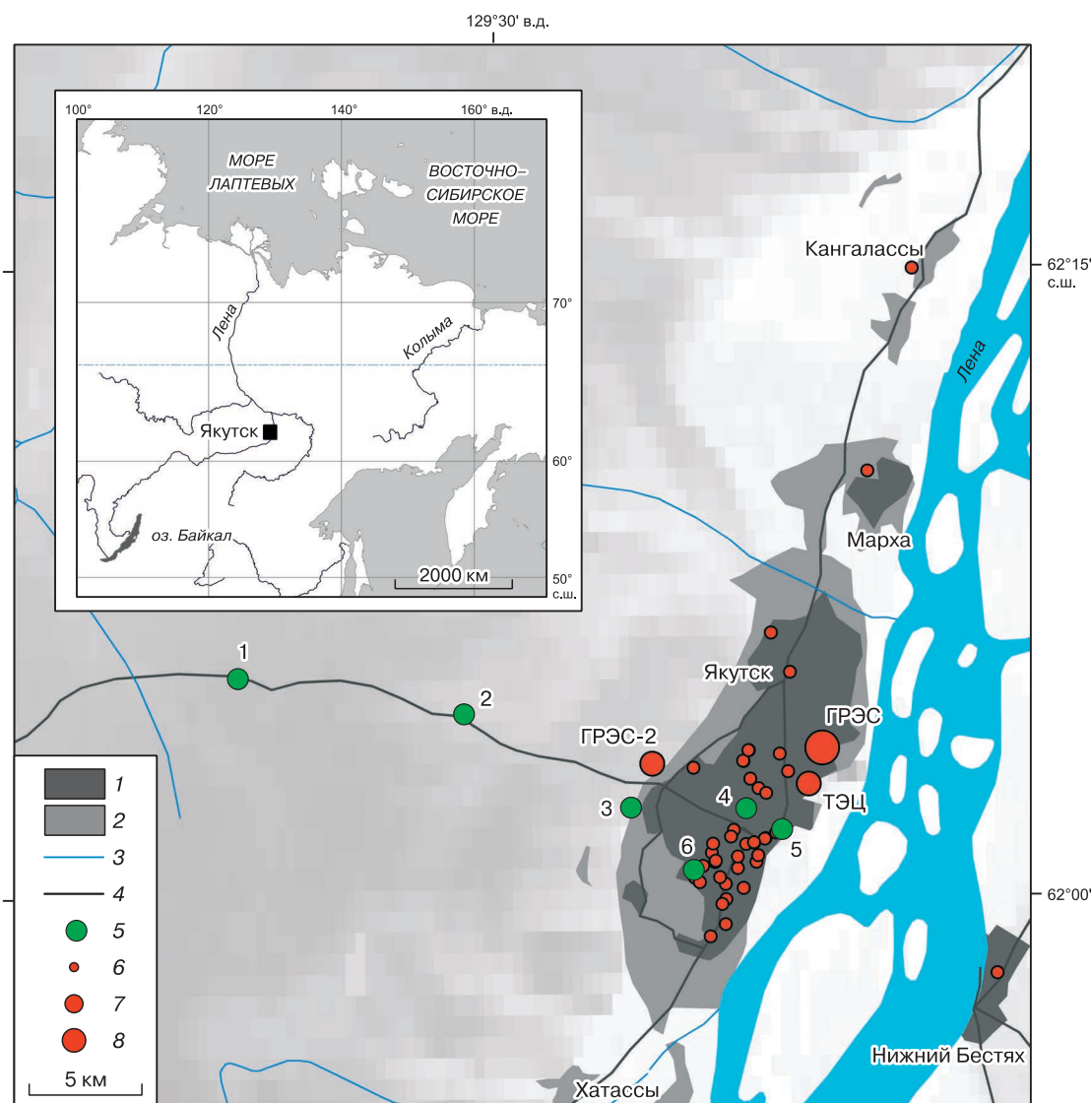


Рис. 2. Схема точек опробования (1–6) снежного покрова и инея в окрестностях Якутска 14.12.2020 г. и 19.01.2021 г.

1 – наиболее плотная городская застройка многоэтажными зданиями; 2 – одноэтажная застройка; 3 – реки; 4 – главные автодороги; 5 – точки опробования и их номера; 6–8 – наиболее крупные источники техногенных атмосферных выбросов в Якутске: 6 – небольшие теплогенерирующие станции (10–50 Гкал/ч); 7 – мощные источники тепла (469 и 497 Гкал/ч); 8 – самый крупный источник тепловыделения (661 Гкал/ч).

крупными мегаполисами [Beesley, Moritz, 1999; Gorski et al., 2015; Fiorella et al., 2018; Xing et al., 2020]. Вместе с тем данных об изотопном составе атмосферных осадков, формирующихся в условиях экстремально низких температур, пока нет.

Данные об изотопном составе атмосферных осадков наиболее холодного времени года в Якутске будут полезны для реконструкции палеотемператур на основе анализа изотопного состава полигонально-жильных льдов.

Цель настоящей статьи – характеристика особенностей формирования изотопных составов (^{18}O и D) атмосферных осадков, выпадающих в Якутске при экстремально низких температурах. Фактическим материалом является состав снежного покрова и кристаллической изморози на шести площадках вдоль 25-километрового профиля от Якутска в декабре 2020–январе 2021 г. (рис. 2).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ метеорологических условий на период отбора проб выполнен на основе данных метеостанции Якутск [Погода и климат, 2004–2021]. Для анализа использованы такие показатели, как среднесуточная температура (T), скорость ветра, давление, суточное количество осадков, види-

мость, показания толщины кристаллической изморози на гололедном станке. На рис. 3 приведены временные ряды динамики основных метеорологических показателей с 01.12.2020 по 28.02.2021 г. с указанием дат опробования.

Отбор проб атмосферных осадков выполнен в шести точках наблюдений (т.н.) с естественной растительностью вдоль трансекта протяженностью от 25-го километра Вилюйского тракта до центра г. Якутска (см. рис. 2). Отбор выполнялся 14.12.2020 г. (т.н. 6) и 19.01.2021 г. (т.н. 1–5) во время пиковых понижений температуры воздуха до -48.0 и -50.9 °C (см. рис. 3). В каждой точке наблюдений отбиралось не менее 4 проб осадков, включая 2 пробы изморози с ветвей деревьев на высоте 1.0–2.0 м от земной поверхности, 1 проба осадков с поверхности снежного покрова в интервале 0–2 см, 1 осредненная проба на всю мощность снежного запаса в интервале 2–20 см. Средняя мощность снежного покрова на момент отбора на всех площадках была приблизительно одинаковой (25–30 см).

Точка наблюдений 1 ($62^{\circ}05'$ с.ш., $129^{\circ}16'$ в.д.; $h = 254$ м) расположена на 25-м километре Вилюйского тракта на расстоянии 250 м от автодороги, на краю березовой рощи и луга. Метеоусловия в

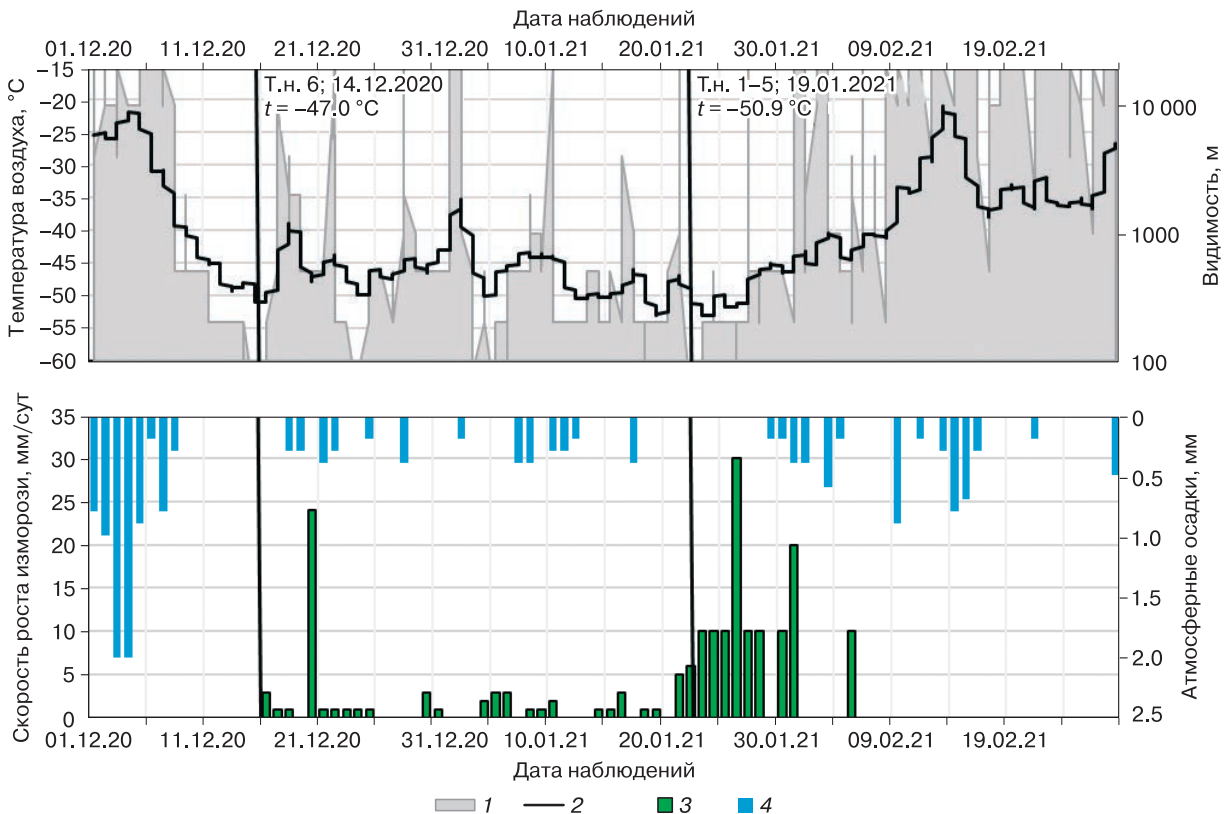


Рис. 3. Метеоусловия в г. Якутске с 01.12.2020 по 28.02.2021 г. по данным [Погода и климат, 2004–2021]. 1 – видимость; 2 – температура воздуха; 3 – скорость роста кристаллической изморози; 4 – снежные осадки. Т.н. – точка наблюдения.

момент опробования: $T = -52$ °С, штиль, туман, максимальная видимость 250–300 м.

Точка наблюдений 2 ($62^{\circ}04'$ с.ш., $129^{\circ}28'$ в.д.; $h = 219$ м) расположена на 10-м километре Виллойского тракта на расстоянии 200 м от автодороги, в пределах разреженной березовой рощи. Метеоусловия в момент опробования: $T = -52$ °С, штиль, туман, максимальная видимость 150–200 м.

Точка наблюдений 3 ($62^{\circ}02'$ с.ш., $129^{\circ}36'$ в.д.; $h = 158$ м) расположена на окраине Якутска под склоном горы Чочур Муран на расстоянии 200 м от автодороги, на краю березовой рощи и лугостепи. Метеоусловия аналогичны т.н. 1.

Точка наблюдений 4 ($62^{\circ}02'$ с.ш., $129^{\circ}42'$ в.д.; $h = 120$ м) расположена вблизи центра Якутска в пределах березовой рощи. Метеоусловия в момент опробования: $T = -52$ °С, штиль, туман, максимальная видимость 100–150 м.

Точка наблюдений 5 ($62^{\circ}01'$ с.ш., $129^{\circ}44'$ в.д.; $h = 98$ м) расположена в центре Якутска на территории палисадника с березовыми деревьями. Метеоусловия в момент опробования аналогичны т.н. 4.

Точка наблюдений 6 ($62^{\circ}01'$ с.ш., $129^{\circ}40'$ в.д.; $h = 98$ м) расположена в 20 м от здания Института мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН и в 100 м от котельной ИМЗ СО РАН. Отбор проб выполнен в пределах березовой рощи. Метеоусловия в момент опробования: $T = -48$ °С, штиль, туман, максимальная видимость 150–200 м.

Отобранные пробы упаковывали в герметичные пластиковые пакеты объемом 10 мл и доставляли в лабораторию ИМЗ СО РАН. Далее пробы расплавляли при комнатной температуре, переливали в пластиковые кюветы и хранили в холодильнике при температуре $+5$ °С. Анализ проб выполнен в течение 1–2 недель после отбора.

Таблица 1. Изотопные составы проб мелкокристаллической изморози и снежного покрова в окрестностях Якутска в декабре 2020–январе 2021 г.

Точка набл.-проба	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	1σ , ‰	δD , ‰	1σ , ‰	d_{exc}	Характер пробы
<i>Площадка 1</i>						
1-1	-36.60	0.02	-285.89	0.04	6.90	Изморозь на ветках березы на высоте 1–2 м
1-2	-35.85	0.02	-286.55	0.04	0.21	То же
1-3	-45.04	0.01	-349.92	0.08	10.36	Поверхность снежного покрова (0–2 см)
1-4	-30.31	0.02	-224.22	0.03	18.26	Осредненный снежный запас (2–20 см)
<i>Площадка 2</i>						
2-1	-37.42	0.02	-289.46	0.01	9.93	Изморозь на ветках березы на высоте 1–2 м
2-2	-37.99	0.00	-292.34	0.06	11.57	То же
2-3	-46.45	0.02	-361.72	0.10	9.86	Поверхность снежного покрова (0–2 см)
2-4	-31.05	0.02	-230.51	0.04	17.88	Осредненный снежный запас (2–20 см)
<i>Площадка 3</i>						
3-1	-35.35	0.01	-290.04	0.01	-7.27	Изморозь на ветках ивы на высоте 1–2 м
3-2	-33.72	0.02	-284.13	0.05	-14.36	То же
3-3	-45.01	0.01	-354.02	0.01	6.06	Поверхность снежного покрова (0–2 см)
3-4	-29.36	0.01	-222.16	0.04	12.75	Осредненный снежный запас (2–20 см)
<i>Площадка 4</i>						
4-1	-30.77	0.01	-273.97	0.07	-27.84	Изморозь на ветках березы на высоте 1–2 м
4-2	-30.18	0.01	-271.73	0.02	-30.27	То же
4-3	-38.37	0.01	-313.55	0.01	-6.55	Поверхность снежного покрова (0–2 см)
4-4	-28.03	0.01	-213.66	0.02	10.61	Осредненный снежный запас (2–20 см)
<i>Площадка 5</i>						
5-1	-31.71	0.01	-279.85	0.03	-26.20	Изморозь на ветках березы на высоте 1–2 м
5-2	-29.30	0.01	-271.83	0.02	-37.44	То же
5-3	-37.37	0.01	-304.05	0.05	-5.06	Поверхность снежного покрова (0–2 см)
5-4	-28.65	0.01	-219.13	0.05	10.06	Осредненный снежный запас (2–20 см)
<i>Площадка 6 (100 м от ТЭЦ ИМЗ СО РАН)</i>						
6-1	-22.95	0.01	-261.52	0.11	-77.93	Изморозь на металлической ограде на высоте 1.5 м
6-2	-24.22	0.04	-260.74	0.10	-66.94	Изморозь на ветках березы на высоте 1–2 м
6-3	-22.13	0.01	-258.78	0.10	-81.70	То же
6-4	-24.21	0.01	-255.41	0.05	-61.73	Изморозь на крыше легкового автомобиля на высоте 1.5 м
6-5	-34.02	0.01	-275.36	0.10	-3.21	Поверхность снежного покрова (0–2 см)
6-6	-29.30	0.01	-221.26	0.02	13.14	Осредненный снежный запас (2–20 см)

Химический состав кристаллической изморози и снежного покрова в окрестностях Якутска в январе 2021 г.

Точка набл- проба	pH	Eh	Содержание основных катионов и анионов компонентов, мг/л										Жест- кость, мг-экв/л	Минера- лизация, г/дм ³	Химический тип (по А.В. Шукреву)	Содержание микрокомпонентов, мг/л				
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻				St ²⁺	Li ⁺	Ba ²⁺	HPO ₄ ⁻	F ⁻
1-2	7.28	556	4.08	2.11	0.4	0.10	1.90	24.95	2.30	0.69	0.03	4.00	0.380	0.0417	HCO ₃ 76/Ca 38 Mg 32	0.659	0.000	0.000	0.235	0.249
1-4	7.70	543	0.76	0.46	0.1	0.0	0.1	4.49	0.40	0.17	0.01	0.70	0.075	0.0073	HCO ₃ 74/Ca 43 Mg 43	0.000	0.016	0.000	0.049	0.040
2-2	7.17	545	4.53	0.46	0.2	0.05	0.5	13.97	1.8	0.52	0.01	1.00	0.264	0.0233	HCO ₃ 76/Ca 73	0.000	0.094	0.000	0.025	0.120
2-4	7.38	544	1.53	0.64	0.1	0.1	0.2	6.99	0.4	0.21	0.01	0.70	0.128	0.0109	HCO ₃ 74/Ca 50 Mg 35	0.000	0.025	0.000	0.026	0.017
3-2	6.64	517	18.12	3.67	0.4	2.00	5.00	79.85	8.00	3.46	0.10	8.00	1.206	0.1294	HCO ₃ 75/Ca 55	0.731	0.000	0.061	0.022	0.022
3-4	7.33	485	5.13	1.01	0.4	0.2	0.9	19.96	0.70	0.35	0.01	1.30	0.339	0.0306	HCO ₃ 88/Ca 60	0.283	0.000	0.000	0.015	0.297
4-2	7.20	443	18.12	1.83	0.5	1.5	5.7	74.86	9.0	1.73	0.15	5.00	1.055	0.1202	HCO ₃ 79/Ca 59	1.399	0.000	0.059	0.271	0.049
4-4	7.63	433	12.08	0.92	0.4	0.65	2.80	45.91	2.50	1.21	0.20	2.10	0.678	0.0699	HCO ₃ 85/Ca 65	0.450	0.000	0.000	0.042	0.655
5-2	7.81	393	27.18	0.92	1.3	4.6	7.5	105.3	13.40	2.25	0.20	8.00	1.432	0.1725	HCO ₃ 78/Ca 63	0.567	0.000	0.072	0.042	1.200
5-4	7.73	403	12.84	1.01	2.2	1.80	3.40	48.91	3.30	2.94	0.20	2.50	0.723	0.0804	HCO ₃ 80/Ca 57	0.532	0.000	0.033	0.435	0.435

Для химического анализа снега и изморози пробы отбирали в пластиковые пакеты, расплавили при комнатной температуре и упаковывали в пластиковые бутылки объемом 0.5 л, подготовленные согласно [ГОСТ 31861-2012, 2013].

Учитывая возможность влияния техногенных источников водяного пара на формирование изотопных составов отобранных проб, авторами было выполнено картографирование основных теплогенерирующих станций Якутска (см. рис. 2). Среди них наиболее крупными являются Якутская ТЭЦ (497 Гкал/ч), ГРЭС (661 Гкал/ч) и ГРЭС-2 (469 Гкал/ч). Кроме того, функционируют еще 45 котельных мощностью от 10 до 50 Гкал/ч. Все теплогенерирующие станции г. Якутска работают на газообразном либо жидком топливе и выходят на полную мощность в период наиболее низких зимних температур.

Анализ состава стабильных изотопов (¹⁸O и D) выполнялся в российско-германской изотопной лаборатории ИМЗ СО РАН (г. Якутск) методом лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на приборно-измерительном автоматизированном комплексе PICARRO L2140-i с технологией резонаторной кольцевой спектроскопии CRDS (Cavity Ring Down Spectroscopy). В ходе анализа применялись внутренние стандарты воды (MilliQ A-45, HDW-1, MXW, HGL-1, SEZ-2) и протокол AWI-Potsdam лаборатории стабильных изотопов Института им. А. Вегенера (г. Потсдам, Германия). Воспроизводимость измерений δ¹⁸O и δD составила ±0.04 и ±0.1 ‰ соответственно (1σ – стандартное отклонение, n = 6, длительность 1 измерения 100 с).

Калибровка выполнялась не менее 3 раз за один стандартный запуск кассеты из 33 жидких образцов. По окончании анализа величины 1σ для δ¹⁸O и δD корректировались по комбинированному стандартному отклонению на основе методики [van Geldern, Barth, 2012], что позволяет достичь воспроизводимости более 0.01 ‰. Всего было проанализировано 26 проб (табл. 1).

Анализ катионно-анионного состава и других показателей выполнялся стандартными методами в аккредитованной лаборатории ИМЗ СО РАН. Всего было проанализировано 10 проб (табл. 2).

Изотопный и химический составы осадков при экстремально низких температурах

Изотопный состав (δD и δ¹⁸O) всей совокупности отобранных проб (26 шт.) характеризуется большим разнообразием как в пределах одной точки наблюдений в зависимости от типа пробы (см. табл. 1), так и вдоль исследованного профиля. На рис. 4, а вся выборка четко разделяется на две линейно вытянутые совокупности точек. Первая образована пробами осредненного снеготалопа

(с глубины 2–20 см) и описывается уравнением $\delta D = 8.38 \cdot \delta^{18}O + 24.98$ ($R^2 = 0.99$, $n = 12$), коэффициенты которого близки к уравнению $\delta D = 8.17 \cdot \delta^{18}O + 21.9$ ($R^2 = 0.99$, $n = 8$), полученному Т.С. Папиной с соавт. [2017] для зимних осадков 2014 г. в Якутске. В целом данные уравнения указывают на расположение этих составов вблизи главной линии метеорных вод (ГЛМВ), что свидетельствует об их природном (атмосферном) происхождении в условиях кинетического (релеевского) фракционирования. Вторая линейная совокупность образована пробами кристаллической изморози и поверхностного снега (с глубины 0–2 см) и экстраполируется уравнением $\delta D = 2.22 \cdot \delta^{18}O - 206.9$ ($R^2 = 0.96$, $n = 14$), коэффициенты которого указывают на неестественный источник атмосферной влаги, крайне истощенный дейтерием. На рис. 4, б все изученные составы и аппроксимирующие их регрессии отображены раздельно в зависимости от типа проб, что позволяет оценить роль каждого в изотопной структуре всей совокупности.

Пробы осредненного снежного запаса (2–20 см) по отношению к остальным пробам характеризуются наиболее тяжелым составом ($\delta^{18}O = -29.45 \pm 1.1$ ‰, $\delta D = -221.8 \pm 5.57$ ‰, $d_{exc} = 13.78 \pm 3.52$ ‰). Их положение вблизи локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) (см. рис. 4, б) и положительный дейтериевый эксцесс (близкий к 10) указывают на конденсацию в условиях равновесного (релеевского) процесса [Dansgaard, 1964].

Вместе с тем само уравнение линейной регрессии $\delta D = 4.98 \cdot \delta^{18}O - 75.3$ ($R^2 = 0.92$, $n = 6$) этих составов существенно отличается от уравнений ГЛМВ и ЛЛМВ для Якутска значительно меньшим угловым коэффициентом, что обычно связывают с процессами испарительного фракционирования [Папина и др., 2017; Галанин и др., 2019; Dansgaard, 1964].

Согласно зависимости [Dansgaard, 1964]

$$\delta^{18}O = 0.68t^\circ - 13.6, -30^\circ C < t^\circ < 0^\circ C, \quad (1)$$

осадки данного состава выпадали при температурах от -21 до $-25^\circ C$.

Согласно зависимости [Папина и др., 2017]

$$\delta^{18}O = 0.59t^\circ - 19.7 \quad (R^2 = 0.88), \quad (2)$$

осадки исследованного состава выпадали при температурах от -14 до $-19^\circ C$.

В целом уравнения (1), (2) дают сходящиеся результаты и указывают, что исследованные осадки выпадали в самом начале зимы (октябрь–ноябрь) 2020 г. Действительно, основное количество снежных осадков в Якутске выпадало в октябре и ноябре при температурах $-12...-25^\circ C$ (см. рис. 3), в то время как в декабре 2020 г. и январе 2021 г. при понижении температуры до $-45...-50^\circ C$ количество осадков было крайне незначительным [Погода и климат, 2004–2021]. Вместо снежных осадков на протяжении декабря–января в условиях антициклональной штилевой погоды наблюдались плотные ледяные туманы и активный рост

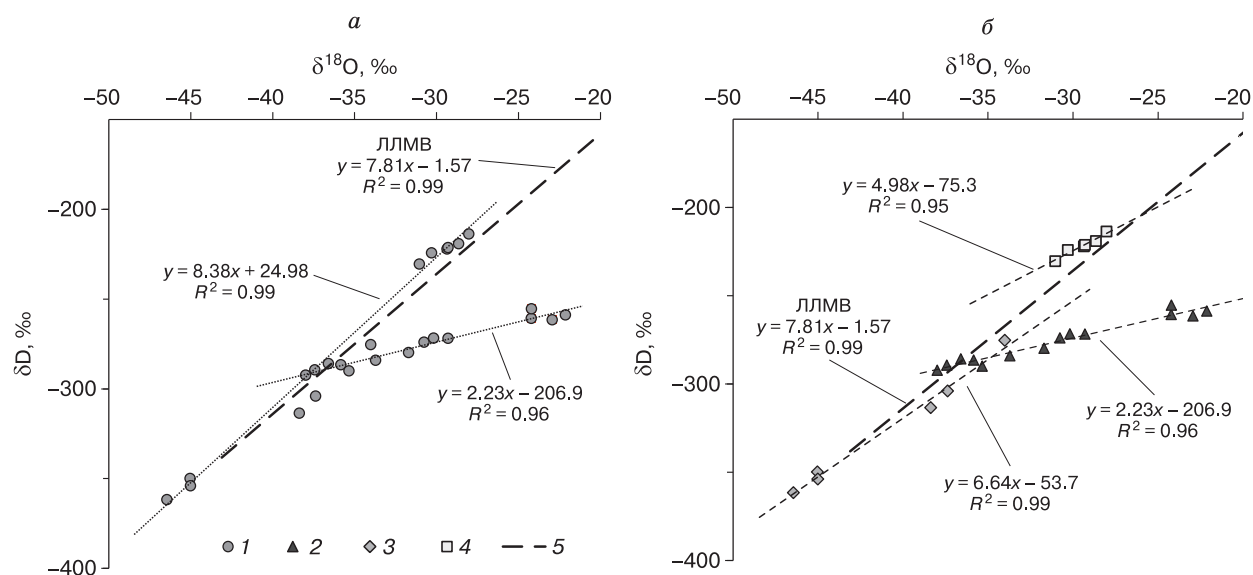


Рис. 4. Соотношение $\delta^{18}O/\delta D$ в пробах снежного покрова и кристаллической изморози в период экстремальных отрицательных температур зимы 2020/21 г. в Якутске и окрестностях.

a – вся выборка проб; *б* – разные группы проб; 1 – кристаллическая изморозь; 2 – снежный покров (включая пробы с поверхности); 3 – поверхность снежного покрова (0–2 см); 4 – годовые осадки в Якутске по данным GNIP [Kurita et al., 2004]; 5 – водяной пар, выбрасываемый в атмосферу при сжигании углеводородного топлива [Xing et al., 2020]. ЛЛМВ – локальная линия метеорных вод.

кристаллической изморози (см. рис. 3). Сумма наблюдаемых атмосферных осадков за полтора самых холодных месяца не превысила 7–10 мм.

При соотношении $\delta^{18}\text{O}/d_{\text{exc}}$ пробы снега аппроксимируются уравнением $d_{\text{exc}} = -3.02 \cdot \delta^{18}\text{O} - 75.3$ ($R^2 = 0.88$, $n = 6$) (рис. 5). Повышение дейтериевого эксцесса в наиболее низкотемпературных дериватах атмосферных осадков связано с более быстрым снижением скорости фракционирования молекул H_2^{18}O по сравнению с HD^{16}O [Dansgaard, 1964].

Отрицательные корреляции d_{exc} с величинами $\delta^{18}\text{O}$ и D также характерны для осадков, формирующихся в условиях равновесного охлаждения (замерзания) ограниченного объема водяного пара в полужакрытых и закрытых системах, например, в пещерах с затрудненным воздухообменом [Галанин, 2020; Lacelle et al., 2009]. К сожалению, вопросы корреляции дейтериевого эксцесса с величинами δD и $\delta^{18}\text{O}$ остаются слабоосвещенными в научной литературе.

Пробы с поверхности снежного покрова (0–2 см) характеризуются наиболее легким составом ($\delta^{18}\text{O} = -41.04 \pm 5.11 \text{ ‰}$, $\delta\text{D} = -326.43 \pm 34.16 \text{ ‰}$, $d_{\text{exc}} = 1.91 \pm 7.72 \text{ ‰}$), закономерно утяжеляющимся вдоль профиля опробования к центру Якутска (см. рис. 4, 6, табл. 1). Если принять во внимание сходные погодные условия и температуру воздуха ($-45 \dots -53 \text{ }^\circ\text{C}$), наблюдавшиеся в Якутске и его окрестностях в декабре 2020–январе 2021 г., то наиболее тяжелый состав ($\delta^{18}\text{O} = -35 \dots -38 \text{ ‰}$, $d_{\text{exc}} = -6 \dots -3 \text{ ‰}$) формировался в центральной части города (т.н. 4–6), а наиболее легкий ($\delta^{18}\text{O} = -45 \dots -46 \text{ ‰}$, $d_{\text{exc}} = 6 \text{--} 10 \text{ ‰}$) – за его пределами (т.н. 1–3).

В пересчете на температуры по уравнениям (1), (2) в Якутске (т.н. 4–6) осадки верхнего слоя снежного покрова конденсировались в интервале температур $-29 \dots -34 \text{ }^\circ\text{C}$, а за его пределами (т.н. 1–3) – при $-45 \dots -56 \text{ }^\circ\text{C}$. В действительности, как показывают наблюдения на метеостанции Якутск (см. рис. 3), а также измерения температу-

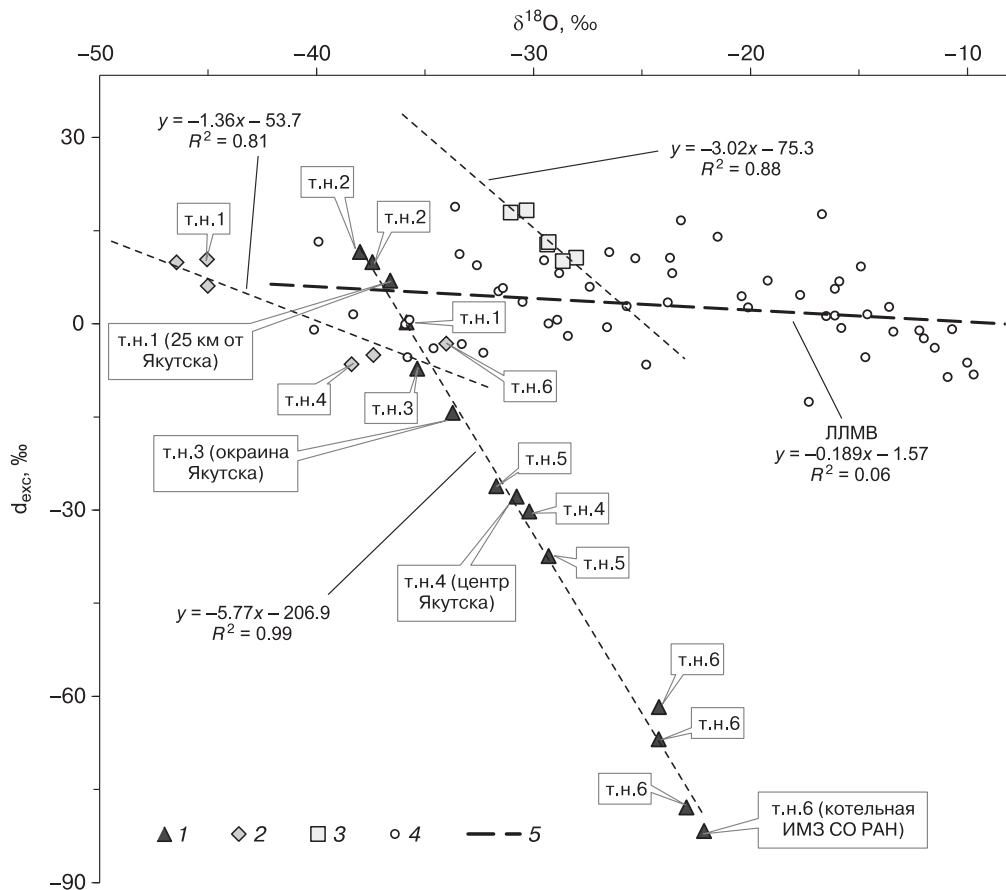


Рис. 5. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ и d_{exc} в атмосферных осадках в период экстремальных отрицательных температур зимы 2020/21 г. в Якутске и окрестностях.

1 – кристаллическая изморозь на деревьях на высоте 1.0–1.5 м выше снежного покрова; 2 – поверхность снежного покрова (0–2 см); 3 – осредненный снежный покров с глубины 2–20 см; 4 – атмосферные осадки в Якутске по данным GNIP [Kurita et al., 2004]; 5 – локальная линия метеорных вод (все сезоны года) для г. Якутска на основании данных GNIP. 1–6 – номера точек наблюдений (т.н.).

ры воздуха в момент опробования, погодные условия для всех точек отбора проб были примерно одинаковыми.

Пробы, отобранные с поверхности снежного покрова в 15–20 км от Якутска, лежат вблизи ЛЛМВ и определяются положительными значениями $d_{\text{exc}} \approx +10 \text{ ‰}$, характерными для равновесной (релеевской) конденсации атмосферного пара при низких температурах (см. рис. 5). Наоборот, пробы, отобранные в Якутске (т.н. 4–6), характеризуются отрицательными величинами d_{exc} от -3 до -6 ‰ , что весьма нехарактерно для свежевыпавших природных зимних осадков и указывает на иной источник их происхождения.

Влияние техногенного источника на состав осадков в Якутске в декабре 2020–январе 2021 г. подчеркивается характером вариации изотопного состава по исследованному профилю (см. рис. 4), которую невозможно объяснить процессами равновесного кинетического (релеевского) фракционирования, а также результатом частичной сублимации с поверхности снежного покрова. В последнем случае сходство метеоусловий вдоль профиля наблюдений привело бы к одинаковому проявлению сублимации и связанных с ней эффектов фракционирования на всех точках опробования.

Дейтериевый эксцесс проб с поверхности снежного покрова также проявляет значимую отрицательную корреляцию с величинами δD и $\delta^{18}\text{O}$ (см. рис. 5). Регрессия имеет вид $d_{\text{exc}} = -1.36 \cdot \delta^{18}\text{O} - 53.7$ ($R^2 = 0.81, n = 6$).

Пробы кристаллической изморози характеризуются наиболее экзотическим составом ($\delta^{18}\text{O} = -30.89 \pm 5.62 \text{ ‰}$, $\delta D = -285.88 \pm 12.82 \text{ ‰}$, $d_{\text{exc}} = -28.79 \pm 32.53 \text{ ‰}$), совершенно не наблюдавшимся авторами ранее в природных атмосферных осадках, а также во всех известных типах наземных и подземных льдов региона [Галанин и др., 2019]. Вдоль профиля (см. рис. 6) данный состав испытывает наиболее сильную вариацию $\delta^{18}\text{O}$, более чем в 1.5 раза – от -24 ‰ в т.н. 6 и до -37 ‰ в т.н. 1. На этом же интервале величины δD проявляют менее значительные вариации (в 1.12 раза), снижаясь от -255.4 ‰ (т.н. 6) до -285.9 ‰ (т.н. 1).

Непропорциональное снижение величин $\delta^{18}\text{O}$ и δD вдоль профиля четко отражается в величине d_{exc} . Наиболее низкие значения от -66.9 до -81.8 ‰ (т.н. 6) и от -26.2 до -37.4 ‰ (т.н. 5) характерны для территории Якутска. По мере удаления от центра города d_{exc} закономерно возрастает и достигает положительных значений $6.9 \dots 11.5 \text{ ‰}$ в пробах изморози, отобранных на расстоянии 15 и 25 км от центра города.

Уравнение регрессии состава кристаллической изморози $\delta D = 2.23 \cdot \delta^{18}\text{O} - 206.9$ ($R^2 = 0.96, n = 14$) характеризуется крайне низким угловым коэффициентом, свидетельствующим об интенсивном испарительном фракционировании источ-

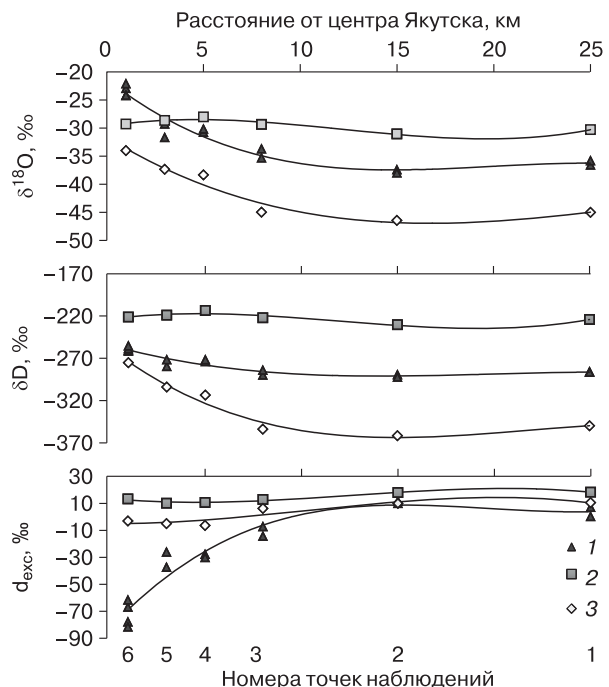


Рис. 6. Вариация изотопного состава кристаллической изморози и снежного покрова вдоль профиля точек наблюдений.

1 – кристаллическая изморозь; 2 – поверхность снежного покрова (0–2 см); 3 – осредненный (2–20 см) снеговой запас на конец января 2021 г.

ника влаги. Из природных льдов наиболее близкий угловой коэффициент (2.7) установлен для состава натечных льдов в холодных пещерах Канады [Lacelle et al., 2009].

Экзотический изотопный состав кристаллической изморози и положение точек наблюдений относительно теплогенерирующих станций Якутска (см. рис. 2) позволяют сделать вывод, что именно последние являются основным источником влаги. Так, наиболее контрастная изотопная аномалия в кристаллической изморози установлена в т.н. 6, расположенной на территории ИМЗ СО РАН в 100 м от ближайшей котельной. В отобранной здесь 14.12.2020 г. пробе изморози зафиксирован наиболее тяжелый ($\delta^{18}\text{O} = -22.1 \text{ ‰}$, $\delta D = -258.8 \text{ ‰}$) и крайне фракционированный состав с экстремальными значениями $d_{\text{exc}} = -81.7 \text{ ‰}$. Подобный состав не типичен для земной атмосферы и, вероятно, формируется при сжигании углеводородного топлива при температуре значительно выше 100 °C .

В пересчете по уравнению (1) отложение кристаллической изморози на разных участках профиля происходило при существенно разной температуре. Так, наиболее тяжелый состав формировался в центре Якутска и особенно вблизи

котельной ИМЗ СО РАН (т.н. 6) при температуре $-15...-18$ °С. По мере удаления от центра города температура конденсации закономерно снижалась, а наиболее легкий состав сформировался на расстоянии 15–25 км от Якутска (т.н. 1) при температуре $-35...-42$ °С.

По сравнению с пробами снежного покрова состав кристаллической изморози с ветвей деревьев характеризуется высокой отрицательной корреляцией дейтериевого эксцесса с величиной $\delta^{18}\text{O}$, описываемой уравнением $d_{\text{exc}} = -5.77 \cdot \delta^{18}\text{O} - 206.9$ ($R^2 = 0.99, n = 14$) (см. рис. 5).

Химический состав проб. Согласно классификации С.Л. Шварцева [1996], по величине общей минерализации все отобранные пробы изморози и снежного покрова относятся к ультрапресным ($0.0073-0.1725$ г/дм³), по показателю общей жесткости они являются мягкими ($0.075-1.432$ мг-экв/л). Для проб, отобранных в пригородной зоне (т.н. 1, 2), характерен гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав, а для городских проб (т.н. 3–5) – гидрокарбонатно-кальциевый состав согласно классификации А.В. Щукарева [Шварцев, 1996].

Пробы изморози и снежного покрова характеризуются преимущественно нейтральной и слабощелочной реакцией ($6.64 < \text{pH} < 7.81$). Последняя типична для проб из центра города, что обусловлено загрязнением золой городских котельных и выхлопами автомобильного транспорта. Окислительно-восстановительный потенциал ($400 < E_h < 550$) в целом указывает на окислительные условия, в пределах города его значения минимальны, а за пределами постепенно увеличиваются как в изморози, так и в снежном покрове.

В пределах всех точек наблюдений минерализация кристаллической изморози всегда в 2–4 раза выше, чем снежного покрова, что также указывает на сильную генетическую связь первой с техногенным источником. По мере удаления от центра

города концентрации большинства катионов и анионов уменьшаются в изморози и снежном покрове в 4–20 раз (см. табл. 2, рис. 7). Это также указывает на техногенное происхождение минеральных загрязнителей, содержания которых в Якутске превышают санитарные нормы в среднем в 1.8 раза [Макаров, Торговкин, 2020].

Среди всех катионов максимальные концентрации характерны для Ca^{2+} , которые в расплавах кристаллической изморози в Якутске достигают 27.18 мг/л. Среди анионов преобладает HCO_3^- , что свидетельствует о повышенной эмиссии углекислого газа в пределах города в результате сжигания топлива. Увеличение концентрации хлорид-иона в городской черте также, вероятно, обусловлено антропогенным фактором, поскольку хлорид натрия используется для очистки автодорог от снега и льда. Концентрации всех соединений азота повышаются в направлении к центру Якутска в 3–4 раза в снежном покрове и 8–10 раз в кристаллической изморози. Их источниками являются главным образом продукты окисления атмосферного азота при сжигании углеводородного топлива теплогенерирующими станциями.

Среди микрокомпонентов в пробах кристаллической изморози и снежного покрова за пределами Якутска присутствует небольшое количество лития ($0.016-0.094$ мг/л), фтора ($0.017-0.249$ мг/л) и фосфора ($0.026-0.049$ мг/л). В городских пробах снежного покрова существенно возрастает содержание фосфора ($0.297-0.655$ мг/л) и стронция ($0.283-0.532$ мг/л), а в пробах изморози появляется барий ($0.059-0.072$ мг/л) и резко повышается содержание стронция ($0.567-1.399$ мг/л) и фосфора (1.200 мг/л).

В целом химический состав изморози и снежного покрова Якутска проявляет значительное сходство и обусловлен техногенным загрязнением городской атмосферы выбросами теплогенериру-

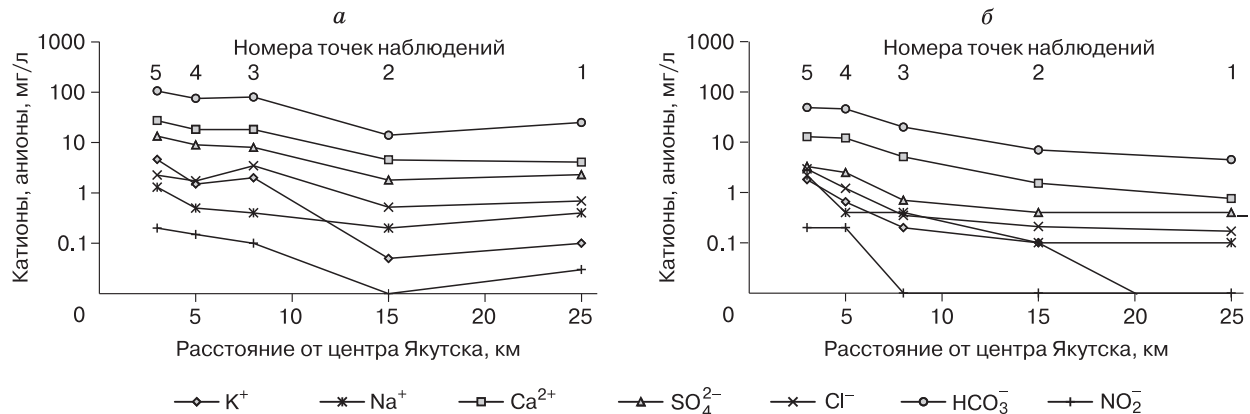


Рис. 7. Вариация основных катионов и анионов в кристаллической изморози (а) и снежном покрове (б) по мере удаления от центра г. Якутска по профилю точек опробования.

ющих станций. Причем максимальные концентрации загрязняющих веществ сосредоточены в кристаллической изморози, которая активно формируется на деревьях и других предметах с декабря по январь включительно. Это связано с тем, что в указанное время все теплогенерирующие станции Якутска выходят на полную мощность и выбрасывают максимальные концентрации загрязнителей – главным образом водяного пара и золы.

Господствующая на протяжении периода наиболее низких температур штилевая погода не способствует рассеянию выбросов теплогенерирующих станций, которые формируют сплошное облако ледяного тумана, покрывающего территорию площадью около 100 км². Максимальная плотность тумана и наиболее низкая видимость характерны для центральной части города. Влияние техногенных источников водяного пара и химических загрязнителей прослеживается в изотопном и химическом составе кристаллической изморози и поверхности снежного покрова на расстоянии 10–15 км от центра Якутска.

Таким образом, на изотопный и химический составы атмосферных осадков холодного времени года определяющее влияние оказывает источник ВСУТ. Наиболее экзотический состав установлен для осадков в центре города и в непосредственной близости от теплостанции ИМЗ СО РАН (т.н. 6). Этот состав проявляет большое сходство с составом ВСУТ, установленным ранее в других регионах [Gorski et al., 2015; Fiorella et al., 2018], и характеризуется очень низкими значениями дейтериевого эксцесса.

Влияние техногенных источников на изотопный состав атмосферных осадков

В настоящее время Якутск является самым крупным и быстро растущим городом, расположенным в пределах крайне холодного климата. В некоторые годы здесь фиксировались экстремальные среднеянварские температуры до –64.4 °С (1891 г.) и максимальные летние температуры +38.4 °С (2011 г.) [Климат..., 1982]. Среднегодовое количество осадков варьирует от 147 мм (2001 г.) до 330 мм (1971 г.). Соотношение зимних и летних осадков примерно 1:6 [Гаврилова, 1962; Климат..., 1982]. Снежный покров обычно устанавливается в первую декаду октября, а исчезает в конце апреля. Средняя мощность снежного покрова не превышает 25–30 см.

В последние десятилетия нарастающие темпы строительства приводят к увеличению количества и мощности теплогенерирующих станций (см. рис. 2), растет число автомобилей и других потребителей углеводородного топлива.

Источники и объемы ВСУТ в г. Якутске. Несмотря на потепление климата, в последние десятилетия в Якутске происходит увеличение интен-

сивности и продолжительности зимних ледяных туманов, а также толщины кристаллической изморози на деревьях, проводах и других предметах. Кроме того, туманы начинают возникать при более высоких, чем –35 °С, температурах воздуха, при которых раньше наблюдалась устойчивая ясная погода. Данные явления напрямую связаны с увеличением объемов сжигаемых углеводородов и полным переходом на природный газ. Так, резкое увеличение плотности и продолжительности ледяных туманов, а также повышение температуры их возникновения произошло в Якутске после запуска в 2017 г. дополнительной крупной установки ГРЭС-2 (см. рис. 2).

Всего на территории Якутска функционируют 3 крупные теплостанции, генерирующие около половины теплоэнергии, и около 40 котельных мощностью 10–50 Гкал/ч каждая. Кроме того, некоторое количество выбросов образуется при отоплении частных домов и эксплуатации автотранспорта. Суммарное генерирование теплоэнергии в Якутске при зимних пиковых нагрузках можно оценить примерно в 2000 Гкал/ч.

В настоящее время все теплогенерирующие установки Якутска переведены на газовое топливо, состоящее преимущественно из метана и выделяющее существенно больше ВСУТ, чем каменный уголь. При сжигании 1 кг этого газа выделяется около 13.3 Мкал тепла, а также 2.21 кг высокотемпературного водяного пара [Кузнецов, 2010]. При мощности 2000 Гкал/ч необходимо каждый час сжигать около 150 т природного газа. При этом в атмосферу выделится за час около $3.3 \cdot 10^5$ кг ВСУТ, за наиболее холодный месяц – порядка $2.4 \cdot 10^8$ кг, а за весь отопительный сезон эта величина может составить $1.0 \cdot 10^9$ кг.

В Якутске в период экстремально низких температур и штилевой погоды выбрасываемый в атмосферу ВСУТ быстро конденсируется, образуя зону рассеяния радиусом около 10 км и площадью 314 км² ($3.14 \cdot 10^8$ м²) с центром в Якутске. Допуская, что за два наиболее холодных месяца в атмосферу Якутска выбрасывается $2.4 \cdot 10^8$ кг ВСУТ, который полностью конденсируется в пределах данной зоны, можно приближенно оценить количество техногенных осадков ($2.4 \cdot 10^8$ кг / $3.14 \cdot 10^8$ м² = 1.53 кг/м² = 1.53 мм). Таким образом, за два наиболее холодных месяца на 1 м² 10-километровой зоны вокруг Якутска приходится 1.53 кг техногенных осадков, что эквивалентно 1.53 мм. Доля ВСУТ в изотопном составе осадков значительно варьирует в зависимости от расстояния от источника выброса. Поэтому вблизи источников ВСУТ будет выпадать в 7–10 раз больше техногенной воды (10–15 мм), а к окраинам города ее количество будет сокращаться до 0.5–1.0 мм. Данное заключение хорошо подкрепляется визуальными наблюдениями за толщиной

кристаллической изморози, которая увеличивается в несколько раз вблизи теплостанций и в центре города по сравнению с окраинами.

В период наиболее низких температур теплогенерирующие станции Якутска выходят на максимальную мощность и выбрасывают максимальное количество ВСУТ. В то же время снижение температуры воздуха приводит к увеличению скорости и сужению зоны конденсации, что вызывает увеличение доли ВСУТ в осадках, выпадающих вблизи источников их выброса.

Приведенные выше оценки ВСУТ в Якутске являются весьма приближенными.

Оценка относительной доли водяного пара от сжигания углеводородного топлива в Якутске на основе дейтериевого эксцесса и модели гауссовской смеси. Высокую долю ВСУТ в атмосферных осадках наиболее холодного периода в Якутске подтверждают расчеты по методике [Xing et al., 2020], основанной на сравнении дейтериевых эксцессов проб и исходного ВСУТ. В основе данного подхода используется модель гауссовской смеси, позволяющая рассчитать долю (X) техногенного источника водяного пара в пробе на основе дейтериевого эксцесса по формуле

$$d_1 = d_2X + d_3(1 - X). \quad (3)$$

Здесь величины d_1 , d_2 , d_3 – дейтериевые эксцессы проб образца, источника ВСУТ и естественного фона. Допуская, что минимальное влияние ВСУТ оказал на изотопный состав осадков в точках 1 и 2, удаленных от Якутска на 15 и 25 км, их осредненный дейтериевый эксцесс был использован в качестве фоновых значений ($d_3 = 10 \text{ ‰}$). Поскольку практически все тепловые станции Якутска используют газообразное топливо, за величину дейтериевого эксцесса ВСУТ был принят дейтериевый эксцесс водяного пара от сжигания природного газа ($d_2 = -266 \text{ ‰}$) [Xing et al., 2020]. Подставляя значения дейтериевого эксцесса исследованных проб (d_1) в уравнение (3) и решая его методом итераций, получаем значения доли ВСУТ в исследованных пробах.

Выполненные оценки показывают, что наиболее высоких значений (26–32 %) доля ВСУТ достигает в пробах кристаллической изморози, отобранных в т.н. 6 на территории ИМЗ СО РАН в 100 м от котельной ($-61.7 \text{ ‰} > d_{\text{exc}} > -80 \text{ ‰}$). В центре Якутска (т.н. 4 и 5) состав кристаллической изморози ($-26.2 \text{ ‰} > d_{\text{exc}} > -37.4 \text{ ‰}$) свидетельствует о доле ВСУТ 13–18 %. В пробах изморози на окраине Якутска (т.н. 3) со значениями $-7.3 \text{ ‰} > d_{\text{exc}} > -14.4 \text{ ‰}$ доля ВСУТ варьирует от 6.5 до 8.8 %. В поверхностном слое снежного покрова доля ВСУТ составляет 5–6 % в центральной части Якутска и уменьшается к окраинам до 1 % и менее.

Дискуссия об источниках и механизмах формирования изотопного состава атмосферных осадков в Якутске в наиболее холодное время года. Первые систематические сведения об изотопном составе атмосферных осадков в Якутске получены в рамках Международного проекта по развитию Сибирской сети наблюдений SNIP (Siberian Network of Isotopes in Precipitation) [Kurita et al., 2004]. В рамках данного проекта в Якутске было проанализировано 43 пробы, из которых лишь несколько характеризуют изотопный состав осадков холодного времени года.

С использованием данных базы SNIP была обоснована ЛЛМВ для Северной Азии, имеющая вид $\delta D = 7.9 \cdot \delta^{18}O + 2.9$ и учитывающая лишь среднемесячные атмосферные осадки объемом более 10 мм [Kurita et al., 2004]. При этом значения, приведенные в базе данных SNIP для 43 проб осадков из Якутска, аппроксимируются уравнением $\delta D = 7.81 \cdot \delta^{18}O - 1.57$ ($R^2 = 0.99$) [Галанин и др., 2019].

По данным [Kurita et al., 2004], нормированный среднегодовой изотопный состав для Якутска характеризуется значениями $\delta^{18}O = -19.31 \text{ ‰}$ и $\delta D = -153.9 \text{ ‰}$, для осадков с декабря по февраль $\delta^{18}O = -33.0 \text{ ‰}$ и $\delta D = -265.8 \text{ ‰}$. Последние плохо коррелируют с результатами настоящей статьи, поскольку осадки декабря 2020 г. и января 2021 г. имеют существенно более легкий состав ($\delta^{18}O = -41.04 \pm 5.11 \text{ ‰}$, $\delta D = -326.43 \pm 34.16 \text{ ‰}$, $d_{\text{exc}} = 1.91 \pm 7.72 \text{ ‰}$). Такое значительное расхождение, возможно, связано с более высокими (на 4–5 °С) средними зимними температурами, зафиксированными для периода с 1996 по 2000 г. [Погода и климат, 2004–2021].

Фракционирование изотопного состава снежного покрова в результате его перекристаллизации (“метаморфизация изотопного состава”). Дальнейшее изучение особенностей изотопного состава снежного покрова по трансекту от Якутска до Магадана продолжено в рамках международной экспедиции TVSSSE (Trans-Verkhoyansk Snow Survey Expedition) в марте 2001 г. [Kurita et al., 2005]. Всего было исследовано 16 вертикальных изотопных профилей. Во всех разрезах снежного покрова вне зависимости от его мощности установлено четыре основных стратиграфических слоя, различающихся по морфологии кристаллов снега: свежеснежный снег, гранулированные кристаллы (фирн), кристаллы глубинной изморози в виде кубков, столбчатые кристаллы глубинной изморози [Kurita et al., 2005].

Во всех разрезах установлена значительная вариация изотопного состава по вертикали (рис. 8). Особенно резко она проявляется в снежном покрове Центрально-Якутской равнины, а также межгорных впадин Верхоянья и Колымско-

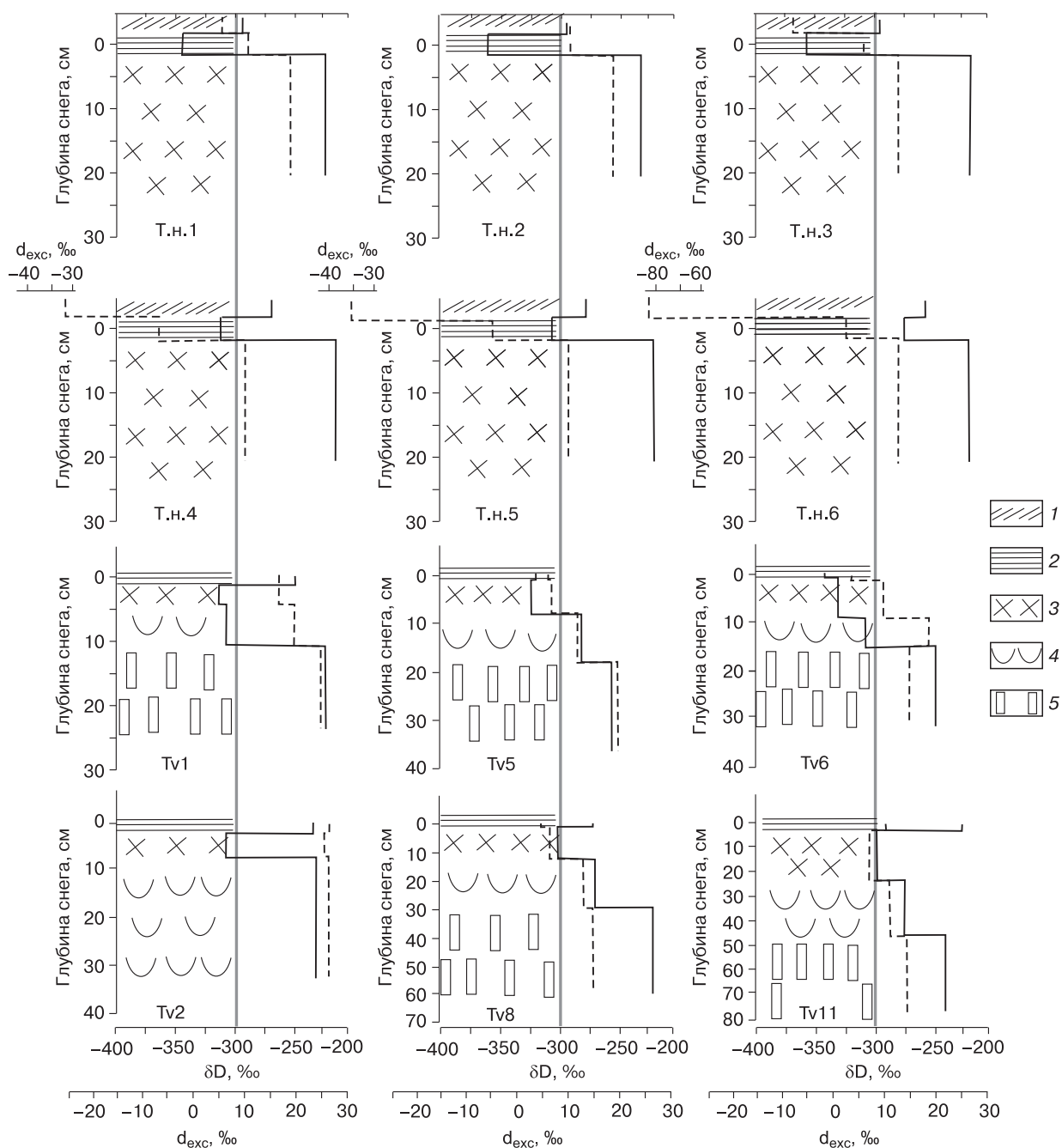


Рис. 8. Вертикальные профили δD (сплошная линия) и d_{exc} (штриховая линия) в разрезах снежного покрова Якутии.

Точки наблюдения: Т.н. 1–6 – Якутск и окрестности в декабре 2020–январе 2021 г. (данные настоящей статьи); Tv1–Tv11 – разрезы снежного покрова в марте 2001 г. по Транс-Верхоянскому профилю TVSSE по данным [Kurita et al., 2005] (обозначения авторов). Тип осадков: 1 – изморозь на ветках деревьев на высоте 1.0–1.5 м от поверхности; 2 – неуплотненный свежий снег; 3 – мелкозернистый снег; 4 – крупные кристаллы глубинной изморози в виде кубков; 5 – крупные столбчатые кристаллы глубинной изморози.

го нагорья, где $\Delta\delta D$ и Δd_{exc} в снежном покрове достигают 100 и 20 ‰ соответственно [Kurita et al., 2005]. Однако в большинстве разрезов изотопически выражены лишь три слоя (см. рис. 8).

Характерной чертой всех изотопных профилей является наиболее тяжелый состав в нижних слоях снежного покрова, составляющих от 50 до 70 % его мощности. Эти же слои характеризуются

наиболее высокими положительными значениями дейтериевого эксцесса (10...25 ‰) [Kurita et al., 2005]. Наиболее легкие составы слагают верхние части всех профилей и не проявляют существенной связи с кристаллическими типами снега. При этом они имеют самый низкий дейтериевый эксцесс (0...10 ‰). Изотопный состав свежего снега в поверхностном слое (1–2 см) в большинстве профилей существенно более тяжелый и имеет невысокое значение d_{exc} .

Аналогичные вертикальные вариации величин δD и d_{exc} характерны для разрезов снежного покрова на площадках т.н. 1–6 в Якутске и его окрестностях в январе 2021 г. (см. рис. 8). Для сравнения на разрезах также отображены пробы кристаллической изморози, отобранные с ветвей деревьев на высоте 1.0–1.5 м выше поверхности снежного покрова. Все разрезы характеризуются более тяжелым составом нижнего слоя (–250...–220 ‰), который имеет наиболее высокий дейтериевый эксцесс (10...20 ‰), снижающийся в направлении к Якутску. Верхний слой снежного покрова по мере удаления от Якутска (т.н. 1–3) характеризуется значительным снижением величины δD до –350...–360 ‰ и одновременным возрастанием дейтериевого эксцесса до +6...+10 ‰. В Якутске величина δD в верхнем слое снежного покрова варьирует от –275 до –313 ‰ и повышается к центру города. В то время как дейтериевый эксцесс существенно снижается и принимает отрицательные значения (–3...–6 ‰).

В слое кристаллической изморози на всех профилях вновь происходит значительное утяжеление состава. Максимальное повышение величины δD на 50–60 ‰ наблюдается за пределами техногенного влияния Якутска в т.н. 1 и 2, при этом d_{exc} практически не меняется. В пределах территории Якутска (т.н. 4–6) в слое кристаллической изморози величины δD возрастают на 10–30 ‰, при этом происходит резкое снижение дейтериевого эксцесса до экстремально низких отрицательных значений (–27...–80 ‰). Наиболее низкие значения d_{exc} имеют пробы, отобранные в центре Якутска (–27...–32 ‰) и около здания ИМЗ СО РАН вблизи теплостанции (–80 ‰). Последнее авторы связывают с влиянием техногенного пара от сжигаемого топлива. За исключением верхнего слоя снежного покрова и кристаллической изморози в т.н. 4–6, остальные изотопные профили проявляют большое сходство со снежным покровом других ультраконтинентальных районов Якутии (см. рис. 8) [Kurita et al., 2005].

Экспериментальные исследования показывают, что в результате значительного температурного градиента между кровлей и подошвой снежного покрова в нем развиваются процессы сублимации и десублимации, что приводит к перекристаллиза-

ции и формированию слоя глубинной изморози. Данные процессы сопровождаются существенным изотопным фракционированием, затрагивающим преимущественно подошву и кровлю, в то время как изотопный состав средней части снежного покрова существенно не изменяется. Суть данного процесса состоит в следующем [Sommerfeld et al., 1991; Hachikubo et al., 2000]. В зимний период происходят возгонка (сублимация) легких молекул H_2O , миграция по порам снежного покрова вверх от более теплой подошвы к его существенно более холодной кровле и кристаллизация (десублимация) этих молекул в приповерхностном слое. И, наоборот, в весенний период кровля снежного покрова нагревается сильнее подошвы, что приводит к обратному процессу переноса легких молекул в нижние слои снежного покрова.

Иными словами, в результате так называемого процесса метаморфизации изотопного состава снежного покрова состав последнего утяжеляется в пределах сублимирующего слоя и, наоборот, под воздействием десублимации состав слоя становится изотопически более легким [Sommerfeld et al., 1991; Hachikubo et al., 2000; Kurita et al., 2005].

Вместе с тем, несмотря на наличие в исследованных разрезах весеннего снежного покрова по профилю TVSSE признаков значительной перекристаллизации, объяснить одновременно тяжелый состав и высокий эксцесс нижних слоев снега результатом “метаморфизации” не представляется возможным [Kurita et al., 2005]. Поскольку в результате кинетического фракционирования и утяжеления состава нижних слоев снега должен уменьшаться их дейтериевый эксцесс. И, наоборот, если легкий изотопный состав верхних слоев снежного покрова связан с постседиментационным обогащением легкими изотопами в результате десублимации, то их дейтериевый эксцесс должен увеличиваться.

Таким образом, вертикальные вариации изотопного состава в весеннем снежном покрове по профилю TVSSE обусловлены не метаморфизацией снежного покрова, а различиями исходного состава снежных осадков начала, середины и конца зимнего периода [Kurita et al., 2005]. Наиболее изотопически тяжелый снег с высоким дейтериевым эксцессом выпадал в начале зимнего периода при относительно высоких температурах воздуха из неистощенных влагонесущих масс. Наиболее легкий снег связан с наиболее холодным периодом зимы, при этом его низкий дейтериевый эксцесс обусловлен большой истощенностью воздушной массы. Наконец, более изотопически тяжелый маломощный поверхностный слой сформировался весной в результате метелевого переноса и новых порций снежных осадков, выпадавших при более высоких температурах конца зимнего пери-

ода [Kurita et al., 2005]. Данные выводы полностью соответствуют результатам, полученным авторами статьи.

Изотопный состав атмосферных осадков зимнего периода 2013–2014 гг. Новая серия наблюдений изотопного состава атмосферных осадков в г. Якутске была проведена с октября 2013 по сентябрь 2014 г. [Малыгина и др., 2015; Папина и др., 2017]. Была использована иная стратегия отбора проб, чем в предшествующих исследованиях [Kurita et al., 2004, 2005]. Площадка для отбора проб была оборудована на крыше здания ИМЗ СО РАН, расположенного на окраине Якутска (103 м над ур. моря). Осадки отбирали по мере их выпадения, расплавляли и сразу упаковывали в герметичные кюветы объемом 10–20 мл. Анализ выполняли в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН, куда образцы пересылали партиями 2–3 раза в год.

Отобранные осадки холодного времени 2013–2014 гг. в Якутске (8 проб) аппроксимируются уравнением $\delta D = 8.17 \cdot \delta^{18}O + 21.9$ ($R^2 = 0.99$, $n = 8$) и характеризуются средневзвешенными величинами $\delta^{18}O = -31.65$ ‰, $\delta D = -237.1$ ‰. За исключением единичных выбросов, для всех проб авторы отмечают высокое значение $d_{exc} > +10$ ‰ [Папина и др., 2017]. Более того, на протяжении холодного сезона наблюдались непрерывное облегчение изотопного состава и рост дейтериевого эксцесса, наиболее высокое значение которого (+21.4 ‰) характерно для осадков, выпавших в феврале–марте.

Кроме атмосферных осадков, в январе 2014 г. была изучена вертикальная вариация изотопного состава в снежном покрове на метеорологическом стационаре Туймада, расположенном в 500 м от здания ИМЗ СО РАН [Малыгина и др., 2015]. Здесь на участке естественного сосново-березового леса шурфом был вскрыт снежный покров мощностью 21 см, в котором визуально было выделено три слоя. Нижний слой (6 см) сложен преимущественно глубинной изморозью, средний (12 см) представлен среднерзистым белым снегом, верхний (3 см) сложен свежеснегавшим слегка уплотненным метелевым снегом.

Через каждые 3 см было отобрано семь проб, анализ которых показал большую вариацию изотопного состава по разрезу. Наиболее тяжелым оказался состав нижнего слоя ($\delta^{18}O = -17.1$ ‰, $\delta D = -160.6$ ‰), а наиболее легким – верхней части снежного покрова ($\delta^{18}O = -45.0$ ‰, $\delta D = -350.6$ ‰). Еще более необычными оказались значения дейтериевого эксцесса и его закономерное повышение от -17.1 ‰ в основании нижнего слоя до $+25.3$ ‰ в среднем слое и вновь уменьшение до $+10$ ‰ в верхнем слое.

Тяжелый состав нижних слоев снега и низкий отрицательный эксцесс объясняются авторами

процессами “метаморфизации изотопного состава” [Малыгина и др., 2015] в результате обогащения нижних слоев снега изотопически более тяжелыми продуктами кристаллизации водяного пара (глубинной изморозью), поступающего из подстилающего грунта. Данное определение совершенно отлично от понимания процесса “метаморфизации изотопного состава” снежного покрова, рассмотренного в работах [Sommerfeld et al., 1991; Hachikubo et al., 2000; Kurita et al., 2005]. По результатам этих экспериментов, утяжеленный и истощенный дейтерием изотопный состав нижних слоев снега связан только с изотопным обменом внутри профиля снежного покрова, а не с привносом влаги извне.

Еще более не поддаются объяснению и противоречат наблюдениям предшественников [Kurita et al., 2005] экстремально высокие положительные (+25.3 ‰) значения дейтериевого эксцесса, установленные Н.С. Малыгиной с соавт. [2015] в среднем слое снежного покрова Якутска.

Таким образом, данные Н.С. Малыгиной с соавт. [2015] и Т.С. Папиной с соавт. [2017] сильно противоречат результатам TVSSE [Kurita et al., 2005], согласно которым во всех 16 изученных профилях весеннего снеговозраста нижний наиболее мощный слой снежного покрова является самым изотопически тяжелым, но имеет наиболее высокий дейтериевый эксцесс. В то же время верхние наиболее легкие слои характеризуются низким дейтериевым эксцессом, достигающим в некоторых образцах отрицательных значений.

Также вызывает сомнение уравнение регрессии $\delta D = 7.01 \cdot \delta^{18}O - 19.7$ ($R^2 = 0.97$, $n = 8$), характеризующее всю совокупность образцов в разрезе снежного покрова [Малыгина и др., 2015]. Его коэффициенты, по мнению авторов, свидетельствуют о значительной “метаморфизации” изотопного состава исходных снежных осадков. Кроме того, данное уравнение практически идентично уравнению регрессии $\delta D = 7.22 \cdot \delta^{18}O - 18.9$ ($R^2 = 0.95$, $n = 23$), полученному для атмосферных осадков Якутска, выпавших на протяжении теплого периода 2014 г. [Папина и др., 2017]. Большое сходство данных уравнений, характеризующих принципиально различные атмосферные осадки в разные сезоны года в одном и том же районе, вызывает вопросы о достоверности исходных данных.

По мнению авторов настоящей статьи, проблематичность интерпретации полученных Н.С. Малыгиной с соавт. [2015] и Т.С. Папиной с соавт. [2017] осадков зимнего периода, обусловлена значительным влиянием ВСУТ. Действительно, крыша института, использованная в качестве площадки для отбора проб, расположена менее чем в 100 м от трубы котельной. Котельная, как показывают данные настоящей статьи, является мощным источником ВСУТ в зимнее время. То же

самое относится к стационару Туймада, на котором изучался разрез снежного покрова. Он расположен от котельной на расстоянии около 700 м.

ВЫВОДЫ

Исследован изотопный (^{18}O , D) и химический состав атмосферных осадков (кристаллическая изморозь, поверхность снежного покрова, осредненный снежный запас), выпавших в Якутске и его окрестностях в декабре 2020–январе 2021 г. в период экстремально низких температур от -47 до -52 °С.

Установлено, что атмосферные осадки данного периода характеризуются большой вариацией в зависимости от их типа и удаленности от центра Якутска. Основная мощность (2–20 см от поверхности) снежного покрова на всех площадках сложена осадками начала зимы, выпадавшими при относительно высоких температурах от -12 до -25 °С в октябре–ноябре 2020 г. На всех участках профиля данные осадки имеют сходный изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -29.45 \pm 1.1$ ‰, $\delta\text{D} = -221.8 \pm 5.57$ ‰, $d_{\text{exc}} = 13.78 \pm 3.52$ ‰), свидетельствующий о формировании их в условиях равновесного кинетического фракционирования и незначительной доли ВСУТ.

В последующий период, с середины декабря 2020 по январь 2021 г., осадки в Якутске формировались в условиях антициклональной штилевой погоды и экстремально низких температур от -45 до -53 °С. Суммарное количество осадков за данный период составило около 6 мм. Они представлены тонким слоем снега на поверхности снежного покрова (0–2 см) и кристаллической изморозью толщиной до 10 см на ветках деревьев и других предметах.

Пробы с поверхности снежного покрова (0–2 см) характеризуются наиболее легким составом ($\delta^{18}\text{O} = -41.04 \pm 5.11$ ‰, $\delta\text{D} = -326.43 \pm 34.16$ ‰, $d_{\text{exc}} = 1.91 \pm 7.72$ ‰) и заметно истощены по дейтерию. На протяжении исследованного 25-километрового профиля в направлении к центру Якутска установлено утяжеление состава на 10 ‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и на 80 ‰ по δD , снижение d_{exc} от +10 до -6 ‰, а также четырехкратное увеличение минерализации из-за примесей карбоната кальция.

Наиболее экзотический изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -30.89 \pm 5.62$ ‰, $\delta\text{D} = -285.88 \pm 12.82$ ‰, $d_{\text{exc}} = -28.79 \pm 32.53$ ‰), не характерный для любых природных атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод и льдов региона, установлен для проб кристаллической изморозь, с наибольшими изменениями $\delta^{18}\text{O}$ от -24 ‰ в Якутске до -37 ‰ на расстоянии 25 км от его центра. На этом же интервале величина δD изменяется от -255.4 до -285.9 ‰, а d_{exc} увеличивается от -80 до $+11.5$ ‰.

В кристаллической изморозь максимальная доля техногенной воды (26–32 ‰) получена вблизи источников ВСУТ (здание ИМЗ СО РАН), в центральной части города она достигает 13–18 ‰, а на окраинах варьирует от 6.5 до 8.8 ‰. В поверхностном слое снежного покрова доля ВСУТ составляет 5–6 ‰ в центральной части Якутска и уменьшается к окраинам до 1 ‰ и менее.

Экзотический состав и характер пространственной вариации изотопного состава указывают на определяющую роль техногенного источника водяного пара в формировании осадков в Якутске при температурах ниже -45 °С. Влияние изотопного состава техногенного источника водяного пара отчетливо проявляется в радиусе до 10 км от центра Якутска. Данный вывод в целом хорошо согласуется с выводами предшественников о наличии в Якутске неизвестных источников атмосферной влаги в зимний период [Kurita et al., 2005].

Увеличение в последние годы продолжительности и повторяемости ледяных туманов, а также толщины кристаллической изморозь в Якутске, по мнению авторов, может быть связано с запуском новой ГРЭС и переводом большинства теплогенерирующих станций на газообразное топливо, характеризующееся большим удельным выбросом техногенного водяного пара при сжигании.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-17-00054, <https://rscf.ru/project/21-17-00054/>).

Литература

- Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. Якутск, Кн. изд-во, 1962, 63 с.
- Галанин А.А. Стабильные изотопы ^{18}O и D в пещерных льдах национального парка “Ленские Столбы” (Восточная Сибирь) // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 1, с. 3–22.
- Галанин А.А., Павлова М.Р., Папина Т.С. и др. Стабильные изотопы ^{18}O и D в ключевых компонентах водного стока и криолитозоны Центральной Якутии (Восточная Сибирь) // Лед и снег, 2019, т. 59, № 3, с. 333–354.
- ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. М., Стандартинформ, 2013, 35 с.
- Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. Метод. пособие. СПб., ГНЦ РФ АНИИИ, 2016, 68 с.
- Климат Якутска / Под ред Ц.А. Швера, С.А. Изюменко. Л., Гидрометеиздат, 1982, 246 с.
- Кузнецов А.М. Удельный расход топлива на выработку тепловой энергии на ТЭЦ // Новости теплоснабжения, 2010, № 4 (116), с. 22–23.
- Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Загрязнение атмосферы города Якутска взвешенными веществами // Природ. ресурсы Арктики и Субарктики, 2020, т. 25, № 1, с. 43–50.
- Мальгина Н.С., Папина Т.С., Эйрих А.Н. и др. Изотопный состав атмосферных осадков и снежного покрова в г. Якутске // Наука и образование, 2015, т. 79, № 3, с. 10–15.

- Папина Т.С., Малыгина Н.С., Эйрих А.Н. и др.** Изотопный состав и источники атмосферных осадков в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 2, с. 60–69.
- Погода** и климат / Справ.-информац. портал [Электрон. ресурс], 2004–2021. – <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата выставления сайта: 26.09.12; дата обращения: 20.02.2021).
- Шварцев С.Л.** Общая гидрогеология. М., Недра, 1996, 423 с.
- Beesley J.A., Moritz R.E.** Toward an explanation of the annual cycle of cloudiness over the Arctic Ocean // *J. Climate*, 1999, No. 12, p. 395–415.
- Bowling S.N., Ohtake T., Benson C.S.** Winter pressure systems and ice fog in Fairbanks, Alaska // *J. Appl. Meteorol.*, 1968, vol. 7, No. 6, p. 961–968.
- Dansgaard W.** Stable isotope in precipitation // *Tellus*, 1964, vol. XVI, No. 4, p. 436–468.
- Fiorella R., Bares R., Lin J. et al.** Detection and variability of combustion-derived vapor in an urban basin // *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, vol. 18, p. 8529–8547.
- Gallagher M.** Chapter 4: Ice Fog: The current state of knowledge and future challenges // *Meteorol. Monographs*, 2020, vol. 58, p. 4.1–4.24.
- Gorski G., Strong C., Good S. et al.** Vapor hydrogen and oxygen isotopes reflect water of combustion in the urban atmosphere // *PNAS*, 2015, vol. 112, No. 11, p. 3247–3252.
- Hachikubo A., Hashimoto S., Nakawo M., Nishimura K.** Isotopic mass fractionation of snow due to depth hoar formation // *Polar Meteorol. Glaciol.*, 2000, No. 14, p. 1–7.
- Kurita N., Sugimoto A., Fujii Y. et al.** Isotopic composition and origin of snow over Siberia // *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, p. D13102.
- Kurita N., Yoshida N., Inoue G., Chayanova E.A.** Modern isotope climatology of Russia: A first assessment // *J. Geophys. Res.*, 2004, vol. 109, p. D03102.
- Lacelle D., Lauriol B., Clark I.D.** Formation of seasonal ice bodies and associated cryogenic carbonates in Caverne de l’Ours, Que’bec, Canada: Kinetic isotope effects and pseudobiogenic crystal structures // *J. Cave and Karst Studies*, 2009, vol. 71, No. 1, p. 48–62.
- Sessions A.L., Burgoyne T.W., Schimmelmann A., Hayes J.M.** Fractionation of hydrogen isotopes in lipid biosynthesis // *Organic Geochemistry*, 1999, vol. 30, iss. 9, p. 1193–1200.
- Sommerfeld R.A., Judy C., Friedman I.** Isotopic changes during the formation of depth hoar in experimental snowpacks // *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*, Spec. Publ. / H.P. Taylor, J.R. O’Neil, I.R. Kaplan (Eds.). St. Louis, Geochem. Soc., 1991, No. 3, p. 159–168.
- van Geldern R., Barth J.** Optimization of instrument setup and post-run corrections for oxygen and hydrogen stable isotope measurements of water by isotope ratio infrared spectroscopy (IRIS) // *Limnol. and Oceanogr. Methods*, 2012, vol. 10, p. 1024–1036.
- Whiticar M.J.** Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane // *Chemical Geol.*, 1999, vol. 161, iss. 1–3, p. 291–314.
- Xing M., Liu W., Li X. et al.** Vapor isotopic evidence for the worsening of winter air quality by anthropogenic combustion-derived water // *PNAS*, 2020, vol. 117, No. 52, p. 33005–33010.
- Galanin A.A. Stable isotopes ¹⁸O and D in cave ice of the Lena Pillars National Nature Reserve (Eastern Siberia). *Earth’s Cryosphere*, 2020, vol. XXIV, No. 1, p. 3–19.
- Galanin A.A., Pavlova M.R., Papina T.S. et al. Stable isotopes ¹⁸O and D in main sources of water runoff and permafrost of Central Yakutia (Eastern Siberia). *Led i Sneg [Ice and Snow]*, 2019, vol. 59, No. 3, p. 333–354, DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-414.
- GOST 31861-2012. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob [GOST 31861-2012. Water. General requirements for sampling]. Moscow, Standardinform, 2013, 35 p. (in Russian).
- Ekajkin A.A. Stabil’nye izotopy vody v glyaciologii i paleogeografii. Metodicheskoe posobie [Stable isotopes of water in glaciology and paleogeography. Toolkit]. St. Petersburg, SSC RF AANII, 2016, 68 p. – https://www.researchgate.net/publication/311419330_Stabilnye_izotopy_vody_v_
- Klimat Yakutsk [Climate of Yakutsk]. C.A. Shver, S.A. Izyumenko (Eds.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982, 246 p. (in Russian).
- Kuznetsov A.M. Specific fuel consumption for heat generation at CHPPs. *Novosti teplosnabzheniya [News of heat supply]*, 2010, No. 4 (116), p. 22–23. – <http://www.nts.ru/>
- Makarov V.N., Torgovkin N.V. Pollution of the atmosphere of the city of Yakutsk by suspended substances. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Natural resources of the Arctic and Subarctic]*, 2020, vol. 25, No. 1, p. 43–50, DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-1-4.
- Malygina N.S., Papina T.S., Eirikh A.N. et al. Isotopic composition of atmospheric precipitation and snow cover in Yakutsk. *Nauka i obrazovanie [Science and Education]*, 2015, vol. 79, No. 3, p. 10–15 (in Russian).
- Papina T.S., Malygina N.S., Eirikh A.N. et al. Isotopic composition and sources of atmospheric precipitation in Central Yakutia. *Kriosfera Zemli [Earth’s Cryosphere]*, 2017, vol. XXI, No. 2, p. 52–61.
- Pogoda i klimat. Spravochno-informacionnyj portal [Weather and Climate. Data Base catalog], 2004–2021. – <http://www.pogodaiklimat.ru> (site date: 26.09.2012; accessed: 26.02.2021).
- Shvartsev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya [General hydrogeology]*. Moscow, Nedra, 1996, 423 p. (in Russian).
- Beesley J.A., Moritz R.E. Toward an explanation of the annual cycle of cloudiness over the Arctic Ocean. *J. Climate*, 1999, No. 12, p. 395–415, DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<0395:TA EOTA.2.0.CO; 2.
- Bowling S.N., Ohtake T., Benson C.S. Winter pressure systems and ice fog in Fairbanks, Alaska. *J. Applied Meteorology*, 1968, vol. 7, No. 6, p. 961–968, DOI: 10.1175/1520-0450(1968)007<0961:WPSAIF>2.0.CO; 2.
- Dansgaard W. Stable isotope in precipitation. *Tellus*, 1964, vol. XVI, No. 4, p. 436–468.
- Fiorella R., Bares R., Lin J. et al. Detection and variability of combustion-derived vapor in an urban basin. *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, vol. 18, p. 8529–8547. – <https://doi.org/10.5194/acp-18-8529-2018>
- Gallagher M. Chapter 4: Ice Fog: The current state of knowledge and future challenges. *Meteorological Monographs*, 2020, vol. 58, p. 4.1–4.24, DOI: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-17-0002.1.
- Gorski G., Strong C., Good S. et al. Vapor hydrogen and oxygen isotopes reflect water of combustion in the urban atmosphere. *PNAS*, 2015, vol. 112, No. 11, p. 3247–3252. – <https://www.pnas.org/content/pnas/112/11/3247.full.pdf>
- Hachikubo A., Hashimoto S., Nakawo M., Nishimura K. Isotopic mass fractionation of snow due to depth hoar formation. *Polar Meteorol. Glaciol.*, 2000, No. 14, p. 1–7.

References

Gavrilova M.K. *Klimat Central’noi Yakutii [The climate of Central Yakutia]*. Yakutsk, Knizhnoye izd-vo, 1962, 63 p. (in Russian).

Kurita N., Sugimoto A., Fujii Y. et al. Isotopic composition and origin of snow over Siberia. *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, p. D13102, DOI: 10.1029/2004JD005053.

Kurita N., Yoshida N., Inoue G., Chayanova E.A. Modern isotope climatology of Russia: A first assessment. *J. Geophys. Res.*, 2004, vol. 109, p. D03102, DOI:10.1029/2003JD003404.

Lacelle D., Lauriol B., Clark I.D. Formation of seasonal ice bodies and associated cryogenic carbonates in Caverne de l'Ours, Quebec, Canada: Kinetic isotope effects and pseudo-biogenic crystal structures. *J. Cave and Karst Studies*, 2009, vol. 71, No. 1, p. 48–62.

Sessions A.L., Burgoyne T.W., Schimmelmann A., Hayes J.M. Fractionation of hydrogen isotopes in lipid biosynthesis. *Organic Geochemistry*, 1999, vol. 30, iss. 9, p. 1193–1200. – [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(99\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(99)00094-7)

Sommerfeld R.A., Judy C., Friedman I. Isotopic changes during the formation of depth hoar in experimental snowpacks. In: *Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein*,

Spec. Publ. H.P. Taylor, J.R. O'Neil, I.R. Kaplan (Eds.). St. Louis: Geochem. Soc., 1991, No. 3, p. 159–168. –

https://www.geochemsoc.org/files/1714/1269/7652/SP-3_205-210_Sommerfeld.pdf

van Geldern R., Barth J. Optimization of instrument setup and post-run corrections for oxygen and hydrogen stable isotope measurements of water by isotope ratio infrared spectroscopy (IRIS). *Limnology and Oceanography Methods*, 2012, vol. 10, p. 1024–1036. – <https://dx.doi.org/10.4319/lom.2012.10.1024>

Whiticar M.J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology*, 1999, vol. 161, iss. 1–3, p. 291–314. –

[https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00092-3](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00092-3)

Xing M., Liu W., Li X. et al. Vapor isotopic evidence for the worsening of winter air quality by anthropogenic combustion-derived water. *PNAS*, 2020, vol. 117, No. 52, p. 33005–33010. – <https://doi.org/10.1073/pnas.1922840117>

*Поступила в редакцию 13 июля 2021 г.,
после доработки – 10 июня 2022 г.,
принята к публикации 17 июля 2022 г.*