

Изотопный состав зимних атмосферных осадков и снежного покрова в предгорьях Алтая

© 2017 г. Н.С. Малыгина*, А.Н. Эйрих, Н.Ю. Курепина, Т.С. Папина

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

*natmgn@gmail.com

Isotope composition of winter precipitation and snow cover in the foothills of the Altai

N.S. Malygina*, A.N. Eirikh, N.Yu. Kurepina, T.S. Papina

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

*natmgn@gmail.com

Received April 18, 2016

Accepted September 22, 2016

Keywords: *foothills of the Altai, snow cover, stable isotopes of oxygen and hydrogen, winter precipitation.***Summary**

Over the past three decades, several general circulation models of the atmosphere and ocean (atmospheric and oceanic general circulation models – GCMs) have been improved by modeling the hydrological cycle with the use of isotopologues (isotopes of water) HDO and H₂¹⁸O. Input parameters for the GCM models taking into account changes in the isotope composition of atmospheric precipitation were, above all, the results obtained by the network GNIP – Global Network of Isotopes in Precipitation. At different times, on the vast territory of Russia there were only about 40 simultaneously functioning stations where the sampling of atmospheric precipitation was performed. In this study we present the results of the isotope composition of samples taken on the foothills of the Altai during two winter seasons of 2014/15 and 2015/16. Values of the isotope composition of precipitation changed in a wide range and their maximum fluctuations were 25, 202 and 18‰ for δ¹⁸O, *d_{exc}* and δD, respectively. The weighted-mean values of δ¹⁸O and δD of the precipitation analyzed for the above two seasons were close to each other (–21.1 and –158.1‰ for the first season and –21.1 and –161.9‰ for the second one), while *d_{exc}* values differed significantly. The comparison of the results of isotope analysis of the snow cover integral samples with the corresponding in the time interval the weighted-mean values of precipitation showed high consistency. However, despite the similarity of values of δ¹⁸O and δD, calculated for precipitation and snow cover, and the results, interpolated in IsoMAP (from data of the GNIP stations for 1960–2010), the *d_{exc}* values were close to mean annual values of IsoMAP for only the second winter season. According to the trajectory analysis (the HYSPLIT model), the revealed differences between both, the seasons, and the long-term average values of IsoMAP, were associated with a change of main regions where the air masses carrying precipitation were formed, namely, the North Atlantic (the winter season of 2014/15) and the inland areas with open ice-free water bodies (the season of 2015/16). Thus, with the correct interpretation of the results, the data on the snow cover isotope composition on the Altai foothills can be used as an alternative data sources instead of the GNIP data.

Поступила 18 апреля 2016 г.

Принята к печати 22 сентября 2016 г.

Ключевые слова: *зимние атмосферные осадки, предгорья Алтая, снежный покров, стабильные изотопы кислорода и водорода.*

Приводятся результаты изотопного анализа состава атмосферных осадков и снежного покрова предгорий Алтая. Показано, что средневзвешенные значения осадков двух зимних сезонов (2014/15 и 2015/16 гг.) для δ¹⁸O составили –21,1‰, а для δD –158,1 и –161,9‰ соответственно и хорошо согласуются с изотопным составом интегральных проб снежного покрова. Проявившиеся отличия в *d_{exc}* очевидно, связаны со сменой основных регионов формирования воздушных масс, приносящих атмосферные осадки: сменой открытых ото льда акваторий Северной Атлантики на внутриконтинентальные водоёмы. При корректной интерпретации результатов данные изотопного состава атмосферных осадков и снежного покрова в предгорьях Алтая могут быть использованы в ряде моделей МОЦ.

Введение

В последние три десятилетия в моделях общей циркуляции атмосферы и океана – МОЦ (англ. General Circulation Models) – в качестве входных параметров используются стабильные изотопологи HDO (δD) и H₂¹⁸O (δ¹⁸O) [1–13].

Соотношение стабильных изотопов воды в атмосферных осадках описывается эмпирической зависимостью, именуемой глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ, δD = 8δ¹⁸O + 10) [14, 15]. Отклонения δ¹⁸O ÷ δD от ГЛМВ позволяют оценить процессы изотопного фракционирования в изучаемом регионе, которые характеризуют-

ся локальной линией метеорных вод (ЛЛМВ). Расчётный показатель – дейтериевый эксцесс ($d_{exc} = \delta D - 8\delta^{18}O$), предложенный В. Дансгором [16] на основе ГЛМВ-зависимости для определения региональных особенностей изотопного состава, например атмосферного водяного пара или осадков, успешно применяют для идентификации их источников [17, 18].

Среди последнего поколения моделей МОЦ выделяется разработанная в Институте Макса Планка (Германия) модель ЕСНАМ, которая была расширена дополнительным модулем для оценки изменений изотопного состава воды и пара на протяжении всего гидрологического цикла и получила в названии приставку «wiso» [2, 13, 19]. Дополнительно, наряду с ЕСНАМ-wiso, эффективно применяют модель ЕМАС, которая позволяет оценивать обменные процессы в тропо- и стратосфере (до 90 слоёв по вертикали), а также учитывать окисление метана при моделировании вариаций изотопологов воды в стратосфере [1]. Результаты расчётов, выполненных с помощью этих моделей, существенно повышают качество интерпретаций палеоархивных «изотопных сигналов» с точки зрения климатических и экологических изменений [7–9, 12, 20–26].

К входным параметрам для МОЦ, учитывающим изменения изотопного состава атмосферных осадков, в первую очередь относятся данные, полученные сетью GNIP – Global Network of Isotopes in Precipitation [27]. Постоянный мониторинг содержания стабильных изотопов в атмосферных осадках GNIP начали проводить в 1961 г. При этом на обширной территории Российской Федерации и Советского Союза в целом в разное время одновременно функционировало не более 40 станций, где отбирали пробы атмосферных осадков хотя бы в течение года или более [27]. К сожалению, с 2000-х годов непрерывный мониторинг изотопного состава атмосферных осадков, соответствующий рекомендациям международной сети GNIP, практически не проводился. Объём научных исследований по данной тематике в России и раньше, и сейчас крайне невелик, и охватывают они преимущественно равнинные территории [28–32]. Таким образом, необходимость изучения изотопного состава атмосферных осадков, выпадающих в предгорных и горных районах России, которые характеризуются

сложными климатическими и орографическими условиями, не вызывает сомнения.

Предгорья Алтая, граничащие с крупными орографическими барьерами и служащие ареной конвергенции океанических и континентальных воздушных масс, обуславливающих широкое варьирование изотопного состава атмосферных осадков, в том числе и внутри сезона, – один из перспективных районов исследования. Относясь к Алтае-Саянской гляциологической области, на территории которой находятся уникальные природные архивы, в первую очередь высокогорные ледниковые керны, алтайские предгорья могут быть хорошим модельным регионом для проведения изотопных исследований, результаты которых будут востребованы и при палеорекострукциях.

Цель настоящей работы – изучение особенностей формирования изотопного состава зимних атмосферных осадков и снежного покрова в предгорьях Алтая для оценки возможности их использования в качестве альтернативного источника данных изотопного состава атмосферных осадков, получаемых по сети GNIP.

Методика исследований

Пробоотбор. Пробы атмосферных осадков отбирали в 2014/15 и 2015/16 гг. с ноября по февраль в предгорьях Алтая (рис. 1, а) на окраине села Первомайское (52,3° с.ш., 85,1° в.д., высота над ур. моря 270 м). Отобранные непосредственно после окончания выпадения атмосферных осадков пробы снега растапливали в герметичных пластиковых пакетах, а затем переносили в герметично закрывающиеся пробирки, которые хранили в холодильнике до начала анализа. При отборе проб атмосферных осадков определяли их количество в водном эквиваленте (в.э.), для этого массу взятой пробы делили на площадь пробоотборника. За два зимних сезона отобрано 48 проб атмосферных осадков. Пробы снежного покрова отбирали в конце февраля 2015 и 2016 гг., т.е. в период максимального снегонакопления (но до начала снеготаяния), в четырёх точках в радиусе 100 км от места сбора проб осадков. Отбор вели стандартным пробоотборником на всю глубину залегания снежного покрова (в двух–трёх параллелях). После отбо-

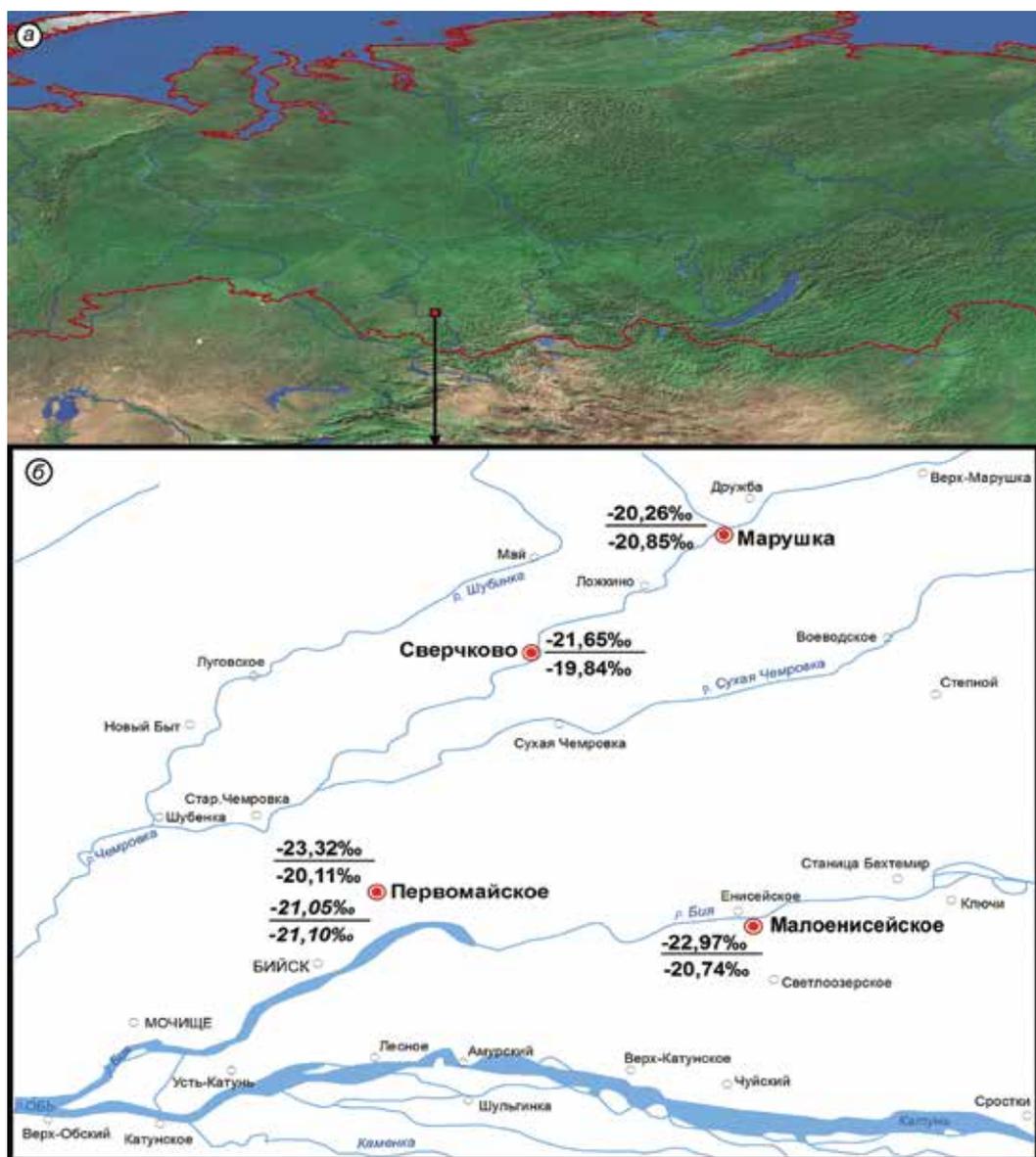


Рис. 1. Предгорья Алтая (а), значения $\delta^{18}\text{O}$ в интегральных пробах снега и атмосферных осадках для зимних сезонов (б):

числитель – 2014/15 г.; знаменатель – 2015/16 г.; курсивом даны средневзвешенные значения для атмосферных осадков

Fig. 1. The foothills of Altai (a), values of $\delta^{18}\text{O}$ for integrated samples of snow and precipitation (b):

numerator – for 2014/15; denominator – 2015/16; in italic – weighted average for precipitation

ра пробы помещали в герметичные пластиковые пакеты, затем их растапливали и переносили в герметичные пробирки, хранившиеся до начала анализа в холодильнике. При взятии проб фиксировали толщину снежного покрова, а также массу пробы. Всего отобрано 16 интегральных проб снежного покрова.

Синоптический анализ. Синоптические условия в период выпадения атмосферных осадков оценивали на основе метеонаблюдений в непо-

средственной близости от точки отбора осадков. Использовались также данные Росгидромета и Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA), представленные на сайтах [33, 34]. Дополнительно для оценки синоптических условий и потенциальных источников поступления атмосферных осадков в регион привлекали данные NCEP/NCAR Reanalysis [35] по направлению и скоро-

сти ветра, а также данные по высоте геопотенциала 700-миллибаровой поверхности.

Траекторный анализ. Обратные траектории движения воздушных масс, обуславливающих выпадение атмосферных осадков, рассчитывали с помощью модели HYSPLIT [36]. В качестве исходной метеорологической информации использовали архив GDAS с пространственным разрешением 1° , охватывающий временной интервал с 2006 г. по настоящее время. Обратные траектории рассчитывали для каждого случая выпадения атмосферных осадков. Начало построения траекторий соответствовало моменту начала выпадения осадков и отсчитывалось от точки их отбора, при этом каждая рассчитанная траектория охватывала временной интервал 240 часов. На основе анализа высоты нижней границы облачности для каждого случая была выбрана «ведущая» траектория (на высоте 300–600, 600–1000 или более 2500 м). Выбранные траектории приводились к одному масштабу для создания единого каталога обратных траекторий движения воздушных масс на основе Google Earth. Далее с помощью программы ArcGIS (производитель – компания ESRI, США) была создана геоинформационная система (ГИС) и выполнена конвертация полученных информационных сведений в картографическую модель данных. Картографическая визуализация позволила проанализировать закономерности пространственного распределения изучаемых параметров и показать их изменение во времени, а именно: проследить путь обратных траекторий воздушных масс до потенциального источника влаги (океана/большого водоёма).

Изотопный анализ. Изотопный анализ атмосферных осадков выполнен в химико-аналитическом центре Института водных и экологических проблем СО РАН методом лазерной абсорбционной ИК-спектрометрии на приборе PICARRO L2130-i, оснащённом системой WS-CRDS (Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy). Применение технологии WS-CRDS позволяет устранить спектральные наложения [37] и достигнуть высокой точности и воспроизводимости определения δD и $\delta^{18}O$ в анализируемых образцах. Точность измерения δD и $\delta^{18}O$ (1σ , $n = 5$) составляла $\pm 0,4$ и $\pm 0,1\%$ соответственно. В качестве внутренних стандартов использовали пробы воды, откалиброван-

ные относительно Международного стандарта V-SMOW-2 (МАГАТЭ). Расчёт средневзвешенных сезонных значений δD , $\delta^{18}O$ и d_{exc} в атмосферных осадках проводили с учётом вклада каждого индивидуального снегопада в общее количество осадков по формуле $X = \Sigma(X_i A_i / A)$, где X – средневзвешенное значение δD , $\delta^{18}O$ или d_{exc} ; X_i – значение δD , $\delta^{18}O$ или d_{exc} в снеге i -го снегопада; A_i – количество осадков в i -м снегопаде, мм в.э.; A – общее за сезон количество осадков, мм в.э.

Isoscapes Modeling, Analysis and Prediction. IsoMAP – Isoscapes Modeling, Analysis and Prediction представляет собой портал для пространственного анализа и визуализации данных состава стабильных изотопов в атмосферных осадках, полученных с помощью сети GNIP [38]. Использование онлайн-калькулятора, связанного с порталом IsoMAP [39], позволяет рассчитывать значения изотопного состава атмосферных осадков для конкретных периодов и территорий за период с 1960 по 2010 г.

Результаты и обсуждение

Характеристика синоптических условий. Суммарное количество выпавших атмосферных осадков в зимние сезоны 2014/15 и 2015/16 гг. практически не отличалось как между собой, так и от среднего значения за период 1960–2010 гг. (различие составляло не более 6 мм) (рис. 2). Однако распределение осадков по месяцам внутри зимних сезонов существенно различилось. Так, если средние многолетние значения зимних осадков за период 1960–2010 гг. последовательно уменьшались от ноября к февралю, то в 2014/15 г. больше всего атмосферных осадков выпадало в декабре с последующим снижением их количества к февралю, а в 2015/16 г., напротив, количество осадков возрастало от начала к концу сезона. Представленные по данным NCEP/NCAR Reanalysis на рис. 3 средние скорости и направления ветра, а также высоты геопотенциала для поверхности 700 мб за период с ноября по март 1960–2010 гг. показали, что в анализируемые зимние периоды воздушные массы на территорию предгорий Алтая поступали преимущественно с запада. Ситуация, близкая к средним значениям зимних сезонов 1960–

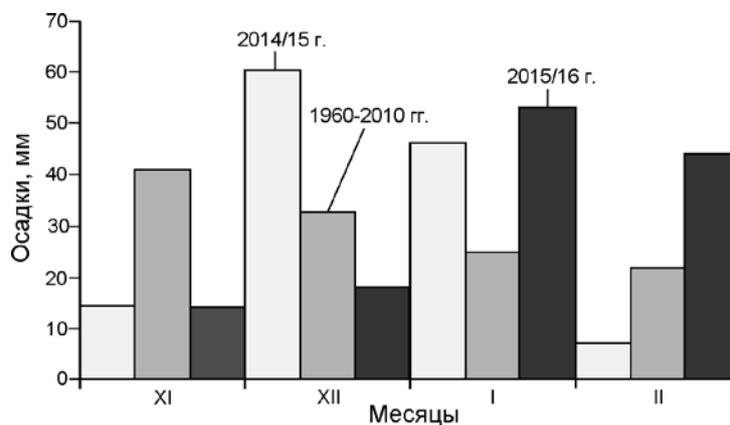


Рис. 2. Атмосферные осадки зимних сезонов 1960–2010, 2014/15 и 2015/16 гг. в предгорьях Алтая
Fig. 2. Precipitation for the winter seasons of 1960–2010, 2014/15 and 2015/16 in foothills of Altai

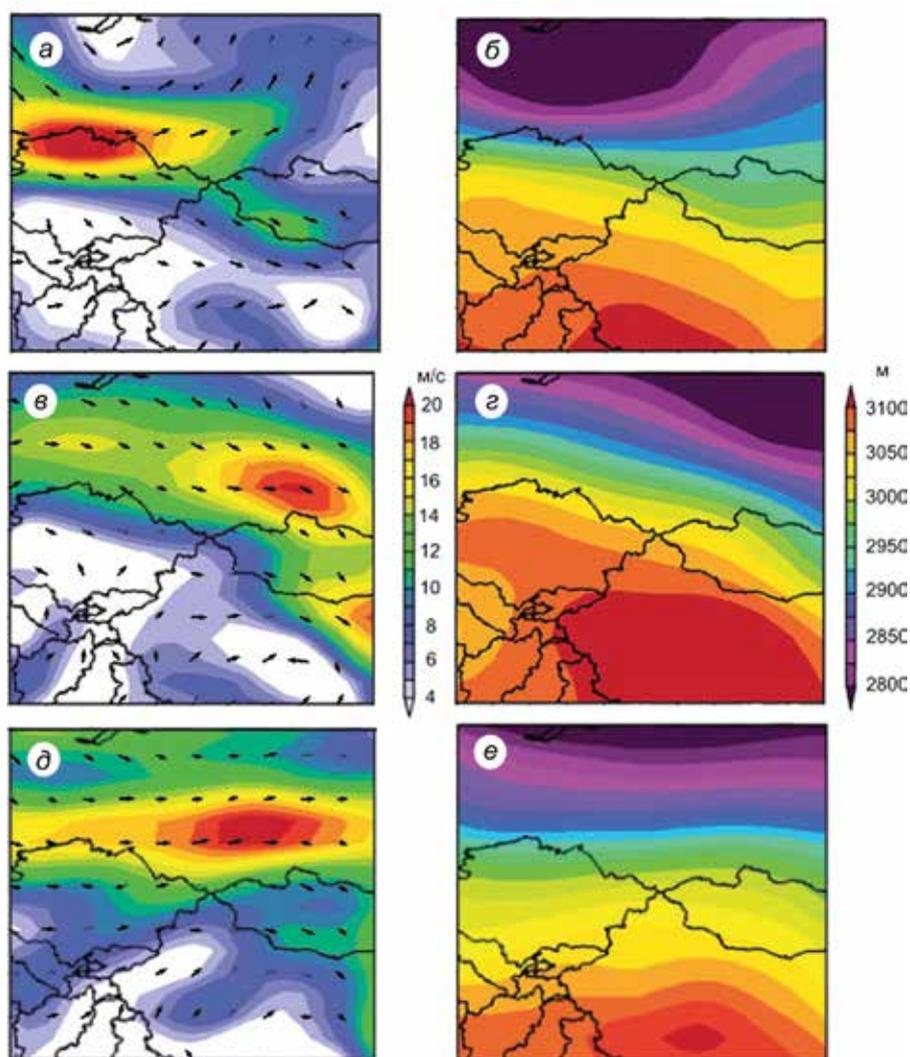


Рис. 3. Средние скорости и направление ветра (стрелки) (а, в, д), высоты геопотенциала 700 мб (б, з, е) для зимних сезонов 1960–2010 гг. (а, б), 2014/15 г. (в, з) и 2015/16 г. (д, е) [36]

Fig. 3. Average wind speed and vector (а, в, д), geopotential height of 700 mb (б, з, е) for the winter seasons of 1960–2010 (а, б), 2014/15 (в, з) and 2015/16 (д, е) [36]

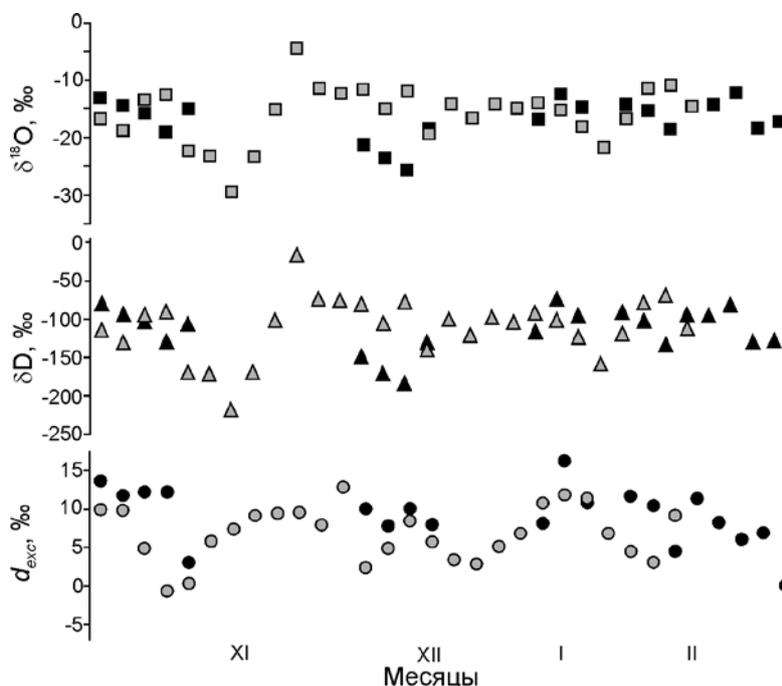


Рис. 4. Изотопный состав атмосферных осадков в предгорьях Алтая в зимние сезоны 2014/15 гг. (чёрные значки) и 2015/16 гг. (серые значки)

Fig. 4. Stable isotopes composition of atmospheric precipitation in foothills of Altai for the winter seasons of 2014/15 (black symbols) and 2015/16 (gray symbols)

2010 гг., наблюдалась и в 2015/16 г. в отличие от зимнего сезона 2014/15 г., когда воздушные массы приходили преимущественно с северо-западных территорий.

Изотопный состав атмосферных осадков. Значения изотопного состава атмосферных осадков зимнего сезона 2014/15 г. изменялись в широком диапазоне и варьировали от $-9,4$ до $-34,4‰$ для $\delta^{18}\text{O}$, от $-122,7$ до $-235,0‰$ для δD и от $0,1$ до $16,3‰$ для d_{exc} (рис. 4). При этом значения изотопного состава зимнего сезона 2015/16 г. для $\delta^{18}\text{O}$ изменялись в меньшем диапазоне (от $-17,4$ до $-30,6‰$), для δD — в большем (от $-65,7$ до $-268,0‰$), а d_{exc} характеризовался как отрицательными, так и положительными значениями (от $-5,3$ до $12,9‰$) (см. рис. 4). Средневзвешенные значения изотопного состава атмосферных осадков в 2014/15 г. составили $-21,1‰$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $-158,1‰$ для δD , d_{exc} равен $10,3‰$. Для зимнего сезона 2015/16 г. средневзвешенные значения для $\delta^{18}\text{O}$ и δD были близки к значениям предыдущего сезона и составили $-21,1$ и $-161,9‰$ соответственно, в то время как значение d_{exc} , равное $6,9‰$, было ниже почти на $3‰$. Это позволяет предполагать

наличие более глубокого изотопного фракционирования атмосферных осадков зимнего сезона 2015/16 г. относительно сезона 2014/15 г. или смену источников их поступления.

Расчитанные локальные линии метеорных вод атмосферных осадков холодных сезонов 2014/15 и 2015/16 гг. описываются соответственно следующими уравнениями регрессии: $\delta\text{D} = 8,23\delta^{18}\text{O} + 14,18$ ($r^2 = 0,98$), $\delta\text{D} = 8,01\delta^{18}\text{O} + 6,64$ ($r^2 = 0,99$), причём обе локальные линии метеорных вод расположены несколько ниже глобальной линии метеорных вод. Результаты анализа интегральных проб снежного покрова двух анализируемых зимних сезонов показали, что значения их изотопного состава незначительно отличаются как между собой (см. рис. 1, б), так и от средневзвешенных значений изотопного состава атмосферных осадков зимних сезонов 2014/15 и 2015/16 гг. (не более $3‰$ для $\delta^{18}\text{O}$, $18‰$ для δD и менее $1‰$ для d_{exc}).

Средневзвешенные значения изотопного состава атмосферных осадков за два зимних сезона хорошо согласуются (разница составляет менее $1‰$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $9‰$ для δD) со средними значениями для предгорий Алтая за период с ноября по февраль, представленными в IsoMAP [38] и

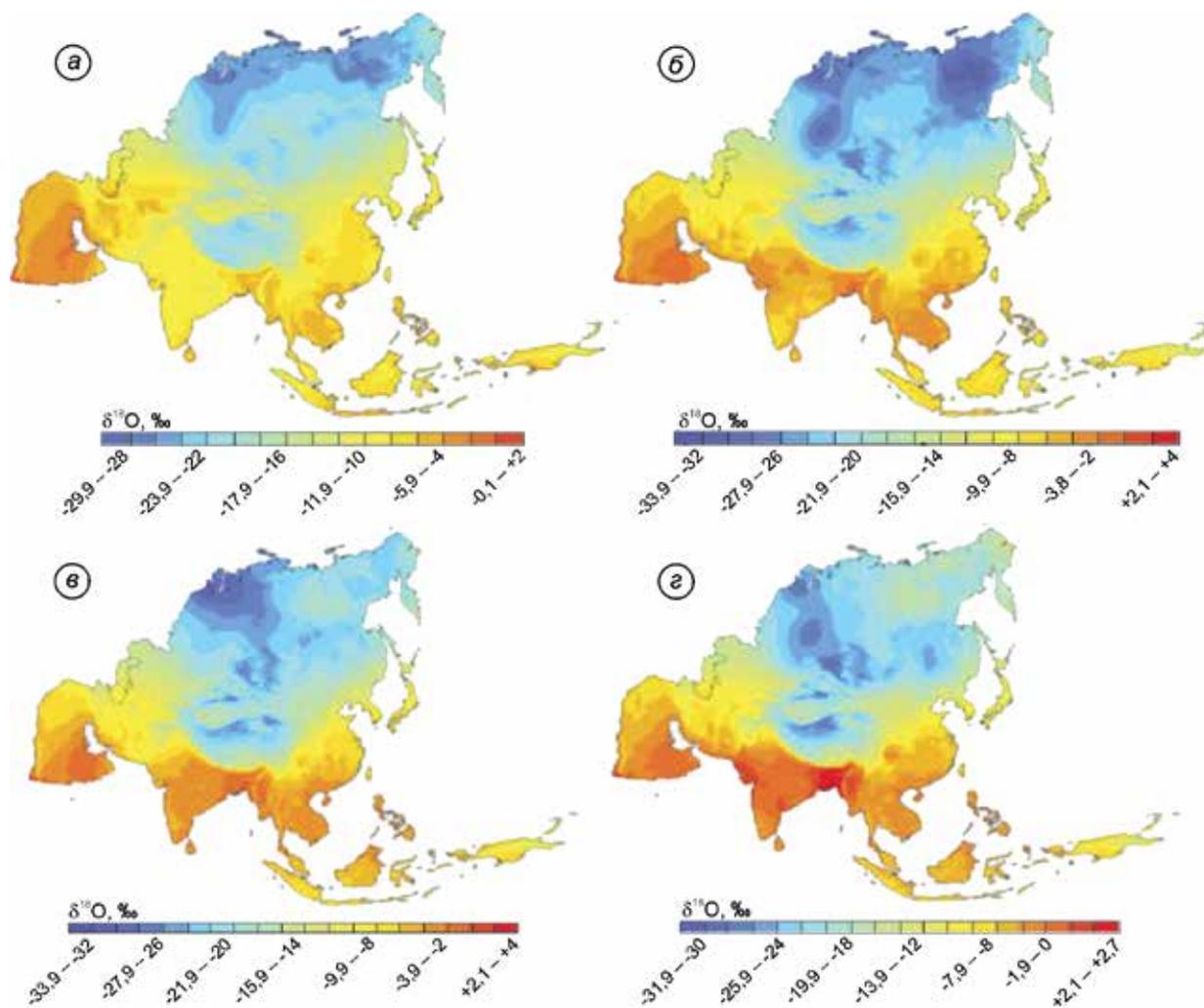


Рис. 5. Карты-схемы значений $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках ноября (а), декабря (б), января (в), февраля (г) [40]
Fig. 5. Schematic map for $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation in November (a), December (b), January (c) and February (d) [40]

рассчитанными с помощью онлайн-калькулятора [39]. Однако значения d_{exc} были близки к значениям d_{exc} (6,7‰), полученным из IsoMAP, только для второго зимнего сезона. Сопоставление ежемесячных значений изотопного состава, представленных в IsoMAP (рис. 5), со средневзвешенными значениями атмосферных осадков для каждого из четырёх месяцев зимних сезонов показало их отличие. Так, для ноября двух зимних сезонов измеренные нами средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ и значения, представленные в IsoMAP, практически не отличались (разница менее 2‰), в то время как для декабря эта разница составила уже 7‰. Изотопные значения $\delta^{18}\text{O}$ в последующие месяцы отличались мало, но значения d_{exc} существенно различались – в январе на 10‰, а в феврале на 7‰.

Таким образом, полученные результаты изотопного состава атмосферных осадков зимних сезонов для предгорий Алтая в целом за сезон, т.е. с ноября по февраль, неплохо согласуются с результатами, представленными в IsoMAP, в основу которых положены интерполированные данные сети GNIP (1960–2010 гг.). Однако при сравнении рассчитанных средневзвешенных значений изотопного состава осадков для каждого из трёх анализируемых месяцев по отдельности наблюдаются отличия. Аналогичная ситуация отмечается и при сравнении значений изотопного состава интегральных проб снежного покрова с результатами интерполяции IsoMAP. При этом значения d_{exc} близко к результатам, представленным в IsoMAP, только для зимнего сезона 2015/16 г. Выявленные различия между ме-

сячными значениями изотопного состава зимних атмосферных осадков, отобранных в 2014/15 и 2015/16 гг., и данными IsoMAP и GNIP могут быть связаны с изменением не только источников поступления атмосферных осадков, но и условий окружающей среды (например, синоптических условий между изучаемыми сезонами и усреднёнными значениями 1960–2010 гг.). Наблюдаемые различия могут быть также обусловлены удалённостью точки отбора проб (предгорья Алтая) на 300 км от ближайшей станции GNIP

(г. Новосибирск), данные которой использовались при интерполяции IsoMAP.

Траекторный анализ источников атмосферных осадков. Для оценки изменения источников поступления атмосферных осадков использовалась модель HYSPLIT, анализировалась также синоптическая ситуация (изменение нижней границы облачности). Это позволило рассчитать обратные траектории движения воздушных масс, определяющих выпадение атмосферных осадков в зимние сезоны 2014/15 (рис. 6, а) и 2015/16 гг. (см.

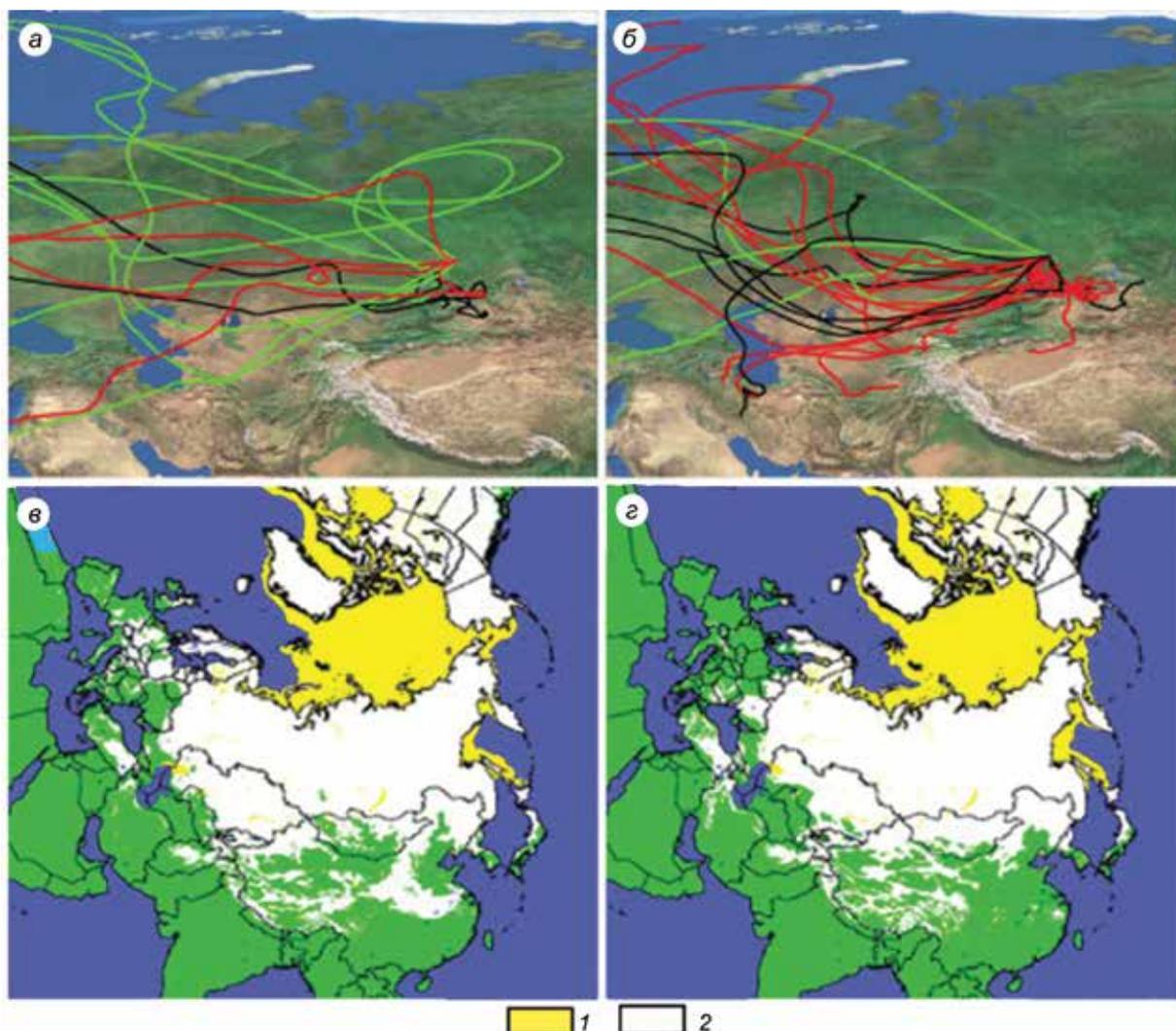


Рис. 6. Обратные траектории движения воздушных масс, обуславливающие осадки в предгорьях Алтая в зимние сезоны 2014/15 гг. (а) и 2015/16 гг. (б):

обратные траектории на высоте 450 м (чёрные линии), 800 м (красные линии) и 2500 м (зелёные линии); распространение ледяного (1) и снежного (2) покровов 31 января 2015 (в) и 2016 гг. (г) по данным [39]

Fig. 6. Backward trajectories of air masses responsible for precipitation in foothills of Altai in the winter seasons of 2014/15 (а) and 2015/16 (б):

backward trajectories at a height of 450 m (black lines), 800 m (red lines) and 2500 m (green lines); distribution of ice (1) and snow (2) cover on January 31, 2015 (в) and 2016 (г) according to [39]

рис. 6, б). Затем обратные траектории были конвертированы из Google Earth в созданную ГИС, позволяющую одновременно анализировать все траектории каждого из сезонов.

Анализ рассчитанных обратных траекторий для зимнего сезона 2014/15 г. показал, что воздушные массы, обуславливающие атмосферные осадки, поступали преимущественно с северо-запада (см. рис. 6, а), в том числе с не покрытой льдом акватории Северной Атлантики (см. рис. 6, в). Данное предположение подтверждают средневзвешенные значения d_{exc} (10,3‰) атмосферных осадков, которые несущественно отличаются от значений d_{exc} для Северной Атлантики [40], и средние значения направления ветра и высоты геопотенциала 700 мб (см. рис. 3, в–г). В зимний сезон 2015/16 г. траектории поступления воздушных масс, определяющих атмосферные осадки, имели преимущественно западное и юго-западное направления (см. рис. 6, б) и проходили над не покрытыми льдом внутриконтинентальными водоёмами (см. рис. 6, г), например Каспийским морем, испарившаяся влага которого могла изменить изотопный состав воздушных масс, принёсших осадки в предгорья Алтая. Возможность влияния влаги, поступающей из внутриконтинентальных водоёмов, на изменение изотопного состава атмосферных осадков подтверждается как снижением средневзвешенного значения d_{exc} для зимнего сезона 2015/16 г., так и средними значениями западного и юго-западного направления ветра (см. рис. 3, д–е). Траекторный анализ воздушных масс, вызывающих атмосферные осадки в зимние сезоны 2014/15 и 2015/16 гг., позволил идентифицировать основные регионы-источники поступления атмосферных осадков для двух анализируемых сезонов, изменчивость вклада которых проявилась в изменениях значений d_{exc} (около 3‰).

Выводы

1. Изотопный состав атмосферных осадков, отобранных в предгорьях Алтая в зимние сезоны 2014/15 и 2015/16 гг., изменялся в широком диапазоне: от $-9,4$ до $-34,4$ ‰ для $\delta^{18}\text{O}$, от $-65,7$ до $-268,0$ ‰ для δD и от $-5,3$ до $16,3$ ‰ для d_{exc} . Средневзвешенные значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD для двух изучаемых сезонов были близки ($-21,1$ и $-158,1$ ‰ для первого сезона и $-21,1$ и $-161,9$ ‰ для второго сезона соответственно), в то время

как значения d_{exc} отличались значительно (10,9 и 6,3‰ соответственно).

2. Сравнение результатов изотопного анализа интегральных проб снежного покрова с соответствующими по временному интервалу средневзвешенными значениями атмосферных осадков зимних сезонов 2014/15 и 2015/16 гг. показали высокую согласованность.

3. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD , полученные для атмосферных осадков и снежного покрова, показали хорошую согласованность в целом за сезон (три зимних месяца) с результатами интерполяции IsoMAP (по данным станций GNIP за 1960–2010 гг.), однако значения d_{exc} были близки к средним многолетним значениям IsoMAP лишь для второго зимнего сезона (2015/16 г.).

4. Согласно данным траекторного анализа (HYSPLIT-модель), проявившиеся отличия в изотопном составе как по сезонам, так и по средним многолетним значениям IsoMAP связаны со сменой основных регионов-источников формирования воздушных масс, обуславливающих атмосферные осадки. В зимний сезон 2014/15 г. таким источником была акватория Северной Атлантики, а в зимний сезон 2015/16 г. — не покрытые льдом водоёмы внутриконтинентальных территорий.

5. Данные изотопного состава снежного покрова в переходной зоне Алтая при корректной интерпретации результатов могут быть использованы в качестве альтернативного источника информации по отношению к данным сети наблюдения GNIP.

Благодарности. Авторы благодарят Г.Н. Малыгина и М.В. Малыгина за помощь в отборе проб атмосферных осадков и снежного покрова. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00188 мол_а и государственного задания по проекту VIII.77.1.5. «Климатические и экологические изменения в Сибири по данным гляциохимического, диатомового и споро-пыльцевого анализа ледниковых кернов» (№ 0383-2014-00052013).

Acknowledgments. We thank G.N. Malygina and M.V. Malygin for help in sampling of precipitation and snow cover. This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (project № 16-35-00188 mol_a) and project VIII.77.1.5. «Climatic and ecological changes in Siberia according to data of glacio-chemical, diatomic and pollen analysis ice cores» (№ 0383-2014-00052013).

Литература

1. *Eichinger R., Jöckel P., Brinkop S., Werner M., Lossow S.* Simulation of the isotopic composition of stratospheric water vapour – Part 1: Description and evaluation of the EMAC model // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 5537–5555.
2. *Gribanov K., Jouzel J., Bastrikov V., Bonne J.-L., Breon F.-M., Butzin M., Cattani O., Masson-Delmotte V., Rokotyan N., Werner M., Zakharov V.* Developing a Western Siberia reference site for tropospheric water vapour isotopologue observations obtained by different techniques (in situ and remote sensing) // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2014. V. 14. P. 5943–5957.
3. *Hoffmann G., Werner M., Heimann M.* Water isotope module of the ECHAM atmospheric general circulation model: A study on timescales from days to several years // *Journ. of Geophys. Research.* 1998. V. 103 (D14). P. 16871–16896. doi: 10.1029 / 98JD00423.
4. *Jöckel P., Kerkweg A., Pozzer A., Sander R., Tost H., Riede H., Baumgaertner A., Gromov S., Kern B.* Development cycle 2 of the Modular Earth Submodel System (MESSy2) // *Geosci. Model Dev.* 2010. V. 3. P. 717–752.
5. *Joussaume S., Sadourny R., Jouzel J.* A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere // *Nature.* 1984. V. 311. № 5981. P. 24–29.
6. *Jouzel J., Russell G.L., Suozzo R.J., Koster R.D., White J.W.C., Broecker W.S.* Simulations of the HDO and H₂¹⁸O atmospheric cycles using the NASA GISS General Circulation Model: The seasonal cycle for present-day conditions // *Journ. of Geophys. Research.* 1987. V. 92 (D12). P. 14739–14760. doi: 10.1029/JD092iD12p14739.
7. *Lee J.E., Fung I.* «Amount effect» of water isotopes and quantitative analysis of post-condensation processes // *Hydrol. Process.* 2008. V. 22. № 1. P. 1–8.
8. *Mathieu R., Pollard D., Cole J.E., White J.W.C., Webb R.S., Thompson S.L.* Simulation of stable water isotope variations by the GENESIS GCM for modern conditions // *Journ. of Geophys. Research.* 2002. V. 107. D4. 4037. doi: 10.1029/2001JD900255.
9. *Risi C., Bony S., Vimeux F., Jouzel J.* Water-stable isotopes in the LMDZ4 general circulation model: Model evaluation for present-day and past climates and applications to climatic interpretations of tropical isotopic records // *Journ. of Geophys. Research.* 2010. V. 115. D.12188. doi: 10.1029/2009JD013255.
10. *Schmidt G.A.* Oxygen-18 variations in a global ocean model // *Geophys. Research Letters.* 1998. V. 25. № 8. P. 1201–1204.
11. *Schmidt G.A., LeGrande A.N., Hoffmann G.* Water isotope expressions of intrinsic and forced variability in a coupled ocean-atmosphere model // *Journ. of Geophys. Research.* 2007. V. 112. D.10103. doi: 10.1029/2006JD007781.

References

1. *Eichinger R., Jöckel P., Brinkop S., Werner M., Lossow S.* Simulation of the isotopic composition of stratospheric water vapour – Part 1: Description and evaluation of the EMAC model. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, 15: 5537–5555.
2. *Gribanov K., Jouzel J., Bastrikov V., Bonne J.-L., Breon F.-M., Butzin M., Cattani O., Masson-Delmotte V., Rokotyan N., Werner M., Zakharov V.* Developing a Western Siberia reference site for tropospheric water vapour isotopologue observations obtained by different techniques (in situ and remote sensing). *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2014, 14: 5943–5957.
3. *Hoffmann G., Werner M., Heimann M.* Water isotope module of the ECHAM atmospheric general circulation model: A study on timescales from days to several years. *Journ. of Geophys. Research.* 1998, 103 (D14):16871–16896. doi: 10.1029 / 98JD00423.
4. *Jöckel P., Kerkweg A., Pozzer A., Sander R., Tost H., Riede H., Baumgaertner A., Gromov S., Kern B.* Development cycle 2 of the Modular Earth Submodel System (MESSy2). *Geosci. Model Dev.* 2010, 3: 717–752.
5. *Joussaume S., Sadourny R., Jouzel J.* A general circulation model of water isotope cycles in the atmosphere. *Nature.* 1984, 311 (5981): 24–29.
6. *Jouzel J., Russell G.L., Suozzo R.J., Koster R.D., White J.W.C., Broecker W.S.* Simulations of the HDO and H₂¹⁸O atmospheric cycles using the NASA GISS General Circulation Model: The seasonal cycle for present-day conditions. *Journ. of Geophys. Research.* 1987, 92 (D12): 14739–14760. doi: 10.1029/JD092iD12p14739.
7. *Lee J.E., Fung I.* «Amount effect» of water isotopes and quantitative analysis of post-condensation processes. *Hydrol. Process.* 2008, 22 (1): 1–8.
8. *Mathieu R., Pollard D., Cole J.E., White J.W.C., Webb R.S., Thompson S.L.* Simulation of stable water isotope variations by the GENESIS GCM for modern conditions. *Journ. of Geophys. Research.* 2002, 107. D4. 4037. doi: 10.1029/2001JD900255.
9. *Risi C., Bony S., Vimeux F., Jouzel J.* Water-stable isotopes in the LMDZ4 general circulation model: Model evaluation for present-day and past climates and applications to climatic interpretations of tropical isotopic records. *Journ. of Geophys. Research.* 2010, 115: D.12188. doi: 10.1029/2009JD013255.
10. *Schmidt G.A.* Oxygen-18 variations in a global ocean model. *Geophys. Research Letters.* 1998, 25 (8): 1201–1204.
11. *Schmidt G.A., LeGrande A.N., Hoffmann G.* Water isotope expressions of intrinsic and forced variability in a coupled ocean-atmosphere model. *Journ. of Geophys. Research.* 2007, 112: D.10103. doi: 10.1029/2006JD007781.

12. Tindall J.C., Valdes P.J., Sime L.C. Stable water isotopes in HadCM3: Isotopic signature of El Niño-Southern Oscillation and the tropical amount effect // *Journ. of Geophys. Research.* 2009. V. 114. D. 04111. doi: 10.1029/2008JD010825.
13. Werner M., Langebroek P.M., Carlsen T., Herold M., Lohmann G. Stable water isotopes in the ECHAM5 general circulation model: Toward high-resolution isotope modeling on a global scale // *Journ. of Geophys. Research.* 2011. V. 116. D.15109. doi: 10.1029/2011JD015681.
14. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science.* 1961. V. 133. P. 1702–1703.
15. Rozanski K., Araguafis-Araguafis L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation // *Climate Change in Continental Isotopic Records. Geophys. Monography.* 1993. V. 78. P. 1–36.
16. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus.* 1964. V. 16. P. 436–468.
17. 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 Planetary Science Letters.* 1999. V. 170. P. 181–196.
18. Merlivat L., Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium -oxygen 18 relationship in precipitation // *Journ. of Geophys. Research.* 1979. V. 84. P. 5029–5033.
19. Roeckner E., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kornblueh L., Manzini E., Schlese U., Schulzweida U. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model // *Journ. of Climate.* 2006. V. 19. P. 3771–3791.
20. Herold M., Lohmann G. Eemian tropical and subtropical African moisture transport: An isotope modelling study // *Climate Dynamics.* 2009. V. 33. P. 1075–1088.
21. Hoffmann G., Jouzel J., Masson V. Stable water isotopes in atmospheric general circulation models // *Hydrol. Processes.* 2000. V. 14. № 8. P. 1385–1406.
22. Jouzel J., Hoffmann G., Koster R.D., Masson V. Water isotopes in precipitation: data/model comparison for present-day and past climates // *Quaternary Science Reviews.* 2000. V. 19. P. 363–379.
23. Noone D., Simmonds I. Associations between d^{18}O of water and climate parameters in a simulation of atmospheric circulation for 1979–95 // *Journ. of Climate.* 2002. V. 15. № 22. P. 3150–3169.
24. Sturm C., Zhang Q., Noone D. An introduction to stable water isotopes in climate models: Benefits of forward proxy modelling for paleoclimatology // *Climate Past.* 2010. V. 6. № 1. P. 115–129. doi:10.5194/cp-6-115-2010.
25. Vuille M., Werner M. Stable isotopes in precipitation recording South American summer monsoon and ENSO variability: Observations and model results // *Climate Dynamics.* 2005. V. 25. № 4 P. 401–413. doi: 10.1007/s00382-005-0049-9.
12. Tindall J.C., Valdes P.J., Sime L.C. Stable water isotopes in HadCM3: Isotopic signature of El Niño-Southern Oscillation and the tropical amount effect. *Journ. of Geophys. Research.* 2009, 114: D. 04111. doi: 10.1029/2008JD010825.
13. Werner M., Langebroek P. M., Carlsen T., Herold M., Lohmann G. Stable water isotopes in the ECHAM5 general circulation model: Toward high-resolution isotope modeling on a global scale. *Journ. of Geophys. Research.* 2011, 116: D.15109. doi: 10.1029/2011JD015681.
14. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science.* 1961, 133: 1702–1703.
15. Rozanski K., Araguafis-Araguafis L., Gonfiantini R. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotopic Records. Geophys. Monography.* 1993, 78: 1–36.
16. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus.* 1964, 16: 436–468.
17. 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 Planetary Science Letters.* 1999, 170: 181–196.
18. Merlivat L., Jouzel J. Global climatic interpretation of the deuterium -oxygen 18 relationship in precipitation. *Journ. of Geophys. Research.* 1979, 84: 5029–5033.
19. Roeckner E., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kornblueh L., Manzini E., Schlese U., Schulzweida U. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *Journ. of Climate.* 2006, 19: 3771–3791.
20. Herold M., Lohmann G. Eemian tropical and subtropical African moisture transport: An isotope modelling study. *Climate Dynamics.* 2009, 33: 1075–1088.
21. Hoffmann G., Jouzel J., Masson V. Stable water isotopes in atmospheric general circulation models. *Hydrol. Processes.* 2000, 14 (8): 1385–1406.
22. Jouzel J., Hoffmann G., Koster R.D., Masson V. Water isotopes in precipitation: data/model comparison for present-day and past climates. *Quaternary Science Reviews.* 2000, 19: 363–379.
23. Noone D., Simmonds I. Associations between d^{18}O of water and climate parameters in a simulation of atmospheric circulation for 1979–95. *Journ. of Climate.* 2002, 15 (22): 3150–3169.
24. Sturm C., Zhang Q., Noone D. An introduction to stable water isotopes in climate models: Benefits of forward proxy modelling for paleoclimatology. *Climate Past.* 2010, 6 (1): 115–129. doi:10.5194/cp-6-115-2010.
25. Vuille M., Werner M. Stable isotopes in precipitation recording South American summer monsoon and ENSO variability: Observations and model results. *Climate Dynamics.* 2005, 25 (4): 401–413. doi: 10.1007/s00382-005-0049-9.

26. *Werner M., Heimann M.* Modeling inter annual variability of water isotopes in Greenland and Antarctica // *Journ. of Geophys. Research.* 2002. V. 107 (D1). 4001. doi: 10.1029/2001JD900253.
27. http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/IHSresources_gnip.html [Электронный ресурс]
28. *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 их связь с использованием температуры // *Водные ресурсы.* 1998. Т. 25. № 1. С. 73–84.
29. *Васильчук Ю.К.* Новые данные о тенденции и причинах изменения величины дейтериевого эксцесса в едином снегопаде // *ДАН.* 2014. Т. 459. № 1. С. 109–111.
30. *Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Панеш В., Буданцева Н.А.* Изотопный состав языка ледника Большой Азау в Приэльбрусье // *Криосфера Земли.* 2006. Т. 10. № 1. С. 56–68.
31. *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. 14. № 1. С. 13–21.
32. *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. 55–66.
33. <http://rp5.ru/docs/about/ru> [Электронный ресурс]
34. <http://www.noaa.gov> [Электронный ресурс]
35. <http://www.esrl.noaa.gov/> [Электронный ресурс]
36. <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLITtraj.php> [Электронный ресурс]
37. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-14973.pdf> [Электронный ресурс]
38. <http://isomap.rcac.purdue.edu:8080/gridsphere/grid-sphere> [Электронный ресурс]
39. <http://wateriso.utah.edu/waterisotopes/index.html> [Электронный ресурс]
40. *Pfahl S., Sodemann H.* What controls deuterium excess in global precipitation? // *Climate Past.* 2014. V. 10. P. 771–781. doi:10.5194/cp-10-771-2014.
26. *Werner M., Heimann M.* Modeling inter annual variability of water isotopes in Greenland and Antarctica. *Journ. of Geophys. Research.* 2002, 107 (D1): 4001. doi: 10.1029/2001JD900253.
27. http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/IHSresources_gnip.html
28. *Brezgunov V.S., Esikov A.D., Ferronskij V.I., Salnova L.V.* Spatial and temporal variations in the isotopic composition of oxygen precipitation and river waters in the northern part of Eurasia, their relationship with the temperature. *Vodnye resursy. Water Resources.* 1998, 25 (1): 73–84. [In Russian].
29. *Vasilchuk Yu.K.* New data on the trends and reasons for changes in the value of the deuterium excess in a single snowfall. *Doklady Akademii Nauk. Proc. of the Academy of Sciences.* 2014, 459 (1): 109–111. [In Russian].
30. *Vasilchuk Yu.K., Chizhova Yu.N., Papesh V., Budanceva N.A.* The isotopic composition of the ice tongue Big Azau Elbrus. *Kriosfera Zemli. Earth Cryosphere.* 2006, 10 (1): 56–68. [In Russian].
31. *Vasilchuk Yu.K., Chizhova Yu.N.* Altitudinal gradient distribution of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and snow cover in mountainous areas. *Kriosfera Zemli. Earth Cryosphere.* 2010, 14 (1): 13–21. [In Russian].
32. *Chizhova Ju.N., Vasilchuk J.Yu., Yoshikawa K., Budantseva N.A., Golovanov D.L., Sorokina O.I., Stanilovskaya Ju.V., Vasil'chuk Yu.K.* Isotope composition of snow cover in the Lake Baikal area. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2015, 55 (3): 55–66. [In Russian].
33. <http://rp5.ru/docs/about/ru>
34. <http://www.noaa.gov>
35. <http://www.esrl.noaa.gov/>
36. <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLITtraj.php>
37. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-14973.pdf>
38. <http://isomap.rcac.purdue.edu:8080/gridsphere/grid-sphere>
39. <http://wateriso.utah.edu/waterisotopes/index.html>
40. *Pfahl S., Sodemann H.* What controls deuterium excess in global precipitation? *Climate Past.* 2014, 10: 771–781. doi:10.5194/cp-10-771-2014.