

Изотопный состав и регионы-источники зимних осадков в Надымской низменности© 2020 г. Н.С. Малыгина^{1,2*}, А.Н. Эйрих¹, Е.В. Агбальян³, Т.С. Папина¹¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия; ²Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия; ³Научный центр изучения Арктики, Надым, Россия
*natmgn@gmail.com**Isotopic composition and source regions of winter precipitation in the Nadym Lowland**N.S. Malygina^{1,2*}, A.N. Eyrikh¹, E.V. Agbalyan³, T.S. Papina¹¹Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia; ²Altai State University, Barnaul, Russia; ³Scientific Research Centre of the Arctic, Nadym, Russia
*natmgn@gmail.com

Received December 29, 2018 / Revised March 25, 2019 / Accepted June 13, 2019

Keywords: Nadym lowland, stable isotopes of oxygen and hydrogen, winter precipitation.**Summary**

According to the forecast of IPCC (Intergovernmental Panel of the Climate Change), an increase in precipitation is expected in this century in the Arctic. The main reason is intensification of evaporation from waters of the Arctic Ocean opening due to the intensive melting of sea ice. It is supposed that these changes will be most severe in winters in the Arctic regions, which are subject to significant anthropogenic load. In this respect, the intensively developed Nadym Lowland may be considered as a promising area for researches. The results of our study showed that the circulation conditions (primarily cyclones coming from the North Atlantic under the Eastern (E) circulation form of the G.Ya. Vangenheim–A.A. Girs classification) significantly influence on the isotopic composition of precipitation in this region. Thus, in the cold period of 2016–2017, the isotopic composition of precipitation changed for $\delta^{18}\text{O}$ by 21 ‰, and for δD by 167 ‰ (weighted average values $\delta^{18}\text{O} = -22.3$ ‰, $\delta\text{D} = -172.6$ ‰, and $d_{\text{exc}} = 5.6$ ‰). The use of the dew point temperature at the moment of precipitation in the calculations of the isotopic-temperature dependences allows obtaining the following coupling equation: $\delta^{18}\text{O} = 0.67T_{dp} - 15.2$ ($R^2 = 0.67$). On the basis of the joint analysis of synoptic, trajectory and isotopic data, the main regions-sources of atmospheric moisture, precipitated in the Nadym Lowland during the cold period of 2016–2017, were determined. The major contributions were made by the Atlantic Ocean (35.7%), the North Atlantic Ocean and the Arctic Ocean (30.4%), and the Black Sea-Caspian region (20%). The last one is characterized by the most weighted isotopic composition. Inland source regions have contributed the least to precipitation (slightly larger 10%), and their lightweight isotopic composition is related to cryogenic fractionation.

Citation: Malygina N.S., Eyrikh A.N., Agbalyan E.V., Papina T.S. Isotopic composition and source regions of winter precipitation in the Nadym Lowland. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (1): 98–108. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420010026.

Поступила 29 декабря 2018 г. / После доработки 25 марта 2019 г. / Принята к печати 13 июня 2019 г.

Ключевые слова: зимние атмосферные осадки, Надымская низменность, стабильные изотопы кислорода и водорода.

В результате совместного анализа синоптических, траекторных и изотопных данных определены основные регионы-источники поступления атмосферной влаги, выпавшей в виде осадков в Надымской низменности. Наибольший вклад вносит Атлантический океан (35,7%), меньше – северная часть Атлантического океана и Северный Ледовитый океан (30,4%), а также Черноморско-Каспийский регион (20%) и внутриконтинентальные регионы (немногом более 10%).

Введение

Современные климатические модели прогнозируют в ближайшее столетие значительное увеличение выпадающих в Арктике атмосферных осадков, в первую очередь за счёт усиления испарения с возрастающей акватории Северного Ледовитого океана в результате интенсивного таяния морских льдов [1]. В арктическом регионе холодный сезон

продолжителен, поэтому предполагается, что основной рост атмосферных осадков будет преимущественно в зимний период [2]. Это подтверждают уже реализованные оценки многолетних изменений количества атмосферных осадков, проведённые в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте (АНИИ). Так, среднегодовое количество осадков за последние десятилетия в Северной полярной области (СПО)



Рис. 1. Местоположение точки отбора проб атмосферных осадков в Надымской низменности (1) и станций сети Global Network of Isotopes in Precipitation – GNIP (2)

Fig. 1. The location of sampling points of precipitation in Nadym lowland (1) and the stations of Global Network of Isotopes in Precipitation – GNIP (2)

увеличилось на 5,5% по сравнению со значениями климатической нормы (1961–1990 гг.), причём это увеличение полностью обеспечено за счёт роста количества атмосферных осадков в холодный период (в среднем на 11%). Максимальный рост количества атмосферных осадков отмечается в южных частях Северо-Европейского (30–60° в.д.) и Западно-Сибирского (60–100° в.д.) районов СПО – 39,7 и 27,1% соответственно [3].

В работах, посвящённых исследованиям климатических и гидрологических изменений в Западно-Сибирском районе СПО, показано усиление влияния антропогенной нагрузки на климатические и гидрологические условия в регионе, особенно в наиболее интенсивно осваиваемых районах СПО, например, в бассейне р. Надым [4]. Данный речной бассейн полностью расположен на территории Надымской низменности, т.е. на плоской равнине, характеризующейся незначительным расчленением рельефа (от 5 до 20 м). С юга он ограничен Сибирскими увалами, с севера – устьем

р. Обь, переходящим в Обскую губу, на западе низменность обрамляется Полуёйской возвышенностью, а на востоке – междуречными увалами и Тазовско-Пурской низменностью (рис. 1) [5]. Таким образом, Надымская низменность не имеет значимых орографических барьеров для прохождения воздушных масс с севера и юга, что способствует развитию меридиональной формы циркуляции, которая определяет резкие и быстрые изменения синоптических обстановок, влияющих на режим увлажнения в регионе.

В последние годы активное использование изотопологов воды ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) в качестве трасеров климатических и гидрологических циклов способствовало уточнению путей переноса влаги в атмосфере и реализации количественных оценок влияния циркуляционных условий на режим увлажнения. В глобальном масштабе соотношение стабильных изотопов кислорода $\delta^{18}\text{O}$ и дейтерия δD в атмосферных осадках описывается уравнением $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$, которое называется *глобальной линией метеорных вод* – ГЛМВ [6–8]. Отклонения изотопологов от этой линии позволяют оценивать региональные процессы изотопного фракционирования, а их математическое выражение представлено в уравнениях *локальных линий метеорных вод* – ЛЛМВ. Предложенный В. Дансгором (1964 г.) на основе ГЛМВ расчётный показатель дейтериевый эксцесс ($d_{\text{exc}} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$) используют как для определения направленности процессов изотопного фракционирования в осадках, так и регионов их формирования [9]. Для наиболее достоверной индикации регионов-источников осадков дополнительно применяют рассчитанные на основе данных реанализа обратные траектории движения воздушных масс [10].

Основная цель настоящей работы – синоптический и траекторный анализы условий выпадения зимних атмосферных осадков в Надымской низменности с последующим определением основных регионов-источников их поступления при использовании данных изотопного анализа.

Методика исследования

Траекторный анализ, погодные и синоптические условия. Надымская низменность относится к атлантико-евразийскому естественному синоптическому району и характеризуется очень

сложными метеорологическими условиями, а именно: она может испытывать влияние как исландского минимума или азорского максимума, так и азиатского антициклона. В соответствии с классификацией Г.Я. Вангенгейма–А.А. Гирса, основанной на выделении квазиоднородных циркуляционных периодов с однонаправленным развитием крупномасштабных процессов, для атлантико-евразийского синоптического района установлено три основных состояния атмосферы: зональные процессы с термобарическими волнами малой амплитуды – *западная форма циркуляции «W»* и два типа меридиональных процессов с волнами большой амплитуды – *меридиональная «С»* и *восточная «Е» формы циркуляции*. В настоящее время оценку развития циркуляционных условий, а именно элементарных синоптических процессов в Северном полушарии в соответствии с классификацией Вангенгейма–Гирса, проводят специалисты АНИИ [11].

Для анализа циркуляционных условий мы использовали данные Каталога макросиноптических процессов по классификации Вангенгейма–Гирса, содержащие внутримесячную детализацию атмосферных процессов по элементарным синоптическим процессам. Для оценки погодных и синоптических условий в период выпадения атмосферных осадков дополнительно привлекали данные метеонаблюдений, полученные непосредственно в точке отбора, а также материалы Росгидромета [12] и Национального управления океанических и атмосферных исследований – National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [13]. Траекторный анализ выполняли при помощи модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [14]. Исходной метеорологической информацией служил архив GDAS, имеющий высокое пространственное разрешение ($0,5^\circ$) и покрывающий временной интервал с 1 сентября 2007 г. по настоящее время. Обратные траектории движения воздушных масс, вызывающих осадки, рассчитывали с одинаковым временным масштабом (равным продолжительности одного естественно-синоптического периода) для каждого анализируемого случая. Причём начало построения траекторий соответствовало моменту начала анализируемого события, а высота траектории – высоте нижней границы облачности в момент выпадения атмо-

сферных осадков. На следующем этапе с целью повышения информативности и удобства работы все полученные траектории сводили в единый каталог на основе Google Earth [14].

Пробоотбор и анализ атмосферных осадков.

Отбор проб атмосферных осадков вели в холодный период (с 23 ноября 2016 г. по 16 апреля 2017 г.) на стационарной площадке в Надымской низменности ($65^\circ 32'$ с.ш. и $72^\circ 31'$ в.д.) (см. рис. 1). За изучаемый временной интервал сотрудниками «Научного центра изучения Арктики» (Ямало-Ненецкий автономный округ) непосредственно после окончания снегопада было отобрано 35 проб твёрдых атмосферных осадков объёмом более 1 мм в.э. После отбора пробы плавили при комнатной температуре в плотно закрытых пластиковых пакетах, а затем переносили в герметично закрывающиеся пробирки, которые до начала анализа хранили в холодильнике при температуре $5-8^\circ\text{C}$. Изотопный анализ проб талой воды атмосферных осадков выполняли в Химико-аналитическом центре Института водных и экологических проблем СО РАН. Для количественного определения соотношения изотопного состава $\delta^{18}\text{O}$ и δD пробы предварительно фильтровали через мембранный фильтр (с использованием стерильных шприцев и шприцевых насадок Minisart NML Plus) с диаметром пор $0,45\text{ мкм}$. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) определяли методом лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на приборе PICARRO L2130-i (WS-CRDS). Точность измерения δD и $\delta^{18}\text{O}$ (1σ , $n = 5$) составила $\pm 0,4$ и $\pm 0,1\%$ соответственно. В качестве внутренних стандартов использовали пробы воды, откалиброванные относительно Международного стандарта V-SMOW-2 (МАГАТЭ). Средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$, δD и d_{exc} в атмосферных осадках рассчитывали с учётом вклада каждого индивидуального снегопада в общее количество осадков по формуле $X = \Sigma(X_i \times A_i / A)$, где X – средневзвешенное значение $\delta^{18}\text{O}$, δD или d_{exc} ; X_i – значение $\delta^{18}\text{O}$, δD или d_{exc} в осадках i -го снегопада; A_i – количество осадков в i -м снегопаде, мм в.э.; A – общее за исследуемый период количество осадков, мм в.э.

В настоящей работе для идентификации основных регионов-источников атмосферной влаги, выпадающей в виде осадков, выполнен широкий комплекс исследований. Первоначально были отобраны пробы атмосферных осадков

с их последующим изотопным анализом ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) и расчётом d_{exc} . Затем анализировали погодные и синоптические условия и определяли высоты, соответствующие нижней границе облачности, для расчёта на этих высотах обратных траекторий движения воздушных масс, обуславливающих выпадение осадков. После этого оценивали распространение снежного и ледяного покрова в районах потенциальных источников влаги. На следующем этапе устанавливали потенциальные регионы-источники влаги, выпавшей в виде осадков, с учётом данных изотопного, траекторного и синоптического анализов. И потом рассчитывали вклад осадков, поступивших из выделенных регионов-источников атмосферной влаги, в общее количество осадков, выпавших в регионе за изучаемый период. Ранее данный подход частично был реализован для идентификации регионов-источников влаги, выпавшей в виде осадков на территории Якутии и в предгорьях Алтая [15, 16].

Результаты и их обсуждение

Погодные условия и синоптические процессы зимнего периода 2016/17 г. Атмосферная циркуляция и погодные условия каждого конкретного периода могут существенно отличаться как от средних многолетних значений, так от друг друга. Число дней с разной формой циркуляции за месяцы холодного периода 2016/17 г. в атлантико-евразийском синоптическом районе, к которому относится Надымская низменность, приведено в табл. 1. Так, в ноябре 2016 г. отмечалась повышенная повторяемость процессов восточной (Е) формы циркуляции, в то время как в декабре этого же года повторяемость западной (W) и меридиональной (С) форм циркуляций существенно превысила норму (1990–2014 гг.) на восемь и четыре дня соответственно. В начале (январь–март) 2017 г. атмосферные процессы в этом синоптическом районе характеризовались повышенной повторяемостью западной формы циркуляции (W), но уже в апреле аналогичное повышение было характерно для меридиональной формы (С). Таким образом, в течение анализируемого холодного периода 2016/17 г. максимальные превышения числа дней наблюдались для западной формы циркуляции (W) в

Таблица 1. Число дней с различной формой циркуляции (по классификации Вангенгейма–Гирса) за месяцы в холодный период 2016/17 г. (числитель) и 1990–2014 гг. (знаменатель) [11]

Период	Форма циркуляции		
	западная W	меридиональная С	восточная Е
Ноябрь	8/11	7/6	15/13
Декабрь	18/10	9/5	4/16
Январь	15/12	7/6	9/13
Февраль	13/9	2/6	13/13
Март	16/10	8/8	16/13
Апрель	10/10	11/11	9/9
Среднее	13/10	7/7	11/13

декабре 2016 г. за счёт снижения процессов восточной формы (Е). В целом во время холодного периода 2016/17 г. число дней с западной формой циркуляции (W) превысило среднемесячные (для 1990–2014 гг.) значения на три дня.

Согласно данным ближайшей к месту отбора проб метеорологической станции (ГМС) Надым ($65^{\circ}28'$ с.ш. и $72^{\circ}33'$ в.д.), с ноября 2016 г. по апрель 2017 г. в Надымской низменности температура и количество осадков незначительно отличались от средних значений этих параметров за 1980–2000 гг. Так, средняя температура анализируемого периода составила $-17,6^{\circ}\text{C}$, а средние многолетние значения за 1980–2000 гг. $-17,1^{\circ}\text{C}$, количество выпавших осадков было меньше нормы (127,2 мм) только на 25 мм [12, 13].

Для оценки зависимости изменений изотопного состава атмосферных осадков от условий их формирования (в первую очередь, температуры и количества осадков) мы проанализировали погодные условия во время выпадения осадков по данным той же ГМС Надым. Установлено, что средняя температура периодов, при которой выпадали атмосферные осадки, составила $-9,9^{\circ}\text{C}$, что практически в два раза теплее, чем в среднем за анализируемый холодный сезон ($-17,6^{\circ}\text{C}$); минимальная температура была равна $-24,9^{\circ}\text{C}$ (23.12.2016 г.), а максимальная $-0,7^{\circ}\text{C}$ (30.03.2017 г.). При этом за холодный период 2016/17 г. выпало 72 мм атмосферных осадков, объём которых превышал 1 мм за время их выпадения, а наибольшее количество отмечалось 23 декабря 2016 г. и 28 февраля 2017 г. — по 5 мм (рис. 2) [12, 13]. Таким образом, анализируемый холодный период в Надымской низменности по данным ГМС Надым незначительно

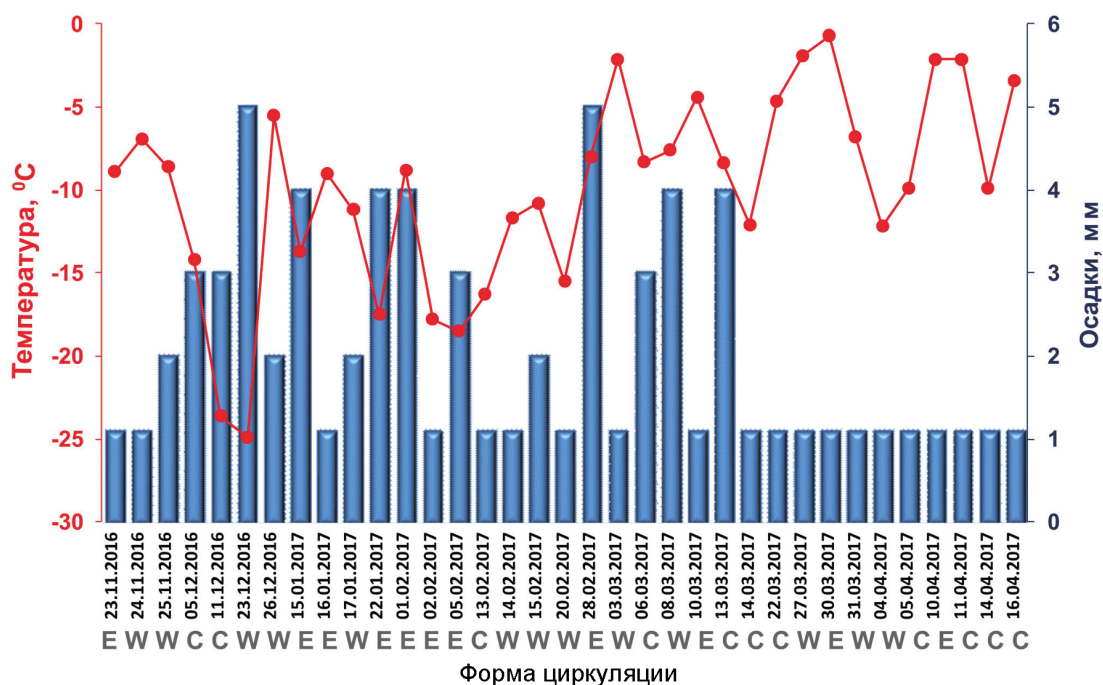


Рис. 2. Атмосферные осадки, температура воздуха [12, 13] и макросиноптические процессы (по классификации Вангенгейма—Гирса) [11] для дат выпадения атмосферных осадков в течение холодного периода 2016/17 г.

Fig. 2. Precipitation, air temperature [12, 13] and macro-synoptic processes (according to the classification of Van-genheim—Girs) [11] for the dates of precipitation during the cold period 2016/17

отличался от средних значений холодного периода за 1980–2000 гг. Совместный анализ — расчёт коэффициентов корреляций циркуляционных условий выпадения осадков, их количества и температуры — не показал значимых результатов (R^2 составило менее 0,2).

Изотопный состав атмосферных осадков.

Изотопный анализ проб атмосферных осадков, отобранных в Надымской низменности в холодный период 2016/17 г., показал, что изотопный состав варьирует от $-12,6$ до $-33,5$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от $-92,2$ до $-259,0$ ‰ для δD . Соотношения стабильных изотопов в атмосферных осадках исследуемого холодного периода согласуются с немногочисленными в пространственном и временном отношении ранее полученными значениями на наиболее близко расположенных станциях Global Network of Isotopes in Precipitation — GNIP [17], хотя они изотопно облегчены на $1-3$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ (табл. 2). Это может быть обусловлено тем, что пробы отбирались в разные годы: на станциях GNIP — с 1980 по 2000 г., а в Надымской низменности — в 2016/17 г., а также удалённостью некоторых станций GNIP до 700 км. Отбор проб в разные

годы и месторасположение также могли определить отличия (≈ 4 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$) результатов, полученных в этой работе, от ранее опубликованных другими авторами (см. табл. 2) для сопредельных территорий. Рассчитанная локальная линия метеорных вод для атмосферных осадков, отобранных в Надымской низменности (холодный период 2016/17 г.), имеет следующий вид: $\delta\text{D} = 7,86^{18}\text{O} + 2,4$ ($R^2 = 0,99$). При этом угловой коэффициент ЛЛМВ близок к коэффициенту ГЛМВ, равному 8 (рис. 3), что указывает на преимущественное влияние акватории Атлантического океана как основного источника формирования атмосферной влаги, выпадающей в виде осадков в изучаемом регионе. Однако широкий разброс значений изотопного состава зимних атмосферных осадков, выпадающих в Надымской низменности, показанный на рис. 3, может быть обусловлен как изменениями условий окружающей среды, например циркуляционными или температурными, так и/или сменой регионов-источников поступления влаги.

Связь изотопного состава атмосферных осадков с циркуляционными и температурными условиями. Для оценки возможной связи циркуляци-

Таблица 2. Изотопный состав атмосферных осадков, отобранных в холодные периоды в Надымской низменности и на сопредельных территориях, ‰

Место отбора проб	$\delta^{18}\text{O}$	δD	d_{exc}
Надымская низменность [результаты настоящей работы]	-22,3	-172,6	5,6
Амерма (GNIP) [17]	$-18,2 \pm 1,5$	$-135,9 \pm 7,3$	$9,7 \pm 7,3$
Дудинка (GNIP) [17]	$-19,6 \pm 3,9$	$-147,0 \pm 27,5$	$10,1 \pm 7,8$
Печора (GNIP) [17]	$-18,6 \pm 2,1$	$-136,9 \pm 21,4$	$12,1 \pm 10,1$
Салехард (GNIP) [17]	$-21,5 \pm 2,4$	$-168,9 \pm 18,2$	$3,1 \pm 2,4$
Ханты-Мансийск (GNIP) [17]	$-19,3 \pm 2,7$	$-154,5 \pm 22,2$	$0 \pm 2,1$
Север Европейской территории СССР [18]	-18,4	—*	
Печора [19]	-23,7		
Марре-Сале [20]	-21,0		

*Прочерк – отсутствие данных.

онных условий с изменением изотопного состава атмосферных осадков, отобранных на изучаемой территории, проанализированы их корреляционные зависимости. Установлено отсутствие значимой связи (R^2 равно менее 0,3) между изменениями макросиноптических процессов (по классификации Вангенгейма–Гирса) и изотопным составом атмосферных осадков холодного периода 2016/17 г. Однако рассчитанные уравнения ЛЛМВ атмосферах осадков, выпадавших при

Таблица 3. Локальные линии метеорных вод атмосферных осадков в Надымской низменности при соответствующих формах атмосферной циркуляции

Форма циркуляции	Уравнение	Коэффициент детерминации R^2
Восточная E	$\delta\text{D} = 8,0\delta^{18}\text{O} + 6,47$	0,99
Меридиональная C	$\delta\text{D} = 7,49\delta^{18}\text{O} - 6,28$	0,98
Западная W	$\delta\text{D} = 7,91\delta^{18}\text{O} + 3,22$	0,99

том или ином типе циркуляций, показали следующее (табл. 3). Угловым коэффициентом ЛЛМВ осадков, выпадавших при восточной (E) форме циркуляции в Надымской низменности, имеет значение равное восьми, что и величина углового коэффициента ГЛМВ (см. табл. 3). Это вполне объяснимо, так как при восточной форме циркуляции циклоны с севера Атлантического океана смещаются по высокоширотным траекториям через изучаемый район в восточный сектор Арктики, а влага, выпадающая с атмосферными осадками при данном типе циркуляции, поступает преимущественно с акватории Атлантического океана, которая считается основным её источником в северной части Евразии [21].

Вариации изотопного состава атмосферных осадков могут быть обусловлены изменениями не только циркуляционных, но и температурных условий. Глобальная зависимость между средней годовой температурой воздуха и изо-

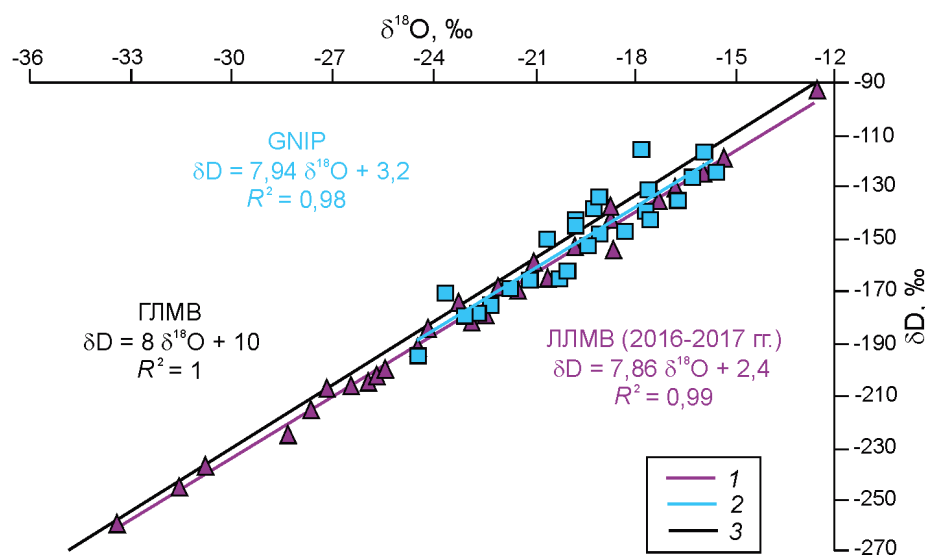


Рис. 3. Локальные линии метеорных вод (ЛЛМВ) атмосферных осадков в Надымской низменности (1) и по данным станций GNIP (2), глобальная линия метеорных вод (3) (ГЛМВ)

Fig. 3. Local Meteoric Water Line (LMWL) of precipitation in Nadym lowland (1) and according to GNIP stations (2), Global Meteoric Water Line (3) (GMWL)

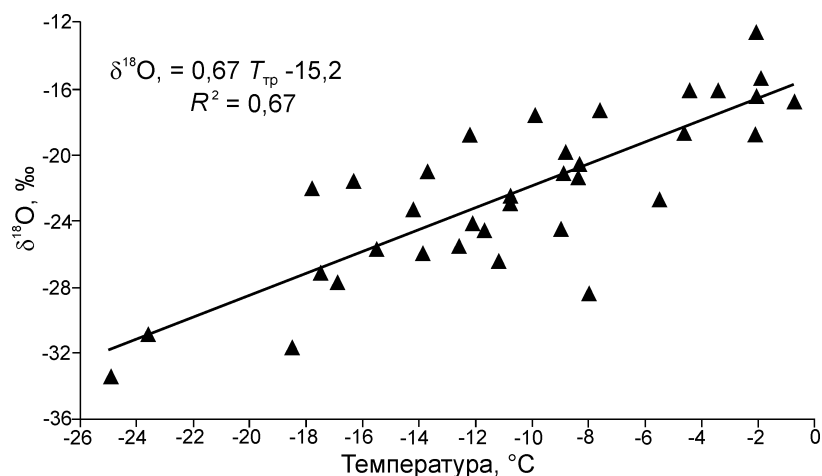


Рис. 4. Соотношение изотопов кислорода в атмосферных осадках и температуры точки росы в момент их выпадения на территории Надымской низменности (холодный период 2016/17 г.)

Fig. 4. The relations of oxygen isotopes in precipitation and dew point temperature at the time of their precipitation in Nadym lowland (cold period 2016/17)

топным составом атмосферных осадков по данным ГМС, расположенных как в тропических, так и в полярных широтах, показана В. Дансгром [7] ещё в 1964 г. Причём наиболее тесная связь между температурой воздуха и изотопным составом осадков наблюдается в холодный период года в высоких широтах [22], а величина $\delta^{18}\text{O}$ варьирует пропорционально изменению температуры. Для изучения зависимости между изотопным составом анализируемых атмосферных осадков и приземной температурой воздуха в момент их выпадения мы получили уравнение связи изотопного состава осадков от температуры, наблюдаемой на ГМС Надым, которое имеет следующий вид: $\delta^{18}\text{O} = 0,93T + 4,3$, коэффициент детерминации – очень низкий ($R^2 = 0,18$).

Особенности использования изотопно-температурного метода подробно описаны в работе А.А. Екайкина [23]. Чаще всего изотопный состав атмосферных осадков сопоставляют с приземной температурой воздуха, однако физически он связан с температурой конденсации в облаках, которая отличается от приземной температуры воздуха. Поэтому, например, для палеоклиматической реконструкции по данным глубинного ледяного ядра со станции Восток было предложено учитывать не только приземную температуру воздуха, но и температуру конденсации [23]. Известно, что точка росы – это температура, до которой должен охладиться воздух, чтобы содержащийся в нём пар достиг со-

стояния насыщения и начал конденсироваться; именно после наступления конденсации [24] сразу начинается выпадение осадков. Поэтому авторы настоящей статьи при расчётах изотопно-температурных зависимостей использовали имеющиеся по ГМС Надым данные о температуре точки росы в момент выпадения атмосферных осадков, т.е. температуру конденсации, которая позволила получить следующее уравнение соотношения изменений изотопного состава атмосферных осадков и температуры точки росы $T_{\text{тр}}$ в момент их выпадения: $\delta^{18}\text{O} = 0,67T_{\text{тр}} - 15,2$ (рис. 4). Полученное уравнение имеет значимый коэффициент детерминации $R^2 = 0,67$, а коэффициент связи изменений $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках и температуры точки росы равен $0,67 \text{ ‰}/^\circ\text{C}$. Данный результат хорошо согласуется с ранее опубликованными результатами, где угол наклона изотопно-температурных зависимостей составляет для полярных широт в зимний период $0,67 \text{ ‰}/^\circ\text{C}$ [25], а для районов Северной Атлантики – $0,69 \text{ ‰}/^\circ\text{C}$ [7]. При этом рассчитанные значения близки и к значению коэффициента связи температур и изотопного состава осадков для высоких широт, равному $0,71 \text{ ‰}/^\circ\text{C}$ [25].

Траекторный анализ и идентификация регионов-источников. Для идентификации регионов-источников атмосферной влаги, выпадавшей в виде осадков в Надымской низменности, рассчитанные для нижней границы облачности об-

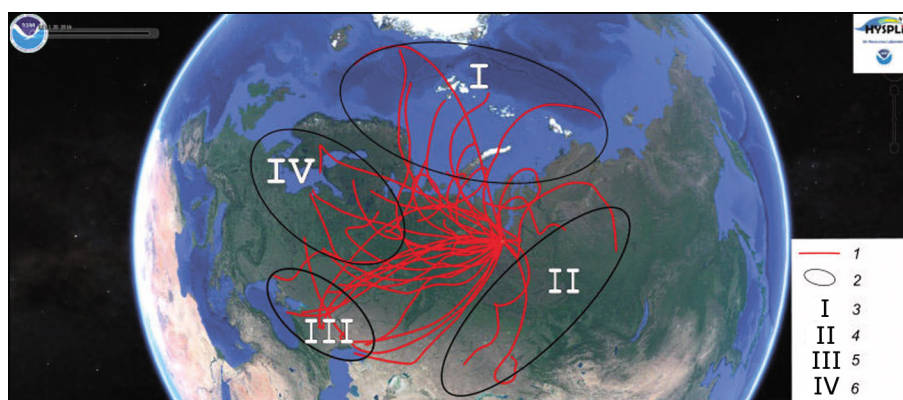


Рис. 5. Обратные траектории движения воздушных масс, обуславливающих атмосферные осадки в Надымской низменности (холодный период 2016/17 г.).

1 – обратные траектории движения воздушных масс; 2 – регионы-источники атмосферной влаги, выпадавшей в виде осадков в Надымской низменности; 3 – I регион (северная часть Атлантического океана и Северный Ледовитый океан); 4 – II регион (Внутриконтинентальные источники); 5 – III регион (Черноморско-Каспийский); 6 – IV регион (Атлантический океан)

Fig. 5. Backward trajectories of air masses responsible for precipitation in Nadym lowland (cold period 2016–2017).

1 – backward trajectories of air masses; 2 – regions-sources of atmospheric moisture that fall as precipitation in Nadym lowland; 3 – I region (North Atlantic Ocean and Arctic Ocean); 4 – II region (Inland regions); 5 – III region (Black Sea-Caspian region); 6 – IV region (Atlantic Ocean)

ратные траектории движения воздушных масс были приведены к одному масштабу для создания единого каталога на основе Google Earth (рис. 5). Используя данные с суточным разрешением по распространению снежного и ледяного покровов в Северном полушарии [13], было оценено наличие ледяного покрова на водоёмах и снежного покрова на подстилающей поверхности в районах потенциальных регионов-источников влаги. Результаты показали, что акватории Атлантического океана и Черномор-

ско-Каспийского региона на даты формирования над ними воздушных масс, обусловивших атмосферные осадки в Надымской низменности, были открыты, в то время как для севера Атлантического и Северного Ледовитого океанов часто было характерно наличие установившегося ледяного покрова (рис. 6).

Основываясь на данных траекторного, погодного и синоптического анализов, картах распространения снежного и ледяного покрова, установлены потенциальные регионы-источни-

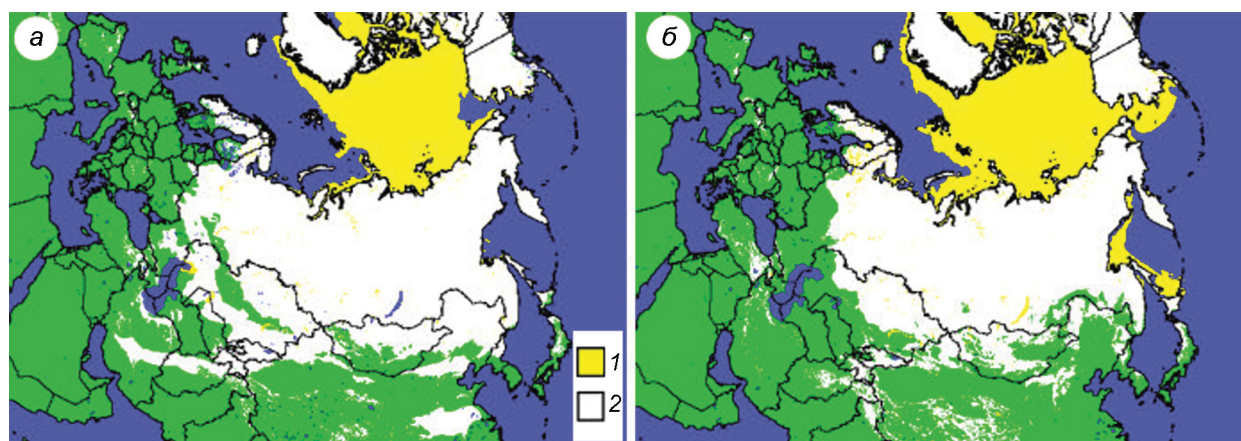


Рис. 6. Распространение снежного и ледяного покровов 24.12.2016 г. (а) и 27.03.2017 г. (б) по данным [13]: 1 – распространение ледяного покрова; 2 – распространение снежного покрова

Fig. 6. Snow and ice covers on 24.12.2016 (a) and 27.03.2017 (b) according to [13]:

1 – ice cover; 2 – snow cover

Таблица 4. Средневзвешенные значения изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, δD и d_{exc} , ‰) атмосферных осадков и их вклад (%) в общее количество осадков в Надымской низменности (за холодный период 2016/17 г.)

Регион-источник и его номер	$\delta^{18}\text{O}$	δD	d_{exc}	Вклад в количество осадков
I. Северная часть Атлантического океана и Северный Ледовитый океан	-22,7	-191,1	9,5	31,4
II. Внутриконтинентальные источники	-25,3	-190,5	11,7	12,9
III. Черноморско-Каспийский регион	-19,4	-150,4	4,6	20,0
IV. Атлантический океан	-23,7	-198,8	9,1	35,7

ки влаги, выпадавшей в виде осадков в Надымской низменности, которые затем были верифицированы результатами изотопного анализа атмосферных осадков и сопоставлены с опубликованными данными по изотопному составу природных вод в потенциальных регионах-источниках. После этого были рассчитаны средневзвешенные значения изотопного состава атмосферных осадков, поступавших из четырёх основных регионов-источников, и процентный вклад каждого источника в общее количество осадков, выпавших на исследуемой территории в 2016/17 г. (табл. 4).

Наиболее утяжелённый изотопный состав осадков относительно других источников характерен для осадков, обусловленных воздушными массами из *Черноморско-Каспийского региона* (III группа регионов-источников), а именно: -19,4 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$; -150,4 ‰ для δD ; 4,6 ‰ для d_{exc} . Полученные результаты хорошо согласуются с ранее опубликованными данными по изотопному составу природных вод в западной части Центральной Азии, а значения d_{exc} укладываются в рассчитанные интервалы для этого региона (от +5 до -3 ‰) [26]. При этом вклад данного региона, определившего поступление влаги, выпадавшей в виде осадков в течение холодного периода 2016/17 г. в Надымской низменности, составил 20% общего количества. Атмосферные осадки, поступление которых связано с воздушными массами с севера Атлантического океана и Северного Ледовитого океана, а также непосредственно с акватории Атлантического океана (I и IV группа регионов-источни-

ков) имели самые близкие значения d_{exc} к значению d_{exc} ГЛМВ, равному 10 ‰, и составили 9,5 и 9,1 ‰ соответственно. Осадки, обусловленные влиянием этих двух регионов, были изотопно облегчены (≈ 3 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и ≈ 40 ‰ для δD) относительно осадков, поступивших с воздушными массами из Черноморско-Каспийского региона, а их суммарный вклад составил более 67% (см. табл. 4). Минимальный вклад (около 13%) и самый облегчённый изотопный состав характерны для атмосферных осадков, связанных с влиянием *Внутриконтинентальных регионов-источников* (II группа). При этом самые высокие значения d_{exc} , равные 11,7 ‰, характерны именно для этого региона; известно, что d_{exc} в атмосферных осадках увеличивается при низких температурах воздуха [23], когда происходят процессы криогенного фракционирования.

Выводы

1. Изотопный состав атмосферных осадков, отобранных в Надымской низменности в течение холодного периода 2016/17 г., изменялся для $\delta^{18}\text{O}$ в пределах 21 ‰, а для δD – 167 ‰. Рассчитанные средневзвешенные значения составили для $\delta^{18}\text{O}$ = -22,3 ‰, δD = -172,6 ‰ и d_{exc} = 5,6 ‰ и были изотопно немного легче относительно ранее полученных значений по данным сети GNIP.

2. Уравнение локальной линии метеорных вод зимних осадков в Надымской низменности имеет следующий вид: $\delta^2\text{D} = 7,86\delta^{18}\text{O} + 2,4$. При этом угол наклона близок как к глобальной, так и к локальной линиям метеорных вод, рассчитанным по имеющимся данным станций GNIP, расположенных на сопредельных с изучаемым регионом территориях. Это позволяет считать, что на формирование изотопного состава атмосферных осадков, выпадающих на изучаемой территории в зимний период, преимущественное влияние оказывает атлантическая влага.

3. Циркуляционные условия значимо обуславливают изменения изотопного состава зимних атмосферных осадков в Надымской низменности. В первую очередь, это циклоны, приходящие с северной части Атлантического океана при восточной (E) форме циркуляции (по классификации Вангенгейма–Гирса),

что подтверждает значение угла наклона, равное восьми, как и в уравнении ГЛМВ, характерном для атлантических океанических вод.

4. Использование при расчётах изотопно-температурных зависимостей температуры точки росы в момент выпадения осадков позволило получить следующее уравнение связи: $\delta^{18}\text{O} = 0,67 T_{\text{тр}} - 15,2$ ($R^2 = 0,67$).

5. На основе совместного анализа имеющих синоптических, траекторных и изотопных данных определены основные регионы-источники поступления атмосферной влаги, выпавшей в виде осадков в холодный период 2016/17 г. в Надымской низменности:

а) наибольший вклад внесли Атлантический океан (IV регион-источник) – 35,7%, северная часть Атлантического океана и Северный Ледовитый океан (I регион-источник) – 31,4%, ко-

торые в сумме составили более 67%. Превалирующее влияние Атлантического океана также показано при расчётах локальной линии метеорных вод и оценке влияния циркуляционных условий в регионе;

б) пятую часть общего количества осадков (20%) определил Черноморско-Каспийский регион (III регион-источник), для которого характерен наиболее утяжелённый изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -19,4 \text{‰}$, $\delta\text{D} = -150,4 \text{‰}$ и $d_{\text{exc}} = 4,6 \text{‰}$) относительно атмосферных осадков, поступавших из других регионов-источников;

в) Внутриконтинентальные регионы-источники (II группа) внесли наименьший вклад в общее количество поступивших осадков (более 10%), а их облегчённый изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -25,3 \text{‰}$, $\delta\text{D} = -190,5 \text{‰}$ и $d_{\text{exc}} = 11,7 \text{‰}$) связан с криогенным фракционированием.

Литература

1. *Bintanja R., Selten F.M.* Future increases in Arctic precipitation linked to local evaporation and sea-ice retreat // *Nature*. 2014. V. 509. P. 479–482.
2. Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Eds: Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., Waterfield T. Geneva: World Meteorological Organization. 2018. 32 p.
3. Обзор гидрометеорологических процессов в Северное полярной области / Под ред. И.Е. Фролова. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та Петра Великого, 2017. 96 с.
4. *Zakharova E.A., Kouraev A.V., Biancamaria S., Kolmakova M.V., Mognard N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N., Decharme B.* Snow cover and spring flood flow in the northern part of Western Siberia (the Poluy, Nadym, Pur and Taz rivers) // *Journ. of Hydrometeorology*. 2011. V. 2. P. 1498–1511. doi: 10.1175/JHM-D-11-017.1.
5. Физико-географическое районирование Тюменской области / Под ред. Н.А. Гвоздецкого. М.: Изд-во МГУ, 1973. 246 с.
6. *Craig H.* Isotopic variations in meteoric waters // *Science*. 1961. V. 133. P. 1702–1703.
7. *Rozanski K., Araguifis Araguifis L., Gonfiantini R.* Isotopic patterns in modern global precipitation // *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Geophys. Monography. 1993. V. 78. P. 1–36.
8. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. V. 16. P. 436–468.

References

1. *Bintanja R., Selten F.M.* Future increases in Arctic precipitation linked to local evaporation and sea-ice retreat. *Nature*. 2014, 509: 479–482.
2. Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Eds. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., Waterfield T. Geneva, World Meteorological Organization, 2018: 32 p.
3. *Obzor gidrometeorologicheskikh protsessov v Severnoy polyarnoy oblasti*. Overview of hydrometeorological processes in Northern polar region. Ed. I.E. Frolova. Sankt-Petersburg: Publ. Politehnicheskogo universiteta Petra Velikogo, 2017: 96 p. [In Russian].
4. *Zakharova E.A., Kouraev A.V., Biancamaria S., Kolmakova M.V., Mognard N.M., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N., Decharme B.* Snow cover and spring flood flow in the northern part of Western Siberia (the Poluy, Nadym, Pur and Taz rivers). *Journ. of Hydrometeorology*. 2011, 2: 1498–1511. doi: 10.1175/JHM-D-11-017.1.
5. *Fiziko-geograficheskoe rayonirovanie Tyumenskoy oblasti*. Physical and geographical zoning of Tyumen region. Ed. N.A. Gvozdeckiy. M: Moscow State University, 1973: 246 p. [In Russian].
6. *Craig H.* Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. 1961, 133: 1702–1703.
7. *Rozanski K., Araguifis Araguifis L., Gonfiantini R.* Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotopic Records*. Geophys. Monography. 1993, 78: 1–36.
8. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964, 16: 436–468.

9. Froehlich K., Gibson J.J., Aggarwal P.K. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance // Study of environmental change using isotope techniques. Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2002. P. 54–65.
10. Puntsag T., Mitchell M.J., Campbell J.L., Klein E.S., Likens G.E., Welker J.M. Arctic Vortex changes alter the sources and isotopic values of precipitation in northeastern US // Scientific Reports. 2016. V. 6. doi: 10.1038/srep22647.
11. Электронный ресурс: <http://www.aari.ru>.
12. Электронный ресурс: <http://www.meteorf.ru>.
13. Электронный ресурс: <http://www.noaa.gov>.
14. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website. College Park, MD, NOAA Air Res. Laboratory, 2015. <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
15. Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Курепина Н.Ю., Папина Т.С. Изотопный состав зимних атмосферных осадков и снежного покрова в предгорьях Алтая // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 57–68. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-57-68.
16. Папина Т.С., Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Галанин А.А., Железняк М.Н. Изотопный состав и источники атмосферных осадков в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 2. С. 60–69.
17. Электронный ресурс: http://www-naweb.iaea.org/parc/ih/IHS_resources_gnip.html.
18. Брезгунов В.С., Евсиков А.Д., Ферронский В.И., Сальнова Л.В. Пространственно-временная вариация 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.
19. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Панеш В. Тренд изотопного состава отдельного снегопада на северо-востоке Европы // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 3. С. 81–87.
20. Облогов Г.Е. Эволюция криолитозоны побережья и шельфа Карского моря в позднем неоплейстоцене-голоцене: Дис. на соиск. уч. степ. канд. геол.-мин. наук. Тюмень: Ин-т криосферы Земли СО РАН, 2016. 197 с.
21. Numaguti A. Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model // Journ. of Geophys Research. 1999. V. 104. P. 1957–1972.
22. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.
23. Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. СПб.: ААНИИ, 2016. 63 с.
24. Панин Б.Д., Репинская Р.П. Прогноз влажности, облачности и осадков. Л.: Ленинградский гидромет. ин-т, 1982. 46 с.
25. Fricke H., O'Neil J. The correlation between $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time // Earth and Planetary Science Letters. 1999. V. 170. P. 181–196.
26. Oberhänsli H., Weise S.M., Stanichny S. Oxygen and hydrogen isotopic water characteristics of the Aral Sea, Central Asia // Journ. of Marine Systems. 2009. V. 76 (3). P. 310–321.
9. Froehlich K., Gibson J.J., Aggarwal P.K. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. Study of environmental change using isotope techniques. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002: 54–65.
10. Puntsag T., Mitchell M.J., Campbell J.L., Klein E.S., Likens G.E., Welker J.M. Arctic Vortex changes alter the sources and isotopic values of precipitation in northeastern US. Scientific Reports. 2016, 6. doi: 10.1038/srep22647.
11. <http://www.aari.ru>.
12. <http://www.meteorf.ru>.
13. <http://www.noaa.gov>.
14. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website. College Park, MD, NOAA Air Res. Laboratory, 2015. <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
15. Malygina N.S., Eirikh A.N., Kurepina N.Y., Papina T.S. Isotope composition of winter precipitation and snow cover in the foothills of the Altai. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 57–68. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-57-68. [In Russian].
16. Papina T.S., Malygina N.S., Eirikh A.N., Galanin A.A., Zheleznyak M.N. Isotopic composition and sources of atmospheric precipitation in Central Yakutia. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2017, XXI (2): 60–69. [In Russian].
17. http://www-naweb.iaea.org/parc/ih/IHS_resources_gnip.html.
18. Brezgunov V.S., Evsikov A., Ferronskij V.I., Salsnova L.V. Spatio-temporal variation of the oxygen isotopic composition of atmospheric precipitation and river water in northern part of Eurasia and their relationship with temperature change. *Wodnye Resursy*. Water Resources. 1998, 25 (1): 99–104. [In Russian].
19. Vasilchuk Yu.K., Chizhova Yu.N., Papesh V. Trend of isotopic composition of individual snowfall in northeastern Europe. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2005, IX (3): 81–87. [In Russian].
20. Oblovov G.E. *Evolyutsiya kriolitozony poberezhya i shelfa Karskogo morya v pozdnem neopleystotsene-golotsene*. Evolution of the coastal and shelf cryolithozone of the Kara Sea in the Late Neopleistocene-Holocene. PhD. Tyumen: Earth Cryosphere Institute SB RAS, 2016: 197 p. [In Russian].
21. Numaguti A. Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation mode. *Journ. of Geophys Research*. 1999, 104: 1957–1972.
22. Ferronskiy V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery Zemli*. The isotope of Earth's hydrosphere. Moscow: Nauchny Mir, 2009: 632 p. [In Russian].
23. Ekaykin A.A. *Stabilnye izotopy vody v glyatsiologii i paleogeografii*. Stable water isotopes in glaciology and paleogeography. Sankt-Petersburg: AARI, 2016: 63 p. [In Russian].
24. Panin B.D., Repinskaya R.P. *Prognoz vlazhnosti, oblachnosti i osadkov*. Forecast of humidity, cloudiness and precipitation. Leningrad: Hydrometeorological Institute, 1982: 46 p.
25. Fricke H., O'Neil J. The correlation between $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time. *Earth and Planetary Science Letters*. 1999, 170: 181–196.
26. Oberhänsli H., Weise S.M., Stanichny S. Oxygen and hydrogen isotopic water characteristics of the Aral Sea, Central Asia. *Journ. of Marine Systems*. 2009, 76 (3): 310–321.