

АТМОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КЛИМАТ

УДК 551.345:556.12

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(60-69)

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ И ИСТОЧНИКИ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ
В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Т.С. Папина¹, Н.С. Малыгина¹, А.Н. Эйрих¹, А.А. Галанин², М.Н. Железняк²

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия; tanya.papina@mail.ru

²Институт мерзлотоведения СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

Представлены данные об изотопном составе атмосферных осадков, отобранных в Центральной Якутии в течение холодного (2013–2014 гг.) и теплого (2014 г.) периодов. Показано, что изотопный состав атмосферных осадков холодного периода имеет значимую зависимость от температуры окружающей среды, а угол наклона локальной линии метеорных вод (немного больше угла глобальной линии метеорных вод) и дейтериевый эксцесс (выше 10 ‰) подтверждают их криогенное фракционирование. Для теплого периода ситуация кардинально иная: отсутствие зависимости от температуры, угловой коэффициент меньше 8 и отрицательный дейтериевый эксцесс в совокупности подтверждают возможность испарительного фракционирования и смену источников поступления атмосферных осадков. На основе анализа обратных траекторий движения воздушных масс (модель HYSPLIT) и изотопного состава осадков определено семь регионов-источников атмосферной влаги, выпавшей в Центральной Якутии в виде осадков за анализируемый период. Показано, что в Центральной Якутии в теплый период года Охотское море было доминирующим источником атмосферных осадков – его вклад составил 41.1 % от общего количества осадков теплого сезона 2014 г.

Центральная Якутия, атмосферные осадки теплого и холодного периодов, изотопы кислорода и водорода, дейтериевый эксцесс

ISOTOPIC COMPOSITION AND SOURCES OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION
IN CENTRAL YAKUTIA

T.S. Papina¹, N.S. Malygina¹, A.N. Eirikh¹, A.A. Galanin², M.N. Zheleznyak²

¹Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS,
1, Molodezhnaya str., Barnaul, 656038, Russia; tanya.papina@mail.ru

²Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia

The data on the isotopic composition of precipitation sampled during the cold period of 2013–2014 and the warm period of 2014 in Central Yakutia have been presented. The isotopic composition of precipitation of the cold period has been revealed to be essentially dependent on the air temperature, and the angle of inclination of the local meteoric water line (slightly greater than the global meteoric water line angle) and deuterium excess (above 10 ‰) have proved the cryogenic fractionation of precipitation. The situation for the warm period has been demonstrated to differ: independence on the ambient temperature, the angle of less than 8 degrees and a negative deuterium excess collectively suggest the possibility of evaporative fractionation and changes in the precipitation sources. Based on the method of analysis of the reverse trajectories of air masses (model HYSPLIT) and the isotopic composition of precipitation, seven regions have been identified as sources of the atmospheric moisture which precipitated in Central Yakutia during the analyzed period. It has been demonstrated that in the warm season the Sea of Okhotsk was the dominant source of precipitation in Central Yakutia, its contribution has been estimated as 41.1 % of the total rainfall of the warm season of 2014.

Central Yakutia, precipitation of warm and cold periods, oxygen and hydrogen stable isotopes, deuterium excess

ВВЕДЕНИЕ

Генезис повторно-жильных и текстурных льдов – ключевых объектов криолитозоны является предметом постоянных дискуссий [Васильчук, 1989; Геокриология СССР, 1989; Деревягин и др., 2010, 2013; Крицук, 2010; Васильчук и др., 2012]. Результаты геокриологических исследований, полученные с использованием изотопных методов [Васильчук, 1992; Крицук, 2010; Василь-

чук, 2010, 2013; Крицук, 2010; Васильчук и др., 2012]. Результаты геокриологических исследований, полученные с использованием изотопных методов [Васильчук, 1992; Крицук, 2010; Василь-

чук Ю.К., Васильчук А.К., 2011; Деревягин и др., 2013; Meyer et al., 2002; Raffi et al., 2004; Wetterich et al., 2008, 2011; Opel et al., 2011; Voereboom et al., 2013; Meyer et al., 2015], подтверждают выдвинутое ранее предположение, что изотопный состав ледяных жил отражает преимущественно зимние условия влагонакопления, а текстурных льдов – летние [Васильчук, 1989].

Результаты палеореконструкций на основе изотопных данных повторно-жильных и текстурных льдов, как правило, слабо верифицированы и недостаточно обоснованы из-за малого количества данных о сезонном изменении изотопного состава исходных источников влаги, в частности атмосферных осадков. Поэтому анализ сезонных вариаций современного изотопного состава и источников атмосферной влаги в пределах криолитозоны не только представляет интерес для оценки природно-климатических условий и глобальных циркуляционных процессов, контролирующих выпадение осадков на изучаемой территории, но и крайне необходим для палеоклиматических и палеогеокриологических реконструкций.

Известно, что связь между отношением стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) в атмосферных осадках определяется эмпирической зависимостью, получившей название глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ): $\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ [Craig, 1961; Rozanski et al., 1993]. Изменения изотопных отношений $\delta^{18}\text{O} \div \delta\text{D}$ в выпадающих атмосферных осадках позволяют определить путь поступления влаги в изучаемый регион. По отклонению диаграммы изотопных отношений $\delta^{18}\text{O} \div \delta\text{D}$ от ГЛМВ можно оценить процессы изотопного фракционирования, которые приводят к тому, что соотношение $\delta^{18}\text{O} \div \delta\text{D}$ в этих осадках может быть описано своей локальной линией метеорных вод (ЛЛМВ). Расчетный показатель – дейтериевый эксцесс (d-excess – сокращенно $d_{\text{exc}} = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$), предложенный в [Dansgaard, 1964] на основе ГЛМВ-зависимости для характеристики региональных особенностей атмосферного водяного пара или атмосферных осадков, успешно применяют при идентификации их источников [Merlivat, Jouzel, 1979; Fricke, O'Neil, 1999; Froehlich et al., 2002]. При интерпретации данных изотопного анализа особое место отводится соотношениям между $\delta^{18}\text{O}$ (или δD) в атмосферных осадках и температурой окружающей среды, позволяющим использовать их в качестве переходных функций “изотопного палеотермометра” [Jouzel, 1997].

К сожалению, на обширной территории России научных работ по изучению изменений и формированию изотопного состава атмосферных осадков выполняется крайне мало. И если для отдельных северных и горных регионов преимуще-

ственно западной части России были проведены довольно детальные исследования по данному направлению [Брезгунов и др., 1998; Васильчук и др., 2005, 2006; Васильчук, Чижова, 2010; Чижова и др., 2013], то в азиатской части России таких работ немного, среди них выделяются исследования под руководством Н. Куриты [Kurita et al., 2003, 2005].

Цель настоящей работы – изучение изотопного состава атмосферных осадков Центральной Якутии (каждый конкретный случай выпадения атмосферных осадков рассматривался отдельно) и обратных траекторий движения воздушных масс, обуславливающих выпадение этих осадков, для определения приоритетных источников атмосферной влаги и оценки вклада этих источников в общее количество осадков, выпавших в регионе в течение года.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Центральная Якутия расположена в среднем течении р. Лены, практически в центре Восточной Сибири. С востока и северо-востока территория окружена Верхоянским хребтом, а с юга – Алданским нагорьем (рис. 1), ее обрамление горными системами как бы подчеркивает центральное положение как самой территории Республики Саха (Якутия), так и ее столицы – г. Якутска.

Значительную часть года Центральная Якутия находится во власти Сибирского антициклона и характеризуется резко континентальным климатом с годовыми колебаниями температур более 100°C и среднегодовым количеством атмосфер-



Рис. 1. Район исследований и местоположение точки отбора (г. Якутск).

ных осадков порядка 200 мм, сравнимым с осадками в степных и полупустынных регионах [Гаврилова, 1962; Скачков, 2012]. Согласно данным из [Второй... доклад..., 2014], в период 1976–2010 гг. в Восточной Сибири отмечалось снижение как годового (коэффициент линейного тренда -1.09 мм/месяц/10 лет), так и сезонного (коэффициенты линейных трендов отрицательные, за исключением весеннего сезона $+0.47$ мм/месяц/10 лет) количества атмосферных осадков. Осадки холодного сезона в Центральной Якутии составляют около 1/6 от общего количества [Гаврилова, 1962], а в теплый сезон испарение зачастую превышает количество поступивших в регион осадков [Ohta et al., 2001].

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Пробоотбор

Пробы атмосферных осадков отбирали в пластиковые пробоотборники на стационарной площадке Института мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН, расположенного на окраине г. Якутска (62.1° с.ш., 129.8° в.д., 103 м). Сразу после отбора пробы жидких атмосферных осадков переносили в герметично закрывающиеся пластиковые пробирки. Пробы твердых атмосферных осадков (снега) непосредственно после отбора хранили в герметичных пластиковых пакетах в замороженном виде, перед транспортировкой в лабораторию их оттаивали, а затем переносили в герметично закрывающиеся пробирки. Всего с октября 2013 г. по сентябрь 2014 г. отобрана 31 проба жидких и твердых атмосферных осадков.

Изотопный анализ

Анализ состава стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$, δD) был выполнен в Химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН (г. Барнаул). Поступившие в лабораторию пробы атмосферных осадков фильтровали, помещали в герметично закрывающиеся вials и до начала проведения анализа хранили в холодильнике. Определение стабильных изотопов выполняли методом лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на приборе PICARRO L2130-i, оснащенный системой WS-CRDS (Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy). Использование технологии WS-CRDS позволяет устранить спектральные наложения (<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-14973.pdf>) и достигнуть высокой точности и воспроизводимости определений изотопного состава образцов. В настоящей работе точность измерения δD и $\delta^{18}\text{O}$ (1σ , $n = 5$) составила ± 0.4 и ± 0.1 ‰ соответственно. В качестве внутренних стандартов использовали пробы воды, откалиброванные относительно Международного стандарта V-SMOW-2 (МАГАТЭ).

Обратные траектории и синоптические условия

Оценку синоптических условий в период выпадения и отбора проб атмосферных осадков проводили на основе метеорологических наблюдений на стационаре Туймаада (территория ИМЗ СО РАН), а также с использованием данных Росгидромета и Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, США), представленных на сайтах (<http://rp5.ru/docs/about/ru>, 2015; <http://www.noaa.gov>).

Обратные траектории движения воздушных масс, обуславливающих выпадение атмосферных осадков, рассчитывали с помощью модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [Draxler, Rolph, 2015; <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLITtraj.php>]. В качестве исходной метеорологической информации использовали: архив GDAS с пространственным разрешением 0.5° , охватывающий временной период с 1 сентября 2007 г. по настоящее время. Обратные траектории рассчитывали для каждого отдельного случая выпадения осадков. Начало построения траекторий соответствовало моменту начала выпадения осадков и отсчитывалось от точки отбора проб осадков (г. Якутск). Каждая рассчитанная траектория охватывала временной интервал от 96 до 240 ч в зависимости от удаленности потенциального источника влаги (океана/большого водоема). Доминирующим источником атмосферной влаги, выпадающей в виде осадков в северной части Евразийского континента, принято считать акваторию Атлантики [Numaguti, 1999]. Поэтому обратные траектории рассчитывали так, чтобы можно было учесть влияние этого источника, а именно, включали продолжительность до двух естественных синоптических периодов. Траектории определяли для трех абсолютных высот, позволяющих оценивать влияние локальных (500 м), региональных (1500 м) и глобальных (3000 м) потенциальных источников атмосферной влаги.

На основе анализа высоты нижней границы облачности в момент выпадения атмосферных осадков для каждого случая выбиралась “ведущая” траектория, которая была выше нижней границы облачности и описывала движение воздушных масс как источника формирования и выпадения осадков. Необходимость выбора “ведущей” траектории обосновывается тем, что при отсутствии заметного изменения изотопного состава атмосферных осадков ниже границы облачности за время их выпадения вариации высоты нижней границы облачности от одного события к другому могут быть значительными (более 2500 м) [Васильчук, Котляков, 2000]. Выбранные траектории были приведены к одному масштабу для создания

единого каталога обратных траекторий движения воздушных масс на период выпадения атмосферных осадков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика метеорологических условий периода исследований

Среднегодовая температура рассматриваемого периода 2013–2014 гг. в Центральной Якутии была на 2 °С теплее климатической нормы 1981–2010 гг. Существенный вклад в разницу температур внес холодный период (октябрь–март), который был на 2.5 °С теплее нормы (1981–2010 гг.), в отличие от теплого периода (апрель–сентябрь), который оказался теплее всего на 1.5 °С. Максимальная разница среднемесячных температур (7.4 °С) получена для декабря, а минимальная (0.5 °С) – для июля (рис. 2). Общее количество атмосферных осадков всего на 7 мм больше значений климатической нормы (на 2 мм для холодного периода 2013–2014 гг. и на 5 мм для теплого), но их распределение по месяцам было не типичным. Так, в теплый период 2014 г. в июле атмосферных осадков выпало почти на 100 % больше нормы. Данный факт отражен в статье об аномальных гидрометеорологических явлениях на территории РФ в июле 2014 г., а именно, 4–7 июля в южных, центральных, юго-западных районах Якутии прошел сильный и очень сильный дождь (40–68 мм осадков) [Бережная и др., 2014]. В остальные месяцы теплого периода осадков выпадало меньше нормы, за исключением августа. В течение холодного периода 2013–2014 гг. только в ноябре осадков выпало в 2 раза больше нормы, а в остальные месяцы – меньше нормы.

Изотопный состав атмосферных осадков

Результаты изотопного анализа атмосферных осадков, отобранных в г. Якутске в 2013–2014 гг., показали существенное варьирование от –6.12 до –45.0 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от –72.1 до –350.1 ‰ для δD (рис. 3). Наиболее легкий изотопный состав был характерен для холодного сезона, при последовательном облегчении от начала к концу сезона (за исключением пробы от 20.10.2013 г.) со средневзвешенным сезонным значением –31.65 для $\delta^{18}\text{O}$ и –237.1 ‰ для δD [Malygina et al., 2015]. Для теплого сезона изменения изотопного состава варьировали от –6.1 до –23.8 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от –72.1 до –198.3 ‰ для δD (см. рис. 3), при этом наиболее легкий изотопный состав был характерен для осадков, выпавших в начале июня, а тяжелый – для июльских и августовских проб. Средневзвешенный изотопный состав осадков теплого сезона 2014 г. составил –13.0 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и –109.3 ‰ для δD .

Рассчитанные значения d_{exc} для атмосферных осадков периода наблюдений варьировали в достаточно широких пределах – от +21.4 до –24.6 ‰. При этом для холодного периода были характерны значения $d_{\text{exc}} > 10$ ‰, что может свидетельствовать о преобладании криогенной метаморфизации изотопного состава. Для теплого периода значения $d_{\text{exc}} \ll 10$ ‰, по-видимому, существенное влияние на формирование изотопного состава оказывало испарительное фракционирование.

Полученные авторами средневзвешенные значения соотношений стабильных изотопов в атмосферных осадках холодного периода 2013–2014 гг. и теплого периода 2014 г. хорошо согласуются с ранее опубликованными средневзвешенными

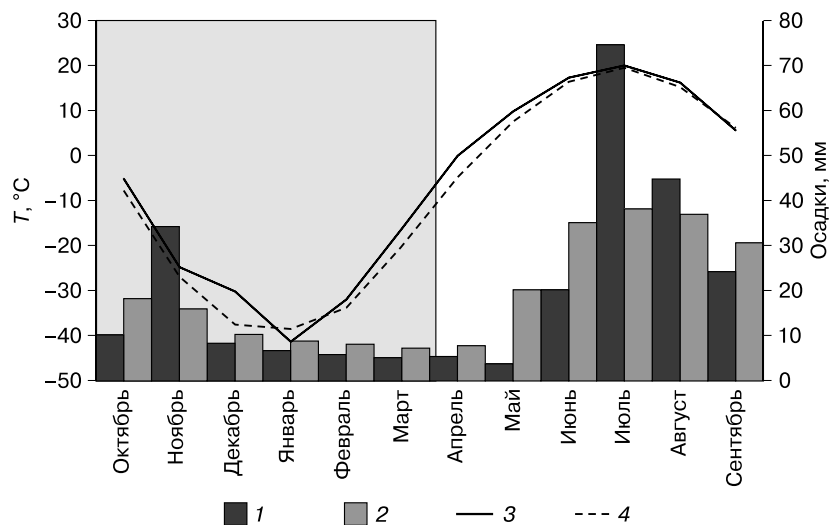


Рис. 2. Метеорологические условия периода отбора проб с октября 2013 г. по сентябрь 2014 г. и климатической нормы 1981–2010 гг.

1, 2 – температура, °С (1 – 2013–2014 гг.; 2 – 1981–2010 гг.); 3, 4 – осадки, мм (3 – 2013–2014 гг.; 4 – 1981–2010 гг.). Серая область – холодный сезон.

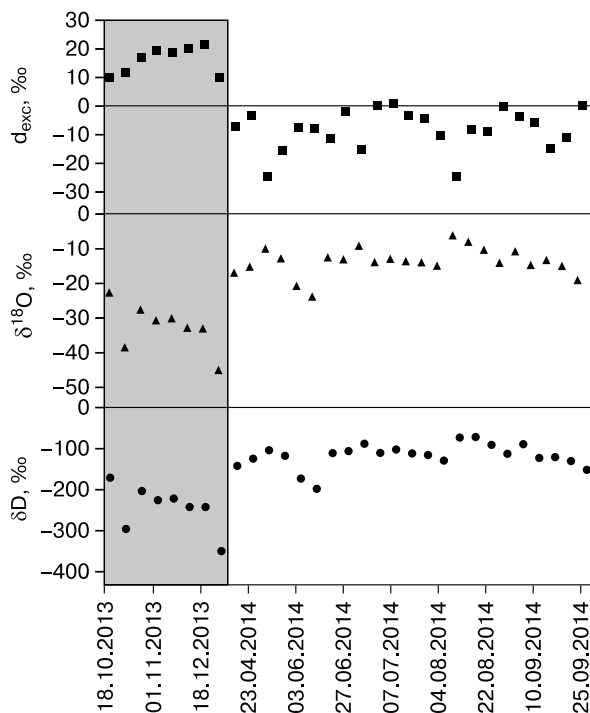


Рис. 3. Состав стабильных изотопов атмосферных осадков Центральной Якутии в холодный сезон 2013–2014 гг. (серая область) и теплый сезон 2014 г.

ми значениями изотопного состава атмосферных осадков теплого (-12.9 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -106.0 ‰ для δD) и холодного (-33.0 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -265.8 ‰ для δD) периодов, отобранных в г. Якут-

ске в 1996–2000 гг. [Kurita et al., 2004]. В период с 1969 по 2000 г. в Якутске велся периодический отбор и анализ месячных проб атмосферных осадков в рамках Международной программы GNIP. Результаты, полученные в ходе выполнения этой программы (http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html), также хорошо согласуются с полученными авторами значениями. Однако при сравнении наших данных с литературными следует учитывать ряд моментов: 1) в 1996–2000 гг. отбирались месячные пробы, в отличие от отбираемых авторами событийных проб; 2) результаты для тех месяцев 1996–2000 гг., когда осадков выпадало менее 10 мм, игнорировались, так как по мнению авторов [Kurita et al., 2004], при отборе и хранении проб испарение могло оказать существенное влияние на изотопный состав; 3) к зимнему и летнему периодам Н. Курита с соавторами [Kurita et al., 2004] относят только по три месяца, в то время как в настоящей работе весь год авторы разделили на два сезона: холодный, когда выпадали твердые осадки, и теплый, когда выпадали жидкие осадки.

Для атмосферных осадков холодного сезона 2013–2014 гг. и теплого сезона 2014 г. были рассчитаны локальные линии метеорных вод. Уравнение регрессии ЛЛМВ для осадков холодного сезона имеет следующий вид: $\delta\text{D} = 8.17 \cdot \delta^{18}\text{O} + 21.9$ (коэффициент детерминации $R^2 = 0.99$). При этом угловой коэффициент ЛЛМВ принимает более высокие значения, чем коэффициент ГЛМВ (рис. 4), что указывает на влияние криогенного фракционирования при формировании изотопного состава осадков. ЛЛМВ осадков теплого периода описывается уравнением $\delta\text{D} = 7.22 \cdot \delta^{18}\text{O} - 18.9$

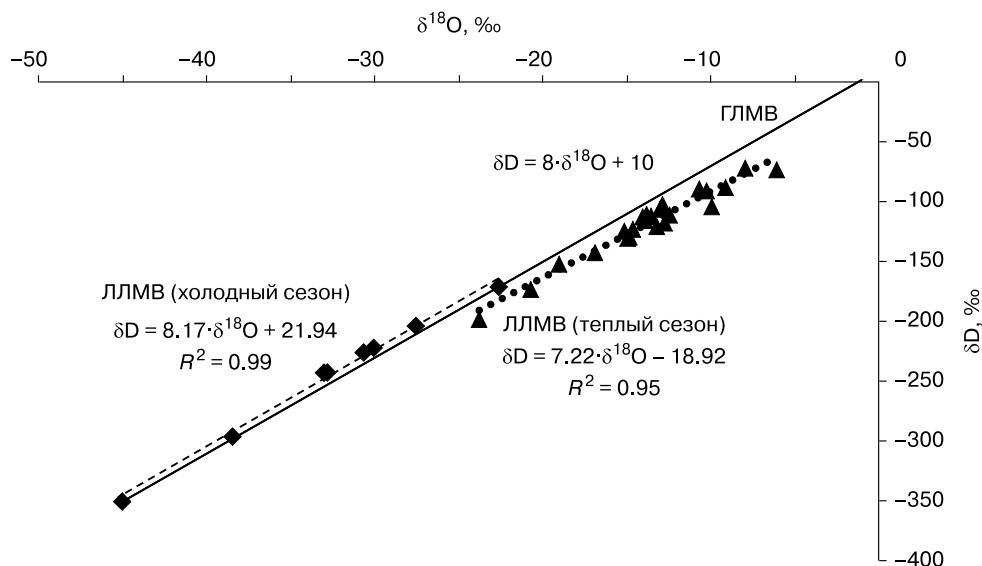


Рис. 4. Локальные линии метеорных вод (ЛЛМВ) для осадков холодного сезона 2013–2014 гг. (штриховая линия) и теплого сезона 2014 г. (пунктирная линия) Центральной Якутии и глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ) (сплошная линия).

($R^2 = 0.95$), имеющим угловой коэффициент меньше 8 (ГЛМВ), что свидетельствует о влиянии испарительного фракционирования на изотопный состав осадков.

Регрессионный анализ связи изотопного состава атмосферных осадков холодного периода и средней температуры воздуха за время их выпадения показал наличие значимой зависимости: $\delta^{18}\text{O} = 0.59t^\circ - 19.7$ ($R^2 = 0.88$) и $\delta\text{D} = 4.16t^\circ - 149.38$ ($R^2 = 0.89$), где t° – температура окружающей среды [Малыгина и др., 2015]. Рассчитанные коэффициенты близки к значениям, полученным для 40 станций ВМО [Dansgaard, 1964], равным 0.69 и 5.6 для $\delta^{18}\text{O}$ и δD , а “свободные члены” имеют более низкие значения, отражая континентальный эффект [Васильчук, Котляков, 2000; Ферронский, Поляков, 2009]. Отсутствие значимой связи между изотопным составом атмосферных осадков теплового сезона и температурой: $\delta^{18}\text{O} = 0.38t^\circ - 17.87$

($R^2 = 0.27$); $\delta\text{D} = 2.91t^\circ - 150.15$ ($R^2 = 0.30$), может свидетельствовать о влиянии различных источников атмосферной влаги, поступающей в регион, вклад которых в формирование изотопного состава осадков на протяжении теплового периода может существенно меняться. Аналогичное предположение о значительных вариациях источников поступления атмосферной влаги было сделано в работе [Kurita et al., 2003], где показано, что в 2002 г. изменения изотопного состава летних осадков в Якутии не имели достоверной прямой зависимости от температуры.

Идентификация источников атмосферной влаги

Для идентификации источников поступления атмосферной влаги, выпадающей в виде осадков в Центральной Якутии, на каждую дату отбора были построены обратные траектории, которые с учетом границы облачности приведены к одному

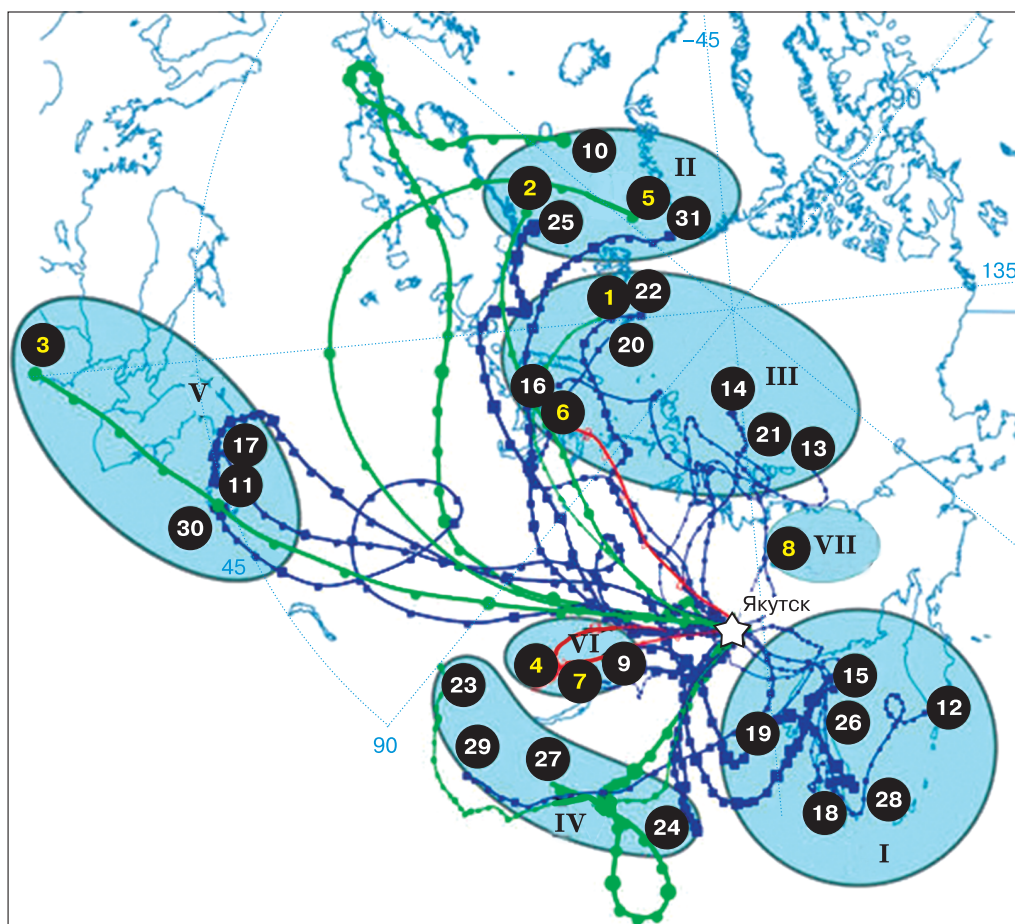


Рис. 5. Обратные траектории движения воздушных масс на высоте 500 м (красная линия), 1500 м (синяя) и 3000 м (зеленая) на даты выпадения атмосферных осадков в холодный период 2013–2014 гг. (траектории с 1 по 8 – желтые номера) и теплый период 2014 г. (траектории с 9 по 31 – белые номера) в г. Якутске (звездочка).

Области I–VII – группы потенциальных регионов-источников атмосферной влаги (названия см. в таблице).

масштабу и объединены в единый каталог обратных траекторий (рис. 5).

Атмосферные осадки холодного периода. Пространственный анализ траекторий движения воздушных масс в холодный период 2013–2014 гг. позволил выделить пять групп потенциальных регионов-источников атмосферной влаги, выпавшей в виде осадков в Центральной Якутии (области, обозначенные римскими цифрами, на рис. 5, см. таблицу). Отметим, что во всех случаях идентификации водоемов в качестве потенциальных источников влаги в холодный сезон дополнительно привлекались данные Национального управления океанических и атмосферных исследований – NOAA (<http://www.noaa.gov>), позволяющие с разрешением в сутки оценивать в Северном полушарии степень покрытости водоемов льдами.

Из пяти выделенных групп регионов-источников влаги наиболее существенный вклад (по 26.2 %) внесли две группы – Северная Атлантика (группа II, траектории 2 и 5) со средневзвешенным изотопным составом осадков –31.0 и –230.1 ‰ и Северный Ледовитый океан (группа III, траектории 1 и 6) со средневзвешенным изотопным составом –27.2 и –202.9 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и δD соответственно. Сопоставимый вклад в поступление осадков внесли региональные источники, а именно, Братское, Усть-Илимское и Вилюйское водохранилища (группа VI, траектории 4 и 7), которые на даты выпадения осадков еще не были покрыты льдом. Эти осадки были изотопически облегчены (средневзвешенные значения –31.0 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и –228.1 ‰ для δD), что связано с исходным испарением влаги с поверхности водохранилищ при отрицательных температурах (ноябрь, декабрь).

Влияние локальных регионов-источников (группа VII, траектория 8), определивших 14.5 %

осадков холодного сезона 2013–2014 гг. в первую очередь могут быть связаны с низкотемпературным вымораживанием. Осадки, сформированные под влиянием этой группы, имели максимально облегченный изотопный состав (–45.0 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и –350.1 ‰ для δD).

Минимальный вклад в общее количество осадков холодного сезона (10.8 %) внес Арало-Каспийский регион (группа V, траектория 3), обусловивший выпадение одних из самых изотопически утяжеленных атмосферных осадков (–27.6 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и –203.6 ‰ для δD).

Атмосферные осадки теплого периода. Анализ каталогизированных траекторий, рассчитанных для теплого сезона 2014 г., позволил выделить шесть групп потенциальных регионов-источников (см. рис. 5, таблицу).

Основным источником влаги, обеспечившим 41.1 % осадков теплого сезона 2014 г., являлось Охотское море, о чем свидетельствуют обратные траектории движения воздушных масс на высоте 1500 м (группа I, траектории 12, 15, 18, 19, 26, 28) (см. рис. 5, таблицу). При этом значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD были близки для всех проанализированных проб, а их средневзвешенные значения составили –13.2 и –107.6 ‰ соответственно. Такой облегченный состав атмосферных осадков, пришедших со стороны Охотского моря, вполне согласуется с тем, что в летнее время испарение воды с поверхности моря происходит при низких температурах (средняя температура воды в северо-западной части акватории не превышает +12 °С), а ее исходный изотопный состав $\delta^{18}\text{O}$ составляет –7.7 ‰ [LeGrande, Schmidt, 2006]. Полученные нами результаты существенно отличаются от ранее опубликованных [Kurita et al., 2003], где основными источниками атмосферной влаги теплого периода года указываются западный воздушный перенос и региональ-

Показатели для регионов-источников влаги, выпавшей в виде осадков в холодный 2013–2014 гг. и теплый 2014 г. периоды в Центральной Якутии (г. Якутск): средневзвешенные значения изотопного состава и их вклад (%) в общее количество осадков

Номер	Регион-источник влаги	Проба (см. траектории на рис. 5)	$\delta^{18}\text{O}$, ‰		δD , ‰		d_{exc} , ‰		Вклад, %	
			Холодный	Теплый	Холодный	Теплый	Холодный	Теплый	Холодный	Теплый
I	Охотское море	12, 15, 18, 19, 26, 28	–	–13.2	–	–107.6	–	–1.6	–	41.1
II	Северная Атлантика	2, 5, 10, 25, 31	–31.0	–11.8	–230.1	–101.4	17.8	–7.4	26.2	22.6
III	Северный Ледовитый океан	1, 6, 13, 14, 16, 20, 21, 22	–27.2	–15.6	–202.9	–130.0	14.4	–4.9	26.2	20.5
IV	Внутриконтинентальные источники (водоемы Китая, Монголии)	23, 24, 27, 29	–	–10.1	–	–91.1	–	–10.0	–	9.6
V	Арало-Каспийский регион	3, 11, 17, 30	–27.6	–10.2	–203.6	–99.0	16.8	–17.2	10.8	4.8
VI	Региональные источники (оз. Байкал, Братское, Усть-Илимское и Вилюйское вдхр.)	4, 7, 9	–31.0	–16.9	–228.1	–142.5	19.6	–7.3	22.4	1.4
VII	Локальные источники	8	–45.0	–	–350.1	–	10.0	–	14.5	–

ные источники, приносящие влагу с севера и юга (включая испарение воды при таянии верхнего слоя вечной мерзлоты). Тем самым в цитируемой работе Охотское море в качестве источника влаги для осадков, выпадающих в Центральной Якутии, даже не рассматривалось.

Второй по значимости вклад (22.6 %) в поступление летних осадков на территорию Центральной Якутии в 2014 г. внесла Северная Атлантика (группа II, траектории 10, 25, 31) со среднезвешенными значениями -11.8 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -101.4 ‰ для δD (см. рис. 5). Арктические воздушные массы, поступившие с Северного Ледовитого океана, определили 20.5 % осадков в г. Якутске летом 2014 г. (группа III, траектории 13, 14, 16, 20, 21, 22). При этом максимально облегченный изотопный состав (среднезвешенные значения -15.6 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -130.0 ‰ для δD) был характерен именно для этой группы осадков.

Наиболее тяжелый изотопный состав (среднезвешенные значения для $\delta^{18}\text{O}$ и δD равны -10.1 и -91.1 ‰ соответственно) был определен для осадков, обусловленных воздушными массами, поступившими из внутриконтинентальных территорий (район Китая и Монголии, включая акватории местных водоемов), что подтверждают обратные траектории их движения (группа IV, траектории 23, 24, 27, 29) (см. рис. 5). Вклад этих региональных источников составил 9.6 % от общего количества выпавших осадков. По данным международной станции мониторинга изотопного состава атмосферных осадков [Atlas..., 2008], в Китае (район г. Чжанье) среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках и в воде открытых водоемов составляет -7.4 и -4.0 ‰ соответственно, а в Монголии в районе г. Улан-Батор равно -9.5 и -3.5 ‰ . Это хорошо согласуется с тем, что атмосферная влага, поступившая из водных источников данных регионов, при продвижении в меридиональном направлении на север могла сформировать осадки измеренного нами изотопного состава.

Арало-Каспийский регион послужил источником только для 4.8 % атмосферных осадков теплого сезона (группа V, траектории 11, 17, 30) со среднезвешенным значением -10.2 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -99.0 ‰ для δD (см. рис. 5). Несмотря на значительную удаленность, за счет тяжелого изотопного состава исходной воды ($+2.8\text{ ‰}$ $\delta^{18}\text{O}$ для Арала и -1.7 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ для Каспия [Oberhänsli et al., 2009]) и ее значительного прогрева в летний период (до $+35\text{ °C}$) циклоны, приходящие с Арало-Каспийского региона, приносят на территорию Центральной Якутии осадки более тяжелого изотопного состава, чем осадки, пришедшие с близко расположенного Охотского моря. Принадлежность исходной атмосферной влаги V группы осадков к Арало-Каспийскому региону подтверждают также наиболее отрицательные значения дейтериевого

эксцесса (-17.2 ‰), что характерно для атмосферных осадков, приходящих из Центрально-Азиатских регионов.

Отдельно выделяется случай выпадения атмосферных осадков (1.4 %), источником влаги которых может служить акватория озера Байкал (-15.8 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ [Seal, Shanks, 1998]) и прилегающие к ней территории (группа VI, траектория 9) (см. рис. 5).

ВЫВОДЫ

1. Изотопный состав атмосферных осадков Центральной Якутии холодного периода 2013–2014 гг. и теплого периода 2014 г. изменялся в широком диапазоне: от -6.12 до -45.0 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и от -72.1 до -350.1 ‰ для δD . Среднезвешенные значения изотопного состава осадков холодного сезона равны -31.65 и -237.1 ‰ , теплого равны -13.0 и -109.3 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и δD соответственно. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее опубликованными данными.

2. Изменение изотопного состава атмосферных осадков холодного периода имеет значимую зависимость от температуры окружающей среды, а угол наклона ЛЛМВ и дейтериевый эксцесс осадков (выше 10 ‰) указывают на их криогенное фракционирование.

3. Для теплого периода значимая зависимость изменения изотопного состава атмосферных осадков от температуры отсутствует, что в первую очередь может быть связано со сменой источников их поступления, а угол наклона ЛЛМВ и отрицательный дейтериевый эксцесс говорят о влиянии на изотопный состав осадков испарительного фракционирования.

4. На основе анализа обратных траекторий движения воздушных масс и изотопного состава атмосферных осадков были выделены региональные источники атмосферной влаги, выпавшей в Центральной Якутии в виде осадков в холодный и теплый периоды года.

Холодный период 2013–2014 гг.

- Существенный вклад (по 26.2 %) в поступление осадков внесли открытые ото льда акватории Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана со среднезвешенными значениями изотопного состава -31.0 и -27.2 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -230.1 и -202.9 ‰ для δD соответственно.

- Сопоставимый с Северной Атлантикой вклад в поступление осадков в регион (22.4 %) внесли Братское, Усть-Илимское и Вилюйское водохранилища. Данные осадки были изотопически облегчены (среднезвешенные значения -31.0 ‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -228.1 ‰ для δD), что связано с исходным испарением влаги с поверхности водохранилищ при отрицательных температурах (ноябрь, декабрь).

• Наиболее облегченный изотопный состав (-45.0‰ $\delta^{18}\text{O}$ и -350.1‰ δD) имели осадки, источником которых было низкотемпературное вымораживание локальных источников влаги. Вклад низкотемпературного вымораживания составил 14.5% от осадков зимнего сезона.

Теплый период 2014 г.

• Показано, что в теплый период 2014 г. Охотское море являлось доминирующим источником атмосферных осадков в Центральной Якутии. Его вклад составил 41.1% от общего количества осадков теплого сезона 2014 г., при этом средневзвешенные значения изотопного состава осадков равны -13.2‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -107.6‰ для δD .

• Наиболее облегченный изотопный состав (средневзвешенные значения -15.6‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -130.0‰ для δD) имели атмосферные осадки, приходящие с акватории Северного Ледовитого океана (20.5%). Сопоставимый с ним вклад дала Северная Атлантика (22.6%) при средневзвешенных значениях изотопного состава -11.8‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -101.4‰ для δD .

• Утяжеленный изотопный состав (средневзвешенные значения -10.1 и -91.1‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и δD соответственно) был характерен для осадков, приходящих из внутриконтинентальных районов Китая и Монголии, а также из Арало-Каспийского региона (средневзвешенные значения -10.2‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и -99.0‰ для δD). Их вклад в общее количество осадков составлял 9.6% для внутриконтинентальных источников Китая и Монголии и 4.8% для Арало-Каспийского региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта “Климатические и экологические изменения в Сибири по данным гляциохимического, диатомового и спорово-пыльцевого анализа ледниковых кернов” (№ 0383-2014-0005) и частичной поддержке РФФИ и РФФИ-РС(Я) (проекты № 14-05-00435-а, 15-45-05129-восток-а).

Литература

- Бережная Т.В., Голубев А.Д., Паршина Л.Н.** Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в июле 2014 г. // Метеорология и гидрология, 2014, № 10, с. 111–120.
- 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 использованием температуры // Вод. ресурсы, 1998, т. 25, № 1, с. 73–84.
- Васильчук Ю.К.** Изотопно-кислородный состав подземных льдов // Материалы гляциол. исслед., 1989, вып. 66, с. 196–210.
- Васильчук Ю.К.** Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций) / Ю.К. Васильчук. М., Изд-во РАН, 1992, т. 1, 420 с.
- Васильчук Ю.К.** Основы изотопной геокриологии и гляциологии / Ю.К. Васильчук, В.М. Котляков. М., Изд-во Моск. ун-та, 2000, 616 с.
- Васильчук Ю.К.** Изотопные методы в географии. Ч. 1: Геохимия стабильных изотопов природных льдов. Учеб. пособие / Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук. М., Изд-во Моск. ун-та, 2011, 228 с.
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Земскова А.М., Кристиансен Х., Чижова Ю.Н.** Изменение содержания стабильных изотопов кислорода и водорода в повторно-жильных льдах Ямала и Свальбарда, сформировавшихся за последние 2 тысячи лет // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 1, с. 43–55.
- Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н.** Высотный градиент распределения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в атмосферных осадках и в снежном покрове высокогорных районов // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 13–21.
- Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Папеш В., Буданцева Н.А.** Высотный изотопный эффект в снеге на леднике Гарабаши в Приэльбрусье // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 4, с. 72–81.
- Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Папеш В., Буданцева Н.А.** Изотопный состав языка ледника Большой Азау в Приэльбрусье // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1, с. 56–68.
- Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. С.М. Семенова, В.М. Катцова. М., Росгидромет, 2014, 1008 с.
- Гаврилова М.К.** Климат Центральной Якутии / М.К. Гаврилова. Якутск, Кн. изд-во, 1962, 63 с.
- Геокриология СССР.** Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 516 с.
- Деревягин А.Ю., Чижов А.Б., Майер Х.** Температурные условия зим Лаптевоморского региона за последние 50 тысяч лет в изотопной записи повторно-жильных льдов // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 32–40.
- Деревягин А.Ю., Чижов А.Б., Майер Х., Опель Т., Ширрмайстер Л., Веттерих С.** Изотопный состав текстурных льдов побережья моря Лаптевых // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 3, с. 27–34.
- Крицук Л.Н.** Подземные льды Западной Сибири / Л.Н. Крицук. М., Науч. мир, 2010, 351 с.
- Малыгина Н.С., Папина Т.С., Эйрих А.Н., Жирков А.Ф., Железняк М.Н.** Изотопный состав атмосферных осадков и снежного покрова в г. Якутске // Наука и образование, 2015, № 3 (79), с. 10–15.
- Скачков Ю.Б.** Тенденции изменения климата Центральной Якутии на рубеже XX–XXI вв. // Материалы Междунар. науч. конф. “Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-Восточной и Центральной Азии”. Иркутск, Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2012, т. 1, с. 38–41.
- Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А., Ефимова Л.Е., Лукьянова А.Н., Суркова Г.В., Васильчук Ю.К.** Изотопно-кислородный состав осадков и воды в речной системе средней Протвы // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2013, № 2, с. 84–93.
- Ферронский В.И.** Изотопия гидросферы Земли / В.И. Ферронский, В.А. Поляков. М., Науч. мир, 2009, 632 с.
- Atlas of Isotope Hydrology – Asia and the Pacific.** Vienna. Intern. Atomic Energy Agency, 2008, 138 p.
- Voereboom T., Samyn D., Meyer H., Tison J.-L.** Stable isotope and gas properties of two climatically contrasting (Pleistocene and Holocene) ice wedges from Cape Mamontov Klyk, Laptev Sea, northern Siberia // The Cryosphere, 2013, vol. 7, p. 31–46, DOI: 10.5194/tc-7-31-2013.

- Craig H.** Isotopic variations in meteoric waters // *Science*, 1961, vol. 133, p. 1702–1703.
- Dansgaard W.** Stable isotopes in precipitation // *Tellus*, 1964, vol. 16, p. 436–468.
- 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. – URL: <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения: 18.07.2015).
- 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 Planet. Sci. Lett.*, 1999, vol. 170, p. 181–196.
- 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.
- Jouzel J.** Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in cores // *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102, p. 26471–26487.
- Kurita N., Numaguti A., Sugimoto A., Ichiyana K., Yoshida N.** Relationship between the variation of isotopic ratios and the source of summer precipitation in eastern Siberia // *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, D11339, DOI: 10.1029/2001JD001359.
- Kurita N., Sugimoto A., Fujii Y., Fukazawa T., Makarov V.N., Watanabe O., Ichiyana K., Numaguti A., Yoshida N.** Isotopic composition and origin of snow over Siberia // *J. Geophys. Res.*, 2005, vol. 110, 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, D03102, DOI: 10.1029/2003JD003404.
- LeGrande A.N., Schmidt G.A.** Global gridded data set of the oxygen isotopic composition in seawater // *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, L12604, DOI: 10.1029/2006GL026011.
- Malygina N., Papina T., Eirikh A., Galanin A., Zhirkov A., Zhelezniak M., Kunitsky V.** Isotopic composition and sources of atmospheric precipitation in Central Yakutia in 2013–2014 // 26th IUGG General Assembly: Abstr. (22.06–02.06.2015, Prague, Czech Republic) [Электрон. ресурс]. – URL: <https://www.czech-in.org/cm/IUGG/CM.NET.WebUI/CM.NET.WebUI.spr/SCPRfunctiondetail.aspx?confID=05000000-0000-0000-0000-000000000053&sesID=05000000-0000-0000-0000-000000003393&absID=07000000-0000-0000-0000-000000020703>, 2015 (дата обращения: 23.11.2015).
- Merlivat L., Jouzel J.** Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship in precipitation // *J. Geophys. Res.*, 1979, vol. 84, p. 5029–5033.
- Meyer H., Dereviagin A., Siebert C., Schirmermeister L., Hubberten H.-W.** Palaeoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia – Hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2002, vol. 13, p. 91–105.
- Meyer H., Opel T., Laepple T., Dereviagin A.Y., Hoffmann K., Werner M.** Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid-to late Holocene // *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8 (2), p. 122–125.
- Numaguti A.** Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model // *J. Geophys. Res.*, 1999, vol. 104, p. 1957–1972.
- Oberhänsli H., Weise S.M., Stanichny S.** Oxygen and hydrogen isotopic water characteristics of the Aral Sea, Central Asia // *J. Marine Systems*, 2009, vol. 76 (3), p. 310–321.
- Ohta T., Hiyama T., Tanaka H., Kuwada T., Maximov T.C., Ohata T., Fukushima Y.** Seasonal variation in the energy and water exchanges above and below a larch forest in eastern Siberia // *Hydrol. Process.*, 2001, vol. 15, p. 1459–1476.
- Opel T., Dereviagin A.Y., Meyer H., Schirmermeister L., Wetterich S.** Palaeoclimatic information from stable water isotopes of Holocene ice wedges on the Dmitrii Laptev Strait, northeast Siberia, Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011, vol. 22, p. 84–100.
- Raffi R., Stenni B., Flora O., Polesello S., Camusso M.** Growth processes of an inland Antarctic ice wedge, Mesa Range, northern Victoria Land // *Ann. Glaciol.*, 2004, vol. 39, p. 379–385.
- Rozanski K., Araguifis-Araguifis L., Gonfiantini R.** Isotopic patterns in modern global precipitation // *Climate Change in Continental Isotopic Records*, *Geophys. Monogr.*, 1993, vol. 78, p. 1–36.
- Seal R.R., Shanks W.C.** Oxygen and hydrogen isotope systematics of Lake Baikal, Siberia: implications for paleoclimate studies // *Limnol. Oceanogr.*, 1998, vol. 43, p. 1251–1261.
- Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A.A., Kienast F., Meyer H., Schirmermeister L., Kuznetsova T., Sierralta M.** Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, Northeast Siberia, Russia // *Quaternary Sci. Rev.*, 2008, vol. 27, p. 1523–1540.
- Wetterich S., Rudaya N., Tumskey V., Andreev A.A., Opel T., Schirmermeister L., Meyer H.** Last Glacial Maximum records in permafrost of the East Siberian Arctic // *Quaternary Sci. Rev.*, 2011, vol. 30, p. 3139–3151.
- <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-14973.pdf> (дата обращения: 02.12.2015).
- https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php (дата обращения: 22.08.2015).
- <http://rp5.ru/docs/about/ru> (дата обращения: 23.09.2015).
- http://www.naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html (дата обращения: 18.10.2015).
- <http://www.noaa.gov> (дата обращения: 11.11.2015).

Поступила в редакцию
31 декабря 2015 г.