

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 556.124:556.114.6(470.22)

doi: 10.31857/S2076673421040105

Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) снежного покрова Карелии

© 2021 г. Г.С. Бородулина^{1*}, И.В. Токарев², М.А. Левичев¹¹Карельский научный центр Российской академии наук, Петрозаводск, Россия;²Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

*bor6805@yandex.ru

Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of the snow cover in Karelia

G.S. Borodulina^{1*}, I.V. Tokarev², M.A. Levichev¹¹Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia;²Research park of St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*bor6805@yandex.ru

Received April 29, 2021 / Revised July 12, 2021 / Accepted October 4, 2021

Keywords: *Karelia, snow cover, isotopes of oxygen and hydrogen, atmospheric precipitations.*

Summary

For the first time, a regional study of the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) of the snow cover in Karelia was performed using a sub-meridional and two sub-latitudinal profiles (March 2016). Snow nutrition does generally prevail here in the river and underground runoff. Integral snow samples were taken at 45 sites, three horizons were studied at 39 of them. Monitoring of the isotopic composition of atmospheric precipitation is carried out in the Petrozavodsk city from 2012 to the present. The isotopic composition of snow on the territory of Karelia varied through the following range: for $\delta^{18}\text{O}$ it is from -15.7 to -21.1 ‰, and for $\delta^2\text{H}$ – from -118 to -158 ‰, which is significantly less than the isotopic composition of atmospheric precipitation for the same period: $\delta^{18}\text{O} = -8.7 \div -30.9$ ‰, $\delta^2\text{H} = -77 \div -239$ ‰. The exception is snow in the valleys of the large Shuya and Suna rivers with light isotopes $\delta^{18}\text{O}$ (down to -21 ‰). According to two sublatitudinal profiles in southern and central Karelia, there were no obvious trends in the isotopic composition of snow. The decrease in the contents of deuterium ($\delta^2\text{H}$) and oxygen-18 ($\delta^{18}\text{O}$) in the sections of snow cover corresponds to an almost complete loss of snow at the beginning of winter due to the December thaws of 2015 and its intensive accumulation in abnormally cold January 2016. According to trajectory analysis data, air masses containing isotopically heavy moisture come mainly from the west and southwest, and those containing isotopically light moisture come from the north and east. The results of this research demonstrate that the reconstruction of the isotopic composition of winter precipitation can be approximately performed by the isotopic composition of snow cover.

Citation: Borodulina G.S., Tokarev I.V., Levichev M.A. Isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of the snow cover in Karelia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (4): 521–532. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421040105.

Поступила 29 апреля 2021 г. / После доработки 12 июля 2021 г. / Принята к печати 4 октября 2021 г.

Ключевые слова: *Карелия, снежный покров, изотопы кислорода и водорода, атмосферные осадки.*

Приводятся результаты изотопного анализа состава снежного покрова Карелии, сформировавшегося в зимний период в 2015/16 г., и атмосферных осадков в Петрозаводске. Показано, что состав снега изменяется от $-15,7$ до $-21,1$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от -118 до -158 ‰ для $\delta^2\text{H}$, а облегчение изотопного состава происходит с юга на север в соответствии с понижением температуры воздуха. Реконструкцию изотопного состава зимних атмосферных осадков приближённо можно выполнить по изотопному составу снежного покрова.

Введение

Сведения об изотопном составе атмосферных осадков (содержаниях дейтерия — $\delta^2\text{H}$ и кислорода-18 — $\delta^{18}\text{O}$) широко используют для

изучения водных и ледовых объектов при решении прикладных задач и в фундаментальных исследованиях, так как осадки — основной источник формирования водного баланса на континентах [1–4]. Изотопный подход по-

лезен и для изучения сезонной зависимости стока и оценки вклада снега в круговорот воды [5]. Объём научных исследований по данной тематике в России относительно невелик, хотя отдельные группы давно работают в области использования $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ как гидролого-гидрогеологических и климатических трассеров, а в последние годы к данному виду работ вырос интерес и у практиков [6–10]. В северо-западных регионах России изотопные исследования водных объектов и снега немногочисленны [11, 12]. Анализ результатов мониторинга атмосферных осадков и снежного покрова в Арктике, в том числе в финской Лапландии, показал, что изотопный состав снежного покрова даёт представление о процессах переноса и накопления осадков [13].

С 2009 г. Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН изучает изотопный состав атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод в регионе. Исследования на Онежском озере и его водосборе показали, что низкоминерализованные и насыщенные кислородом талые воды, поступающие весной с притоками, формируют в заливах озера значительно более истощённые изотопами водные массы по сравнению с его центральными участками [14, 15]. Кроме того, в центральных частях озера изотопный состав воды изменяется в результате испарения. Указанные особенности водного баланса влияют и на условия формирования химического состава водных объектов [14].

Задачи настоящей работы — определить региональные особенности формирования изотопного состава снежного покрова для последующего изучения водообмена и оценить возможности использования данных об изотопном составе снега для реконструкции изотопного состава атмосферных осадков в зимний период.

Район исследований

Карелия расположена в восточной части Фенноскандии (60–70° с.ш. и 30–40° в.д.), и на её территории находятся крупнейшие водные объекты севера Европейской территории России: Белое море, Онежское и Ладожское (частично) озёра. Карелия относится к атланτικο-арктической зоне умеренного пояса, имеет

переходный от морского к континентальному климат с характерным преобладанием переноса воздушных масс атлантического и арктического происхождения (здесь и далее климатическое описание дано по работе [16]). Близость Балтийского, Белого и Баренцева морей и интенсивная круглогодичная циклоническая деятельность обуславливают продолжительную, но не суровую зиму. Средняя температура января изменяется от $-9 \div -10^\circ\text{C}$ в южных до $-12 \div -13^\circ\text{C}$ в северных районах; весна отличается частыми возвратами холодов; лето прохладное и короткое со средними температурами июля $14\text{--}15^\circ\text{C}$ на севере и $16\text{--}17^\circ\text{C}$ на юге.

С 1980-х годов происходят значимые изменения в климатической системе мира, чётко проявившиеся в повышении среднегодовой температуры воздуха на $1\text{--}2^\circ\text{C}$ [16, 17]. В полярных областях наиболее интенсивное потепление отмечается в зимние месяцы, что обусловило частое наступление оттепелей, как правило, при прохождении атлантических циклонов. На территории Карелии, кроме температурной аномалии, отмечается рост годовых сумм осадков. Среднемноголетние значения за 1991–2013 г. превышают климатическую норму на 20–70 мм. Наибольшее увеличение месячных сумм осадков характерно для января, июля и ноября. Неустойчивость погодных условий, высокая относительная влажность воздуха и значительное количество осадков при широком разнообразии ландшафтов (расчлнённый рельеф, обилие озёр и болот, значительная лесистость) позволяют предполагать наличие сложной картины распределения изотопного состава осадков в пространстве, в том числе зимних, вклад которых в формирование водного стока достигает 40%.

Методика исследований

Пробы снега отбирали по субмеридиональному профилю вдоль автомобильной трассы «Кола» (Санкт-Петербург — Мурманск) от г. Олонец до пос. Тедино (протяжённость 650 км) и двум субширотным профилям: пос. Кочкома — г. Костомукша (130 км); г. Петрозаводск — г. Сортавала (180 км, рис. 1). Пробы отбирали в последнюю декаду марта 2016 г. — в период максимального снегонакопления и до начала снеготаяния. Для

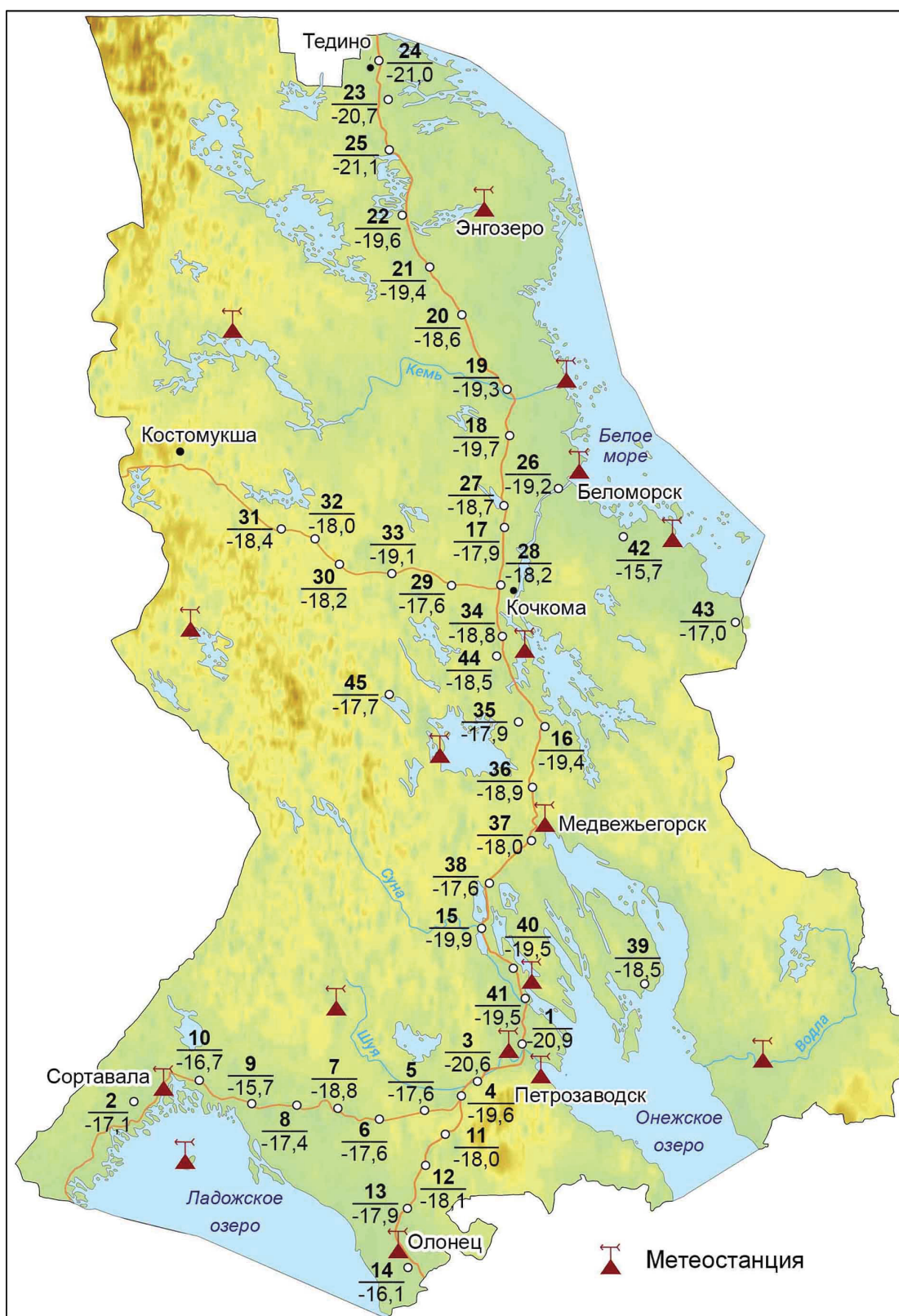


Рис. 1. Расположение пунктов отбора образцов снега и значения $\delta^{18}\text{O}$ на территории Карелии.

Цифры на карте: в числителе – номера станций отбора проб, в знаменателе – содержание $\delta^{18}\text{O}$ в интегральной пробе снега

Fig. 1. Location of snow sampling points and $\delta^{18}\text{O}$ values.

Figures on map: in the numerator – the numbers of sampling points, in the denominator – $\delta^{18}\text{O}$ values of integral snow samples

опробования выбирали открытые, небольшие по площади участки, не испытывающие ветрового переотложения снега и удалённые от дорог. На южных и юго-западных станциях снег среднего горизонта имел более плотную структуру, а границы слоёв маркировались ледяной коркой. В северных районах слоистость снега была выражена слабо.

Пробы отбирали трубкой диаметром 100 мм и хранили на холоде в герметичных пластиковых пакетах. При взятии проб фиксировали толщину снежного покрова. Всего было отобрано 45 интегральных проб. На 39 станциях, кроме вальной, взяты пробы из трёх визуально выделенных горизонтов. В лаборатории снег растапливали при комнатной температуре и измеряли объём талой воды. В пробе талой воды определяли рН (потенциометрический метод) и электропроводность воды (кондуктометрический метод). Для анализа изотопного состава воду переливали во флаконы объёмом 50 мл, герметично закупоривали их и хранили в холоде. Атмосферные осадки собирали в г. Петрозаводск на крыше здания ИВПС КарНЦ РАН (61°47' с.ш., 34°21' в.д.). Пробы брали еженедельно и/или после массивных выпадений осадков. Для характеристики синоптических условий на метеостанциях Карелии использованы данные с сайта <http://rp5.ru>. Средневзвешенный изотопный состав атмосферных осадков вычисляли по соотношению

$$\delta' = \sum(\delta_i \times v_i) / \sum v_i, \quad (1)$$

где δ_i — изотопный состав водорода или кислорода; v_i — объём талой воды i -го слоя снежного покрова; $\sum v_i$ — сумма осадков за расчётный период.

Измерения содержаний $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в талой воде проводили на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L 2120-i в Научном парке Санкт-Петербургского государственного университета. Использованы следующие стандарты: V-SMOW-2, GISP, SLAP и USGS-45 и USGS-46. Ошибка измерения составляла: для $\delta^{18}\text{O}$ — $\pm 0,1$ ‰, для $\delta^2\text{H}$ — ± 1 ‰. Всего проанализировано 174 пробы. Отрицательный дейтериевый эксцесс восьми проб был принят как диагностический признак испорченной при подготовке или хранении пробы; такие результаты исключали из рассмотрения. Для контроля результат анализа полного разреза снега (интегральная проба) сравнивали с расчётным средневзвешенным изотопным составом, определяемым по формуле (1).

При сравнении результатов опробования полной колонки и средневзвешенных значений статистически значимых различий не установлено. Это показывает, что опробование путём отбора полной колонки — достаточно информативный способ изучения изотопного состава снежного покрова, если не стоит задача расчленения процессов накопления снега во времени.

Результаты и обсуждение

В зиму 2015/16 г. снежный покров в Карелии начал формироваться в ноябре, но из-за частых оттепелей запасы снега на большей части территории начали накапливаться только в январе (рис. 2). В январе 2016 г. была зафиксирована самая низкая с 2010 г. средняя температура воздуха, которая составила -15 °С в г. Петрозаводск и -16 °С на севере республики. Январь 2016 г. оказался также самым снежным за последние годы: в Петрозаводске выпало 65 мм снега, на ГМС Энгозеро — 49 мм. Февраль 2016 г. оказался, наоборот, самым тёплым с 2010 г. со средней температурой -2 и -4 °С соответственно. В оттепель 8–11 февраля 2016 г. температура воздуха достигала $+3,8$ °С, что привело к резкому сокращению снежного покрова, а в южной части региона отмечалось практически полное его стаивание, после чего снегонакопление продолжилось. Суммарное количество атмосферных осадков зимой 2015/16 г. (ноябрь–февраль) составило: 207 мм — на севере (ГМС Энгозеро), 284 мм — на юге (г. Олонец) и 190 мм — в г. Петрозаводск. Окончательная деградация снежного покрова в южных районах началась в первой декаде марта, а в центральных и северных районах — в последней. На момент опробования толщина снежного покрова колебалась от 15 см на юге до 70 см на севере.

Уравнение локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) $\delta^2\text{H} = 7,65 \times \delta^{18}\text{O} + 5,4$ получено на основании непрерывных рядов наблюдений в 2009–2016 гг. в Петрозаводске. Изотопный состав атмосферных осадков зимой 2015/16 г. в Петрозаводске изменялся от $-10,8$ до $-29,5$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от -75 до -222 ‰ для $\delta^2\text{H}$; средневзвешенные значения для холодного периода составили: $\delta^{18}\text{O} = -12,6 \div -22,4$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -92 \div -164$ ‰; величины по меся-

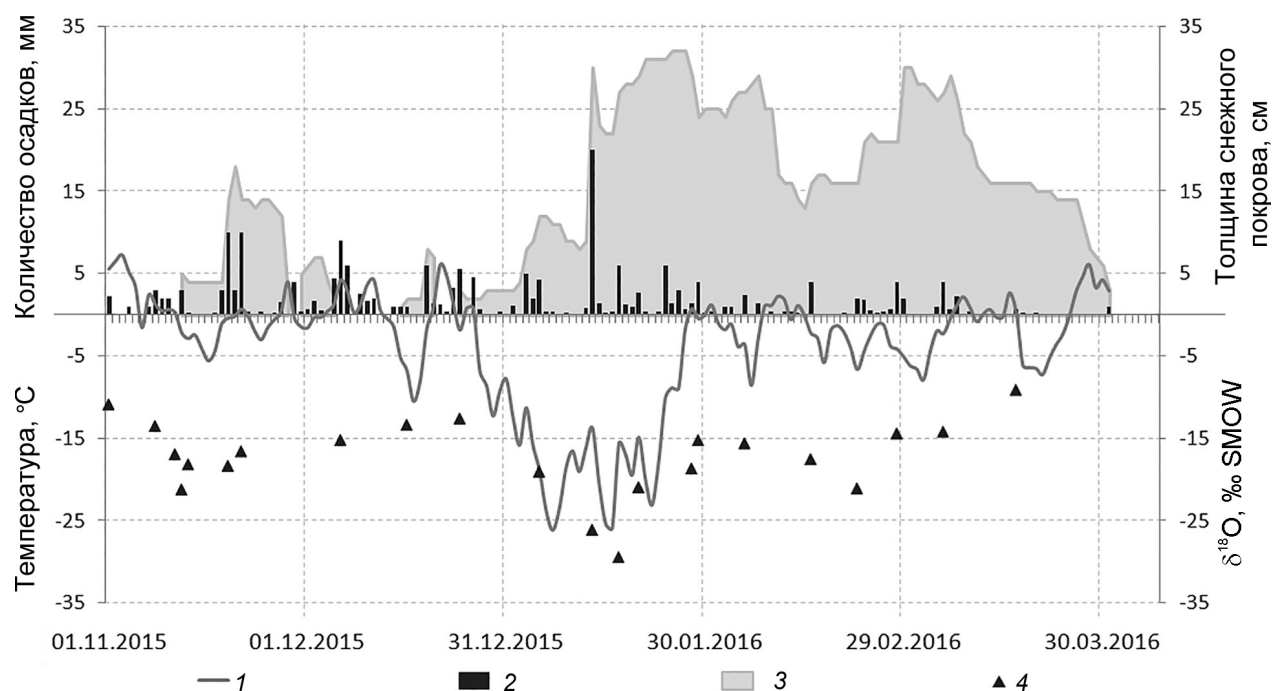


Рис. 2. Температура воздуха (1), количество осадков (2), толщина снежного покрова (3) (ГМС Петрозаводск) и содержание $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках г. Петрозаводск (4) зимой 2015/16 г.

Fig. 2. Air temperature (1), amount of precipitation (2), height of snow cover (3) (Petrozavodsk meteorological station) and $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation samples in Petrozavodsk (4) in winter 2015–2016

цам приведены в табл. 1. Хронологический ход значений $\delta^{18}\text{O}$ зимой 2015/16 г. соответствует температурному профилю зимнего периода (см. рис. 2). Субмеридиональный профиль проб снежного покрова характеризует практически все орографические районы Карелии (см. рис. 1). Абсолютные отметки точек опробования меняются от 9 м (Северное Приладожье) до 175 м (Онежско-Беломорский водораздел). Субширотные профили оказались недостаточно протяжёнными, чтобы отразить все региональные особенности.

Снеговая вода характеризуется очень низкой минерализацией. Электропроводность воды в региональном плане изменяется от 5,6 до 16,2 мкСм/см, в среднем составляя 9 мкСм/см при кислой реакции – $\text{pH} = 4,88\text{--}6,06$ (в среднем 5,3) (табл. 2). В разрезе снежного покрова pH единичных проб из нижнего и верхнего слоёв достигает 6,4, что связано с воздействием почвенных вод или аэрогенным влиянием. В среднем, послойные значения pH изменяются от 5,2 (верх) до 5,4 (низ), составляя в середине 4,9. Какой-либо чёткой закономерности распределения показателей в разрезе снежного покрова

Таблица 1. Средневзвешенные на объёмы выпадений месячные значения изотопного состава атмосферных осадков в г. Петрозаводск зимой 2015/16 г.

Период наблюдений	Число проб	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰
Ноябрь 2015 г.	7	–16,4	–122
Декабрь 2015 г.	3	–14,6	–113
Январь 2016 г.	6	–22,4	–164
Февраль 2016 г.	4	–17,4	–125
Март 2016 г.	2	–12,6	–92

не наблюдается. Однако в большинстве случаев самыми кислыми оказались пробы среднего горизонта. По результатам исследований 1996–1999 гг. величина pH снежного покрова на фоновых территориях Карелии изменялась в пределах 4,7–5,1, а вблизи промышленных центров была равна 4,9–5,5 [18]. Пробы зимних осадков 2015/16 г. в Петрозаводске отличаются более высокими значениями величин pH и электропроводности: в среднем 5,7 и 16,5 мкСм/см соответственно, что объяснимо влиянием пылевых частиц в городских условиях.

В региональном плане изотопный состав интегральных проб снежного покрова варьирует в следующем диапазоне: $\delta^{18}\text{O} = -15,7 \div -21,1\text{‰}$;

Таблица 2. Химический и изотопный состав снега Карелии (март 2016 г.)

Пункт наблюдения*	Интегральная проба					Средневзвешенный состав**	
	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exs} , ‰	pH	электропроводность, мкСм/см	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰
1	-20,9	-150	17,0	5,82	7,3	-21,8	-160
2	-17,1	-127	7,4	5,8	8,3	-16,1	-121
3	-20,6	-158	6,8	5,01	6,3	-20,2	-153
4	-19,6	-151	5,6	5,11	6,1	-20,2	-152
5	-17,6	-136	5,1	5,34	7,0	-17,5	-135
6	-17,6	-133	8,2	6,02	10,3	-17,3	-130
7	-18,8	-142	8,3	5,84	10,9	-16,4	-123
8	-17,4	-130	9,9	5,27	8,3	-17,2	-130
9	-15,7	-118	7,7	5,13	7,6	-16,4	-125
10	-16,7	-124	10,4	5,33	9,2	-16,3	-124
11	-18,0	-135	8,5	5,00	7,7	-17,4	-130
12	-18,1	-137	7,6	4,90	7,4	-17,5	-133
13	-17,9	-136	7,0	5,18	7,8	-17,7	-134
14	-16,1	-124	5,1	5,39	15,2	—	—
15	-19,9	-148	11,2	5,04	10,4	-19,5	-147
16	-19,4	-147	7,9	5,06	8,4	-19,5	-146
17	-17,9	-134	8,8	6,06	9,4	-18,5	-138
18	-19,7	-145	12,7	5,19	10,8	-19,3	-143
19	-19,3	-143	12,2	5,78	11,9	-18,6	-137
20	-18,6	-133	16,2	5,00	9,6	-18,4	-136
21	-19,4	-143	11,6	5,29	7,7	-19,3	-138
22	-19,6	-146	11,0	5,17	8,6	-18,2	-135
23	-20,7	-153	13,1	5,00	8,5	-20,3	-150
24	-21,0	-157	11,4	5,06	7,9	-20,6	-152
25	-21,1	-157	12,3	5,04	10,1	-20,5	-148
26	-19,2	-142	11,3	5,43	7,3	-19,3	-141
27	-18,7	-141	8,8	5,47	16,2	-17,7	-134
28	-18,2	-142	3,2	4,94	7,2	—	—
29	-17,6	-134	6,9	5,00	6,4	-19,0	-144
30	-18,2	-137	8,7	5,16	5,6	-18,6	-144
31	-18,4	-140	7,3	5,09	6,2	-18,7	-142
32	-18,0	-137	7,4	4,95	6,3	-18,5	-136
33	-19,1	-138	14,8	5,06	6,0	-18,9	-142
34	-18,8	-140	11,3	5,63	5,9	-19,1	-144
35	-17,9	-141	2,3	6,04	8,1	-17,6	-137
36	-18,9	-146	5,4	4,88	8,2	—	—
37	-18,0	-141	3,0	5,07	7,5	-16,6	-127
38	-17,6	-134	6,3	5,40	7,1	-18,7	-142
39	-18,5	-143	4,6	5,07	6,6	—	—
40	-19,5	-153	3,3	4,98	8,6	-18,8	-145
41	-19,5	-145	10,8	5,32	5,9	-19,5	-148
42	-15,7	-121	4,6	4,89	17,3	—	—
43	-17,0	-129	7,1	5,01	17,6	—	—
44	-18,5	-135	13,6	5,30	6,0	-18,8	-142
45	-17,7	-130	11,6	5,40	4,5	-18,2	-135

*Номера соответствуют нумерации пунктов на рис. 1. **Средневзвешенный на объём талой воды трёх слоёв снежного покрова.

$\delta^2\text{H} = -118 \div -158$ ‰; средневзвешенные значения для $\delta^{18}\text{O} = -16,1 \div -1,8$ ‰, а $\delta^2\text{H} = -121 \div -160$ ‰ (см. табл. 2), т.е. вариации изотопного состава снега несколько меньше, чем диапазон изменения состава атмосферных выпадений в Петрозаводске. Наиболее тяжёлые составы валовых проб снега ($\delta^{18}\text{O} = -15,7 \div -16,1$ ‰) отмечены на побере-

жье Белого моря (станция 42, Сумской посад), в Северном Приладожье (станция 9) и в районе г. Олонец (станция 14) (см. рис. 1, табл. 2). Дейтериевый эксцесс d_{exc} для интегральных проб снега варьирует от 2,3 до 17 ‰, а в зимних осадках — от 2,4 до 28 ‰. В обоих случаях показатель изменяется в антифазе с $\delta^{18}\text{O}$, но коэффициенты достоверности аппроксимации невысоки: 0,22 и 0,13 соответственно, поэтому d_{exc} не может в данном случае однозначно выполнить диагностическую роль условий образования атмосферных осадков. Тем не менее, тенденция увеличения значений d_{exc} при обеднении осадков тяжёлыми изотопами наблюдается. Такой процесс, вероятно, происходит во время длительного осаждения, когда воздушные массы перемещаются далеко от источника пара [19].

Наибольшее изотопное истощение ($\delta^{18}\text{O}$ до $-21,1$ ‰) в снеге зафиксировано на севере республики и локально на западном берегу Онежского озера в районе Пряжа — Петрозаводск — Гирвас (см. рис. 1). При исключении точек этой локальной аномалии оказывается, что широта местности — определяющий фактор в распределении изотопного состава снежного покрова Карелии (см. рис. 1). Коэффициент корреляции для $\delta^{18}\text{O}$ — широта местности составил 0,7. Данная корреляция — результат регионального тренда зимней температуры воздуха [16, 20].

Уравнение регрессии, описывающее зависимость изотопного состава выпадающих осадков от температуры воздуха зимой 2015/16 г. в Петрозаводске, имеет следующий вид: $\delta^{18}\text{O} = 0,49t - 15,3$ ($R^2 = 0,5$). Для валовых проб снега у зависимости схожий вид: $\delta^{18}\text{O} = 0,59t - 12,8$, но коэффициент корреляции значительно ниже ($R^2 = 0,15$). В последнем случае необходимо учесть, что температура воздуха за зимний период для точек отбора проб получена методом интерполяции данных ближайших ГМС. В первом приближении можно сделать вывод, что в регионе наблюдается зависимость изотопного состава выпадающих осадков от температуры воздуха, как это было показано для северных областей [20–22].

Лёгкий изотопный состав валовых проб снега аномальной зоны, вероятно, связан с обильным январским снегопадом и сохранностью снежного покрова на участках депрессий на водосборе Онежского озера — в долинах крупных рек Шуя и Суна. Одна из аномальных точек (станция 1,

Верховье, долина р. Шуя) расположена недалеко от Петрозаводска, что даёт возможность сравнить изотопный состав атмосферных выпадений и снежного покрова. Средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ для снега ($-21,8$ и -160 ‰) оказались близки к январской средневзвешенной величине атмосферных осадков в Петрозаводске ($-22,4$ и -164 ‰ соответственно) (см. табл. 1 и 2). Вероятнее всего, массивное выпадение изотопически лёгких январских осадков определило изотопный состав снежного покрова в целом.

В Южной Карелии в валовых пробах снега на субширотном профиле пос. Святозеро — г. Сортавала обнаружены вариации для $\delta^{18}\text{O}$ от $-18,8$ до $-15,7$ ‰, а в северной, на профиле пос. Кочкома — г. Костомукша, — от $-17,6$ до $-19,1$ ‰. По субширотным профилям явных региональных трендов изменения изотопного состава снега не установлено. Точки наблюдения 42 и 43 на южном побережье Белого моря отличаются аномально тяжёлым изотопным составом: $\delta^{18}\text{O} = -15,7$ и -17 ‰, что, вероятно, связано с морским влиянием. Линия аппроксимации для интегральных проб снега имеет уравнение $\delta^2\text{H} = 6,7 \times \delta^{18}\text{O} - 14,5$ и пересекает ЛЛМВ в точке $\delta^{18}\text{O} \approx -22$ ‰ и $\delta^2\text{H} \approx -165$ ‰ (рис. 3), соответствующей среднему составу январских атмосферных осадков (см. табл. 1). Точка пересечения указанных линий определяется январским минимумом годовых температур, совпадающим с глобальной перестройкой атмосферной циркуляции в рассматриваемом регионе. Разница в угловых коэффициентах ЛЛМВ и линии аппроксимации снега определяется поведением во времени дейтериевого эксцесса.

Самый лёгкий средневзвешенный изотопный состав атмосферных выпадений отмечен в январе 2016 г. при экстремальных значениях $\delta^{18}\text{O} = -29,5$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -222$ ‰ и температуре воздуха до $-26,2$ °С, в то время как в ноябре и в декабре 2015 г. средневзвешенный изотопный состав осадков был тяжёлым при экстремальных значениях $\delta^{18}\text{O} = -12,6$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -96$ ‰. Вариации изотопного состава атмосферных выпадений связаны с приходом воздушных масс из различных регионов. Обратные траектории движения воздушных масс, определяющие выпадение атмосферных осадков, рассчитаны с помощью модели HYSPLIT [23] (рис. 4). Для дат с резкими изменениями синоптических условий

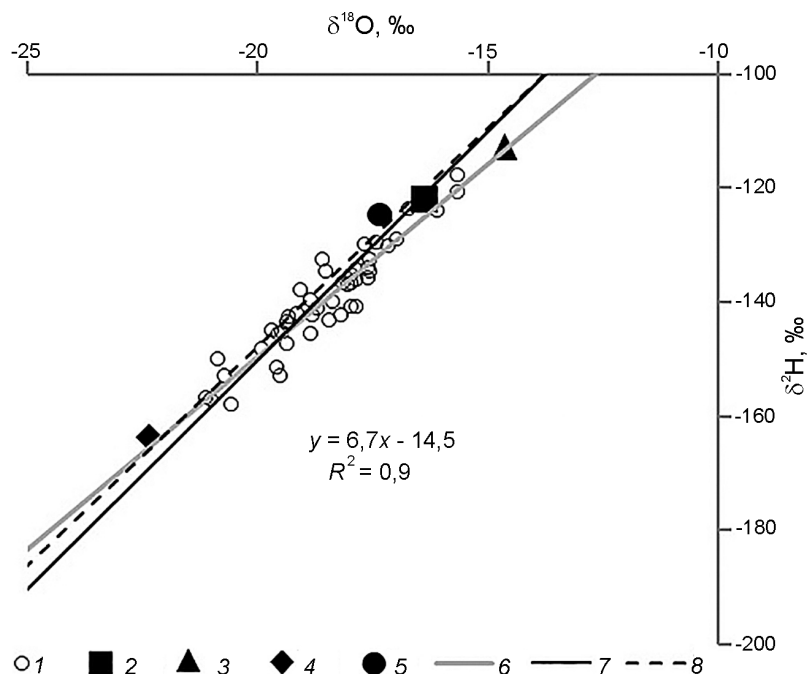


Рис. 3. Содержание $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в снеге по данным валовых проб из снежной толщи в марте 2016 г. (1) и среднемесячный изотопный состав зимних атмосферных осадков в г. Петрозаводск:

2 – ноябрь 2015 г.; 3 – декабрь 2015 г.; 4 – январь 2016 г.; 5 – февраль 2016 г.; 6 – линия аппроксимации изотопного состава снега (уравнение на диаграмме); 7 – глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ); 8 – локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) (уравнение $y = 7.65x + 5.4$)

Fig. 3. Deuterium and oxygen-18 content in samples whole snow cover of Karelia in March 2016 (1) and the average monthly isotopic composition of winter atmospheric precipitation in Petrozavodsk:

2 – November 2015; 3 – December 2015; 4 – January 2016; 5 – February 2016; 6 – the line of approximation of the isotopic composition of snow (equation in the diagram); 7 – global meteoric water line (GLMV); 8 – local meteoric water line (LLMV) (equation $y = 7.65x + 5.4$)

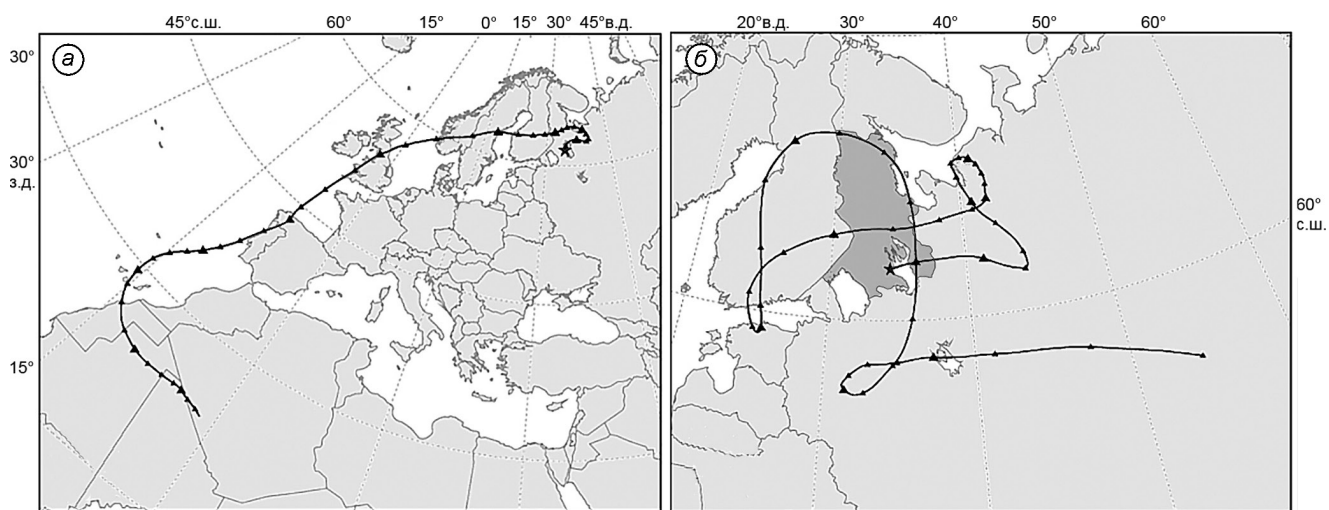


Рис. 4. Обратные траектории движения воздушных масс (использован онлайн инструмент HYSPLIT на сайте NOAA [23]), вызывающие осадки на территории Карелии 24.12.2015 г. (а) и 13.01.2016 г. (б).

Выделенная область – территория Карелии

Fig. 4. Backward trajectories of air masses causing precipitation in Karelia 24.12.2015 (a) and 13.01.2016 (b). (used online tool HYSPLIT on NOAA website [23]).

Selected area – the territory of Karelia

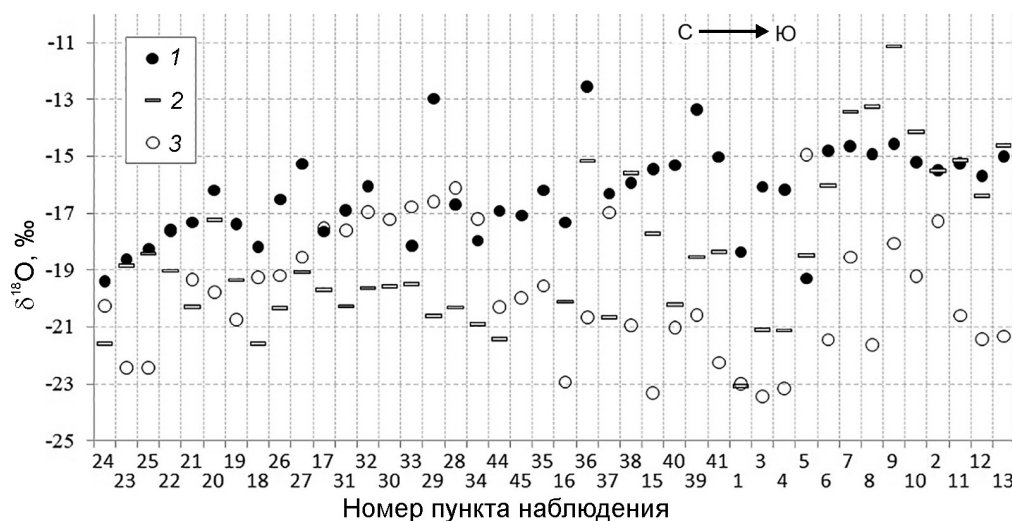


Рис. 5. Распределение $\delta^{18}\text{O}$ в снежных колонках (для пунктов наблюдения на территории Карелии в марте 2016 г.) по слоям:

1 – верхний; 2 – средний; 3 – нижний

Fig. 5. The $\delta^{18}\text{O}$ distribution in the snowpack by layers:

1 – top; 2 – middle; 3 – bottom (for snow sampling points on the territory of Karelia in March 2016)

(24.12.2015 г. и 13.01.2016 г.) выбрана траектория, восстановленная на пять суток и описывающая движение воздушных масс выше нижней границы облачности (200 м). Воздушные массы, содержащие изотопически тяжёлую влагу, поступают преимущественно с запада и юго-запада, а содержащие изотопически лёгкую – с севера и востока (см. рис. 4).

Послойный анализ снежного покрова показал значительные изменения изотопного состава в разрезе: от $-11,1$ до $-23,4$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от -77 до -182 ‰ для $\delta^2\text{H}$. Причин может быть множество: ветровое переотложение снега, сублимация, диффузионное движение и кристаллизация/испарение влаги в толще снега, перенос влаги из почвы, фильтрационное движение воды при оттепелях и дождях [5, 13, 24]. Поверхностный снег в исследованных пробах, как правило, самый изотопически тяжёлый по сравнению с нижележащими слоями (рис. 5). Разница в содержаниях $\delta^{18}\text{O}$ между поверхностным и нижним горизонтом достигает $-9,7$ ‰. В снежном покрове значения $\delta^{18}\text{O}$ с глубиной в большинстве случаев становятся более отрицательными, что соответствует практически полной потере снега в начале зимы за счёт декабрьских оттепелей и интенсивному его накоплению в аномально холодном январе. В снежных колонках юго-запада в средней части разреза чётко выделяется

слой плотного, часто более тёмного снега, образовавшегося при декабрьском потеплении. Этот слой небольшой мощности отличается тяжёлым изотопным составом, что, вероятно, объясняется трансформацией изотопного состава снега в результате процессов перераспределения водяного пара и воды в толще снега [24]. В центральных и северных районах Карелии нижний слой снега сохранил состав изотопически более тяжёлых атмосферных выпадений начала зимы по сравнению с январскими осадками.

Выводы

Впервые на территории Карелии выполнены региональные исследования изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) снежного покрова в конце периода снегонакопления (март 2016 г.) на фоне продолжающихся с 2012 г. наблюдений за изотопным составом атмосферных выпадений в Петрозаводске. Осадки характеризуются низкой минерализацией и кислой реакцией (в среднем электропроводность $\text{EC} = 9$ мкСм/см при $\text{pH} = 5,3$), кроме городских территорий (в среднем $\text{EC} = 16,5$ мкСм/см при $\text{pH} = 5,7$).

Изотопный состав снега изменялся в следующем диапазоне: $\delta^{18}\text{O} = -15,7 \div -21,1$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -118 \div -158$ ‰, что значительно мень-

ше, чем вариации состава атмосферных осадков за зиму 2015/16 г.: $\delta^{18}\text{O} = -8,7 \div -30,9 \text{ ‰}$, $\delta^2\text{H} = -77 \div -239 \text{ ‰}$. Выявлен тренд уменьшения содержаний $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ с юга на север в соответствии с понижением зимней температуры воздуха. Широтная зависимость изотопного состава снега не фиксируется. Согласно данным траекторного анализа, воздушные массы, содержащие изотопически тяжёлую влагу, поступают преимущественно с запада и юго-запада, а содержащие изотопически лёгкую влагу — с севера и востока. Обнаружены локальные аномалии облегчения изотопного состава снега, связанные с температурной инверсией воздуха в долинах нижнего течения крупных рек Шуя и Суна.

Уменьшение содержаний $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в снеге зимы 2015/16 г. с глубиной соответствует практически полному стаиванию снежного покрова в начале зимы за счёт декабрьских оттепелей и интен-

сивному его накоплению в аномально холодном январе. По-видимому, реконструкцию средневзвешенного изотопного состава зимних атмосферных осадков можно приближённо выполнить по изотопному составу снежного покрова.

Благодарности. Работа выполнена при финансовом обеспечении средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Карельского научного центра РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН) и при финансовой поддержке полевых работ РНФ (проект № 18-17-00176).

Acknowledgements. The study was carried out under state order to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Northern Water Problems Institute KRC RAS) and the field work was supported by the Russian Science Foundation (project № 18-17-00176).

Литература

1. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.
2. Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной гео-криологии и гляциологии. М.: изд. МГУ, 2000. 616 с.
3. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. V 16. P. 436–468.
4. Rozanski K., Araguafis-Aragufis L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation // *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Geophys. Monograph Series. Washington DC. 1993. V. 78. P. 1–36. doi: 10.1029/GM078p0001.
5. Beria H., Larsen J.R., Ceperley N.C., Michelon A., Vennemann T., Schaefli B. Understanding snow hydrological processes through the lens of stable water isotopes // *WIREs Water*. 2018. V. 5. № 6. P. 1–23. doi: 10.1002/wat2.1311.
6. Kozachek A., Mikhaleiko V., Masson-Delmotte V., Ekaykin A., Ginot P., Kutuzov S., Legrand M., Lipenkov V., Preunkert S. Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt El'brus ice cores // *Climate of the Past*. 2017. № 13. P. 473–489. doi: 10.5194/cp-13-473-2017.
7. Чижова Ю.Н., Васильчук Дж.Ю., Йошикава К., Буданцева Н.А., Голованов Д.Л., Сорокина О.И., Станюковская Ю.В., Васильчук Ю.К. Изотопный состав снежного покрова Байкальского региона // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 3. С. 56–66. doi: 10.15356/2076-6734-2015-3-55-66.
8. Малыгина Н.С., Папина Т.С., Эйрих А.Н., Жирков А.Ф., Железняк М.Н. Изотопный состав атмос-

References

1. Ferronskij V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery Zemli*. Isotopia of the Earth's hydrosphere. Moscow: Scientific World, 2009: 632 p. [In Russian].
2. Vasil'chuk Yu. K., Kotlyakov V.M. *Osnovy izotopnoj geokriologii i glyaciologii*. Fundamentals of isotopic geocryology and glaciology. Moscow: Publishing of the Moscow University, 2000: 616 p. [In Russian].
3. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964, 16: 436–468.
4. Rozanski K., Araguafis-Aragufis L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Geophys. Monograph Series. Washington DC. 1993, 78: 1–36. doi: 10.1029/GM078p0001.
5. Beria H., Larsen J.R., Ceperley N.C., Michelon A., Vennemann T., Schaefli B. Understanding snow hydrological processes through the lens of stable water isotopes. *WIREs Water*. 2018, 5 (6): 1–23. doi: 10.1002/wat2.1311.
6. Kozachek A., Mikhaleiko V., Masson-Delmotte V., Ekaykin A., Ginot P., Kutuzov S., Legrand M., Lipenkov V., Preunkert S. Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt El'brus ice cores. *Climate of the Past*. 2017, 13: 473–489. doi: 10.5194/cp-13-473-2017.
7. Chizhova Yu. N., Vasil'chuk Dz. Yu., Joshikava K., Budantseva N.A., Golovanov D.L., Sorokina O.I., Stanilovskaya Yu. V., Vasil'chuk Yu. K. Isotopic composition of snow-cover of the Baikal region. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (3): 55–66. doi: 10.15356/2076-6734-2015-3-55-66. [In Russian].

- ферных осадков и снежного покрова в г. Якутске // Наука и образование. 2015. № 3. С. 10–15.
9. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Панеш В. Тренд изотопного состава отдельного зимнего снегопада на северо-востоке Европы // Криосфера земли. 2005. Т. IX. № 3. С. 81–87.
 10. Папина Т.С., Эйрих А.Н., Малыгина Н.С., Эйрих С.С., Останин О.В., Яшина Т.В. Микроэлементный и изотопный состав снежного покрова Катунского природного биосферного заповедника (Республика Алтай) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 41–55. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-41-55.
 11. Виноград Н.А., Токарев И.В., Строганова Т.А. Особенности формирования подземных вод основных эксплуатируемых водоносных горизонтов Санкт-Петербурга и окрестностей по данным о химическом и изотопном составе // Вестн. Санкт-Петербургского гос. ун-та. Науки о Земле. 2019. Т. 64. № 4. С. 575–597. doi: 10.21638/spbu07.2019.405.
 12. Tokarev I.V., Borodulina G.S., Subetto D.A., Voronyuk G.Y., Zobkov M.B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic–White Sea region in the Late Pleistocene–Holocene in groundwater stable isotopes (^2H , ^{18}O) // Quaternary International. 2019. V. 524. P. 76–85. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.022.
 13. Ala-aho P., Welker J.M., Bailey H., Højlund Pedersen S., Kopec B., Klein E., Mellat M., Mustonen K.-R., Noor K., Marttila H. Arctic Snow Isotope Hydrology: A Comparative Snow–Water Vapor Study // Atmosphere. 2021. V. 12. № 2. P. 1–32. doi: 10.3390/atmos12020150.
 14. Лозовик П.А., Зобков М.Б., Бородулина Г.С., Токарев И.В. Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям воды // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 1. С. 91–101. doi: 10.31857/S0321-059646191-101.
 15. Бородулина Г.С., Токарев И.В., Левичев М.А. Оценка компонентов водного баланса Онежского озера по изотопным данным // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы II Междунар. конф. Казань: изд. Академии наук Республики Татарстан, 2019. С. 239–243.
 16. Назарова Л.Е. Атмосферные осадки в Карелии // Тр. Карельского науч. центра РАН. Сер. Лимнология. 2015. № 9. С. 114–121. doi: 10.17076/lim56.
 17. Назарова Л.Е. Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // Изв. РГО. 2014. Т. 146. № 4. С. 27–33.
 18. Лозовик П.А., Потапова И.Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 1. С. 111–118.
 19. Васильчук Ю.К. Новые данные о тенденции и причинах изменения величины дейтериевого
 8. Malygina N.S., Papina T.S., Ejrih A.N., Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N. Isotopic composition of precipitation and snow cover in Yakutsk. *Nauka i obrazovanie*. Science and Education. 2015, 3: 10–15. [In Russian].
 9. Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Yu.N., Papesh V. Isotope composition trend in individual snowfall in northeast of Europe. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2005, IX (3): 81–87. [In Russian].
 10. Papina T.S., Ejrih A.N., Malygina N.S., Ejrih S.S., Ostantin O.V., Yashina T.V. Microelement and stable isotopic composition of snowpack in the Katunsky Biosphere Reserve (Altai Republic). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (1): 41–55. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-41-55. [In Russian].
 11. Vinograd N.A., Tokarev I.V., Stroganov, T.A. Features of groundwater formation of the main aquifers of St. Petersburg and suburbs based on data of chemical and isotope composition. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. Bulletin of the St. Petersburg University. Earth sciences. 2019, 64 (4): 575–597. doi: 10.21638/spbu07.2019.405. [In Russian].
 12. Tokarev I.V., Borodulina G.S., Subetto D.A., Voronyuk G.Y., Zobkov M.B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic–White Sea region in the Late Pleistocene–Holocene in groundwater stable isotopes (^2H , ^{18}O). *Quaternary International*. 2019, 524: 76–85. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.022.
 13. Ala-aho P., Welker J.M., Bailey H., Højlund Pedersen S., Kopec B., Klein E., Mellat M., Mustonen K.-R., Noor K., Marttila H. Arctic Snow Isotope Hydrology: A Comparative Snow–Water Vapor Study. *Atmosphere*. 2021, 12 (2): 1–32. doi: 10.3390/atmos12020150.
 14. Lozovik P.A., Zobkov M.B., Borodulina G.S., Tokarev I.V. Effects of external water exchange between bays of lakes on chemical indicators of water. *Vodnye resursy*. Water Resources. 2019, 46 (1): 94–102. doi: 10.1134/S0097807818050123.
 15. Borodulina G.S., Tokarev I.V., Levichev M.A. Isotopic estimation of the components of the Onega lake water budget. *Ozera Evrazii: problemy i puti ih resheniya. Materialy II Mezhdunarodnoj konferencii*. Lakes of Eurasia: problems and ways to solve them. Proc. of the II Intern. Conf. Kazan: Publishing of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2019: 239–243. [In Russian].
 16. Nazarova L.E. Precipitation over the territory of Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*. Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. 2015, 9: 114–121. doi: 10.17076/lim56. [In Russian].
 17. Nazarova L.E. Variability of average long-term air temperature values in Karelia. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva*. Herald of the Russian Geographical Society. 2014, 146 (4): 27–33. [In Russian].
 18. Lozovik P.A., Potapova I. Yu. Input of chemical substances with atmospheric precipitation onto the terri-

- экспесса в едином снегопаде // Доклады Акад. наук. 2014. Т. 459. № 1. С. 109–111. doi: 10.7868/S0869565214310259.
20. Брезгунов В.С., Есиков А.Д., Ферронский В.И., Сальнова Л.В. Пространственно-временные вариации изотопного состава кислорода атмосферных осадков и речных вод на территории северной части Евразии и их связь с изменением температуры // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 1. С. 99–104.
21. Johnsen S.J., Dansgaard W., White J.W.C. The origin of Arctic precipitation under present and glacial conditions // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 1989. V. 41. № 4. P. 452–468. doi: 10.3402/tellusb.v41i4.15100.
22. Butzin M., Werner M., Masson-Delmotte V., Risi C., Frankenberg C., Gribanov K., Jouzel J., Zakharov V.I. Variations of oxygen-18 in West Siberian precipitation during the last 50 years // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. V. 14. № 11. P. 5853–5869. Doi: 10.5194/acp-14-5853-2014.
23. Электронный ресурс: https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php.
24. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А. Природа некоторых аномалий изотопного состава в снежном покрове горных территорий и в мерзлых толщах // МГИ. 2001. Вып. 91. С. 34–42.
- tory of Karelia. *Vodnye resursy*. Water Resources. 2006, 33 (1): 104–111. doi: 10.1134/S009780780601012X.
19. Vasil'chuk Yu.K. New data on the tendency and causes of deuterium excess variations during one snowfall. *Doklady Rossijskoj Akademii Nauk*. Doklady Earth Sciences. 2014, 459 (1): 109–111. doi: 10.7868/S0869565214310259. [In Russian].
20. Brezgunov V.S., Esikov A.D., Ferronskij V.I., Sal'nova L.V. Temporal-spatial variations of oxygen isotope composition of precipitation and river water in Northern Eurasia in connection with temperature changes. *Vodnye resursy*. Water Resources. 1998, 25 (1): 99–104. [In Russian].
21. Johnsen S.J., Dansgaard W., White J.W.C. The origin of Arctic precipitation under present and glacial conditions. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 1989, 41 (4): 452–468. doi: 10.3402/tellusb.v41i4.15100.
22. Butzin M., Werner M., Masson-Delmotte V., Risi C., Frankenberg C., Gribanov K., Jouzel J., Zakharov V.I. Variations of oxygen-18 in West Siberian precipitation during the last 50 years. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014, 14 (11): 5853–5869. doi: 10.5194/acp-14-5853-2014.
23. https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php.
24. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A.C., Chizhova Yu. N., Budantseva N.A. Origin of some isotope anomalies of snow cover in mountain and in permafrost areas. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2001, 91: 34–42. [In Russian].