

Гидрометеорология и экология. 2022. № 67. С. 230—242.  
Hydrometeorology and Ecology. 2022; (67): 230—242.

## ***ГИДРОЛОГИЯ***

Научная статья  
УДК [556.114.679:556.12](282.255)  
doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-230-242.

### **Сезонные и высотные колебания стабильных изотопов рек Западного и Центрального Памира**

***Ином Шерович Норматов<sup>1</sup>, Григорий Тевелевич Фрумин<sup>2</sup>, Анвар Хомидов<sup>3</sup>***

<sup>1</sup>Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан, inomnor@mail.ru

<sup>2</sup>Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Агентство по гидрометеорологии, г. Душанбе, Таджикистан

*Аннотация.* Целью данной работы является определение основных источников атмосферных осадков в бассейнах рек Таджикистана путем изучения изменений изотопного состава ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ), распределения изотопа кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и избытка дейтерия ( $d$ ) по высоте в реках Сурхоб и Оби-хингоу — притоках р. Вахш.

Обнаружено, что значения изотопов водорода и кислорода на диаграмме  $\delta^{18}\text{O} \sim \delta^2\text{H}$  расположены вплотную к глобальной метеоритной водной линии (GMWL), что указывает на незначительную величину испарения речных вод и обильное водоснабжение рек тальми ледниковыми водами. Также было выявлено, что средиземноморская влага, переносимая западными воздушными массами, является основным источником обеспечения Западного и Центрального Памира атмосферными осадками.

*Ключевые слова:* Памир, осадки, воздушная масса, изотоп, D-избыток, притоки.

*Для цитирования:* Норматов И.Ш., Фрумин Г.Т., Хомидов А. Сезонные и высотные колебания стабильных изотопов рек Западного и Центрального Памира // Гидрометеорология и экология. 2022. № 67. С. 230—242. doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-230-242.

## ***HYDROLOGY***

Original article

### **Seasonal and altitude fluctuations of stable isotopes of the Western and Central Pamirs surface water**

***Inom Sh. Normatov<sup>1</sup>, Grigory T. Frumin<sup>2</sup>, Anvar Homidov<sup>3</sup>***

<sup>1</sup>Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan, inomnor@mail.ru

<sup>2</sup>A.I. Herzen Russian State Pedagogical University, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup>Agency for Hydrometeorology, Dushanbe, Tajikistan

*Summary.* The aim of work is to determine the main sources of atmospheric precipitation in Tajikistan river basins by studying changes in the isotopic composition ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ), the altitude distribution of the

© И.Ш. Норматов, Г.Т. Фрумин, А. Хомидов, 2022

oxygen isotope and excess deuterium (D-exc) of river waters. The objects of research were the main tributaries of the Vakhsh River, which in turn are one of the two main tributaries of the transboundary Amu Darya River in Central Asia.

A methodology for sampling water for isotope analysis developed at the University of Colorado at Boulder (USA) has been used. Water sampling from the Surkhob and Obikhingou rivers was carried out on August 5—10, 2021. Analyses of water samples were performed using a Wavelength-Scanned Cavity Ringdown Spectroscopy (WSCRDS), the average ocean water (SMOW, Vienna, IAEA) being accepted as the standard. The measurement accuracy was  $\pm 0.05\%$ .

In the Western and Central Pamirs, a shortage of precipitation is observed in summer and the main channel of the water supply of rivers is the meltwater of glaciers in which isotopic fractionation is minimal. The scatter of points on the diagram  $\delta^{18}\text{O} \sim \delta^2\text{H}$  are found to be located close to the Global Meteorite Water Line (GMWL), indicating a insignificant value of evaporation of river waters and abundant water supply of rivers by glacial melt waters.

The spatial progression of moist air from west to east follows the mechanism of its gradual isotopic easing by forming precipitation along the movement trajectory as a result of mixing of warm air mass with local cold air currents due to the orography of the mountainous terrain. The decrease of  $\delta^{18}\text{O}$  values with altitude was revealed by isotope analysis of water samples from the Surkhob and Obikhingou Rivers, taken at different altitudes.

The relationship between river water  $\delta^{18}\text{O}$  and elevation is found to be significant, with a general correlation for the Surkhob river being  $\delta^{18}\text{O} = -0.00312\text{H} - 10.49$  ( $R^2 = 0.99$ ) and for the Obikhingou river  $\delta^{18}\text{O} = -0.0006\text{H} - 13.32$  ( $R^2 = 0.88$ ). The vertical fall-off rate  $\delta^{18}\text{O}$  for the Surkhob and Obikhingou rivers is  $0.32\%$  / 100 m and  $0.007\%$  / 100 m, respectively. The observed vertical fall-off rate  $\delta^{18}\text{O}$  of the Obikhingou River is significantly lower, while that of the Surkhob River is slightly higher than the world average of  $0.28\%/100\text{m}$ . In the Obikhingou River basin, the lower observed vertical fall-off rate of  $\delta^{18}\text{O}$  in river water is related to terrain and water resources features.

*Keywords:* Pamir, precipitation, air mass, isotope, D-excess, tributaries.

*For citation:* Normatov I.Sh., Frumin G.T., Homidov A. Seasonal and altitude fluctuations of stable isotopes of the Western and Central Pamirs surface waters. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydro-meteorology and Ecology*. 2022; (67): 230—242. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2022-67-230-242

## Введение

Определение источников и количества выпавших атмосферных осадков и распределение поступающих воздушных масс на территорию с развитой горной орографией играют важную роль при разработке сценариев развития метеорологических условий и их влияния на формирование стока горных рек. Данная проблема особенно актуальна на аридных и полуаридных территориях Центральной Азии с континентальным климатом, в которой зона формирования и использования водных ресурсов расположена в различных климатических условиях. Определением изотопного состава речной воды ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ ) можно получить важную информацию о водных ресурсах и местном круговороте воды, независимо от сложности определения факторов, таких как изотопный состав осадков и их сезонные изменения. Основное поступление влаги в регион происходит за счет западных, юго-западных циклонов, иногда из Каспийского и Аральского морей. Осадки на Мургабе и на плато восточного Памира выпадают преимущественно в период с мая по август. В восточном направлении характер сезонных осадков постепенно увеличивается, достигая максимума летом [1]. С запада на восток количество осадков значительно уменьшается, особенно зимой и весной, происходит смещение максимальных значений осадков от зимних и весенних к летним [2].

Водяной пар океанического происхождения может переноситься западными воздушными массами на большие расстояния и способствовать выпадению осадков в отдаленных местах. В условиях продолжающегося изменения климата взаимосвязь между источниками и стоками водяного пара постоянно меняется и представляет важное значение для оценки водного бюджета.

Учитывая близкие значения избытка дейтерия ( $d$ ) к значениям влаги над Средиземноморьем, большинство исследователей склонны к предположению, что основным источником осадков в Центральной Азии является влага, переносимая западными воздушными массами из Средиземноморья [5—12].

Однако, согласно результатам измерений избытка дейтерия ( $d$ ) и применения модели обратной траектории Лагранжа (HYSPLIT) для определения общего происхождения воздушной массы, максимальный вклад «западной» влажности в 40 % был обнаружен в марте, в то время как 40—60 % влаги переносилось по траекториям из северной части Индийского океана. Кроме того, в течение большей части года значение избытка дейтерия ( $d$ ) в атмосферных осадках на западном Памире было ниже (13 ‰), чем у влаги над Средиземноморьем (20 ‰) [3, 4]. На этом основании авторы [3, 4] придавали предпочтение влажным воздушным массам из акватории Индийского океана в обеспечении региона Центральной Азии атмосферными осадками.

Поступление влаги в горы западного Памира из северных и северо-западных районов континента происходит в основном в период март—май. Влага, поступающая воздушными массами с Каспийского моря в марте, характеризуется отрицательным избытком дейтерия. Заметное увеличение значений  $d$  в мае соответствует средней температуре воздуха и относительной влажности. При высокой относительной влажности и низкой температуре (0 °C) наблюдается почти нулевое значение  $d$ . Вклад влаги из Индийского океана уменьшается с января по май примерно с 60 до 20 % под воздействием жаркого и сухого климата в марте, апреле и мае. Влажный воздух из северной части Индийского океана доминирует в горах западного Памира зимой [3].

Согласно [12, 13], формирование снежных кристаллов в атмосфере сопровождается увеличением в них избытка дейтерия. Следовательно, образцы снега, получившегося из средиземноморской влаги, должны показывать более высокие значения  $d$ . Оценка данных переноса воздушных масс от западного Средиземноморья до западного Памира показывает ее максимальный вклад в атмосферные осадки в марте и апреле [3].

Целью работы является определение основных источников атмосферных осадков в бассейнах рек Таджикистана путем изучения изменений изотопного состава ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ), распределения изотопа кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и избытка дейтерия (D-избыток) по высоте в притоках р. Вахш — одной из двух основных притоков трансграничной р. Амударья в Центральной Азии.

### Методика исследования

Объектом исследований являются реки Сурхоб и Обихингоу – притоки р. Вахш. При отборе проб воды для изотопного анализа применялась методология,



Рис. 1. Карта Таджикистана с речной сетью и метеорологических станций.

Fig. 1. Map of Tajikistan with river network and meteorological stations.

разработанная в университете Колорадо в Боулдере (США). Индивидуальность каждой реки, с точки зрения изотопного состава воды, соблюдалась путем отбора проб из притоков до слияния с потоком главной реки и до места слияния с другим притоком. Изотопно-кислородный и дейтериевый составы, дейтериевый эксцесс считаются одними из информативных индикаторов гидрологических и гляциологических исследований установления закономерностей процессов льдообразования, снегонакопления и протекания взаимных агрегатных превращений [14]. Анализы образцов вод выполнялись на Wavelength-Scanned Cavity Ringdown Spectroscopy (WSCRDS), изотопный состав водорода и кислорода выражался в относительных величинах  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ :  $\delta = [(R_{\text{об}} / R_{\text{станд}}) - 1] 1000 \text{ ‰}$ , где  $R_{\text{об}}$  и  $R_{\text{станд}}$  — отношения  $^2\text{H}/^1\text{H}$  и  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  в измеряемом образце и в стандарте. В качестве стандарта принята средняя океаническая вода (SMOW, Vienna, IAEA). Точность измерения составляла  $\pm 0,05 \text{ ‰}$ . Пробы воды из рек Сурхоб и Обихингоу отбирались 5—10 августа 2021 г. в период половодья рек.

Метеорологические условия бассейнов рек Сурхоб и Обихингоу и гидрологические характеристики рек оценивались на основе обобщения данных гидрометеорологических станций Нуробод и Тавильдара, а для сравнения характера изменения климатических условий западного, центрального Памира с его восточной частью использовались данные метеорологической станции Мургаб (рис. 1).

### Реки, ледники и климат бассейна реки Вахш

В правую составляющую р. Вахш — р. Сурхоб — впадает большой приток — р. Ярхыч, в бассейне которой имеется 177 ледников общей площадью 107 км<sup>2</sup>. На северном склоне хребта Петра Первого находятся 52 небольших ледника общей площадью 19,4 км<sup>2</sup>. В настоящее время они интенсивно тают, сокращаются. Правый приток Сурхоба — р. Сорбог длиной 81 км и площадью бассейна 1760 км<sup>2</sup>. В бассейне р. Сорбог насчитывается 246 ледников общей площадью 105,6 км<sup>2</sup>. Левая составляющая Вахша, р. Обихингоу, имеет длину 196 км, площадь бассейна 6660 км<sup>2</sup>, а перепад высот между истоком и устьем составляет 2020 м. В ее бассейне находится 756 ледников общей площадью 712 км<sup>2</sup>. В истоках р. Обихингоу располагается один из крупнейших ледников Памира — Гармо, дающий начало одноименной реке. Его длина составляет 34 км, площадь — 114 км<sup>2</sup>. В настоящее время этот ледник, имеющий западную экспозицию, интенсивно отступает, его поверхность оседает, от ледника отделяются большие ледяные блоки. Ледник Гармо в течение прошлого столетия сократился на 7 км, потеряв более 6 км<sup>2</sup> площади. Ныне ледник отступает со скоростью 9 м/год с уменьшением площади 4 м/год [14].

Бассейн р. Вахш с площадью 39100 км<sup>2</sup> является одним из больших по территории бассейнов, находящийся в наиболее высокой части Средней Азии. Верхняя часть бассейна р. Вахш расположена на северной окраине Памира в пределах Памирского и Алайских хребтов, средняя и нижняя части в полуаридной зоне Южно-Таджикской депрессии [15].

Вахшская долина расположена в юго-западной части Таджикистана на высоте 329—445 м над уровнем моря. Сумма положительных температур в пределах года с температурой выше 10 °С составляет 50,37—56,73 °С, сумма эффективных температур (выше 10 °С) варьирует в пределах 26,87—32,23 °С. В бассейне р. Вахш в январе морозы могут достигать –20—25 °С, а положительные температуры 22—23 °С. Среднемесячная температура воздуха в теплый период достигает 28,4—31,4 °С, а среднегодовая 15,7—16,7 °С. По условиям увлажнения климат бассейна р. Вахш относится к сухому климату [15]. Годовое количество осадков составляет 143—297 мм, а за период апрель—сентябрь варьирует в пределах 45—77 мм. Из среднегодового количества осадков по четырем метеостанциям 40 % приходится на зиму, 48 % на весну, 1,5 % на лето, 10,5 % на осень [15].

### Результаты исследований

Систематизация и обработка данных метеорологических станций Нуробод (39°00' 70°18') (бассейн р. Сурхоб) и Тавильдара (38°42' 70°28') (бассейн р. Обихингоу) за период 1950—2020 гг. показывает, что температура в бассейне р. Вахш за период 1950—2020 гг. характеризовалась положительным трендом (рис. 2).

Согласно проведенным оценкам, темп повышения среднегодовых значений температуры за период 1950—2020 гг. протекает по-разному и составляет по бассейнам рек Сурхоб  $6,3 \times 10^{-3}$  °С/год и Обихингоу  $18,6 \times 10^{-3}$  °С/год. За рассматриваемый период наблюдалось хотя и небольшое, но увеличение количества атмосферных осадков по всему верховью р. Вахш. В частности, в бассейнах рек

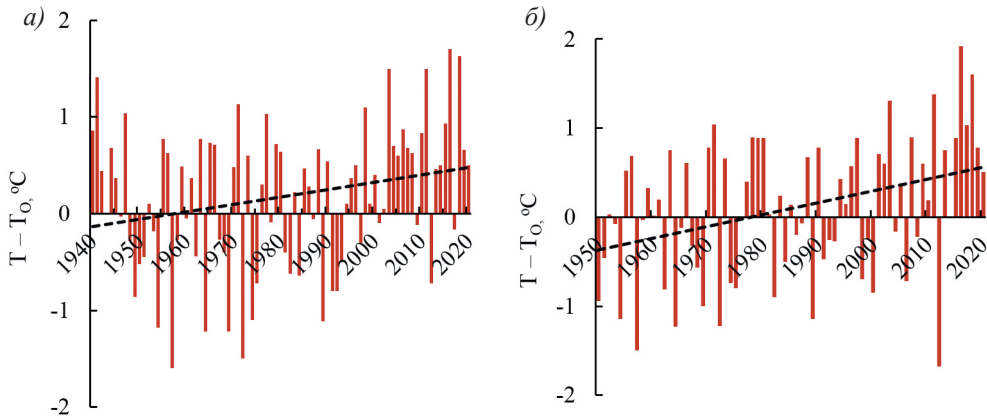


Рис. 2. Изменение среднегодовых температур бассейнов рек Сурхоб (а) и Обихингоу (б) за период 1940—2020 гг. по отношению к базисному периоду 1960—1990 гг.

Fig. 2. The average annual temperatures change of the Surkhob (a) and Obikhingou (b) river basins for the period 1940—2020 to the base period 1960—1990.

Сурхоб и Обихингоу среднегодовое увеличение количества осадков за период 1950—2020 гг. составило 0,88 мм/год и 3,7 мм/год.

Памир можно рассматривать как область, где происходит смена влажного, холодного средиземноморского климата на сухой центральноазиатский. В свою очередь, для Горно-Бадахшанской автономной области, охватывающей почти весь горный Памир, характерны три климатические зоны. Во всех климатических зонах Памира происходит потепление климата, в частности в Дарвазе 0,9—1,0 °С; Хороге — 0,33 °С; Ишкашине — 0,54 °С; Ирхте — 0,39 °С; Джавшангозе — 0,36 °С; Мургабе — 0,45 °С, причем данный процесс протекает в ускоренном виде на высокогорьях [16].

По данным метеостанции Дарваз, расположенной на границе южной и центральной зон Памира, вертикальный градиент составляет около 40 мм на 100 м высоты, что свидетельствует о более влажных предгорьях и существовании широких котловин, имеющих открытый выход на запад, навстречу влажным воздушным потокам. По мере продвижения воздушного течения вглубь горной области и переваливания через хребты влажный воздух конвертирует влагу и становится сухим. Среднегодовое количество атмосферных осадков на восточном Памире незначительное и варьируется в пределах 40—140 мм со средним многолетним значением около 76 мм. Дефицит осадков на восточном Памире обусловлен тем, что на западном Памире, характеризуемом высокими горными хребтами (5000—6000 м н.у.м.), происходит разгрузка влажного воздуха с выпадением обильных осадков, и воздух, переваливший через хребты западного Памира, становится сухим.

Стабильные изотопы кислорода и водорода широко применяются в гидрологических исследованиях для определения источников атмосферных осадков, транспирации влаги и стоков рек.

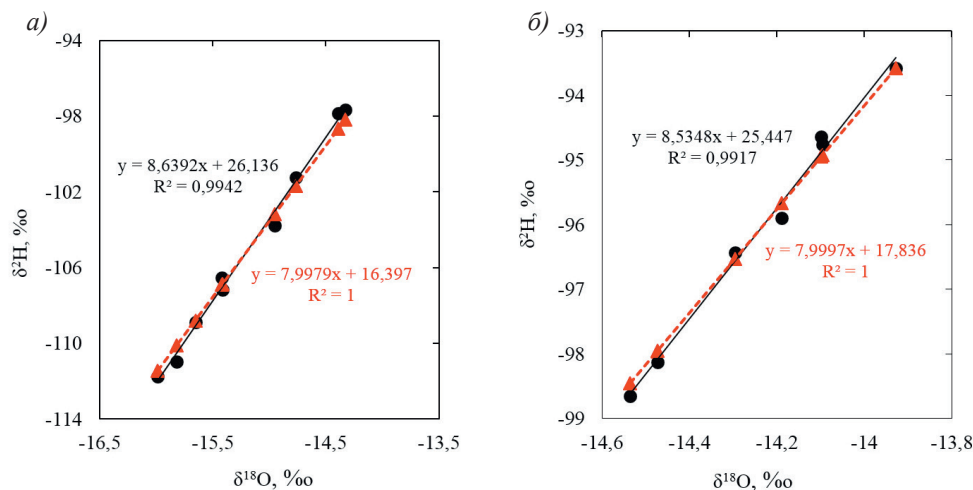


Рис. 3. Диаграмма соотношений  $\delta^2\text{H} \sim \delta^{18}\text{O}$  для вод рек Сурхоб (а) и Обихингоу (б) по сравнению с Глобальной метеоритной водной линией (ГМВЛ) (пунктир).

Fig. 3. Diagram of  $\delta^2\text{H} \sim \delta^{18}\text{O}$  for the waters of the Surkhob (a) and Obikhingou (b) rivers compared to the Global Meteoritic Water Line (GMWL) (dotted line).

На рис. 3 приведена линейная зависимость между  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в водах рек Сурхоб и Обихингоу по сравнению с Глобальной метеоритной водной линией (ГМВЛ).

В отличие от изотопов осадков, в речной воде могут происходить процессы, приводящие к фракционированию изотопов, такие как процессы после выпадения снега и дальнейшее испарение, что может изменить соотношение между  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ . Более ранние работы по процессам таяния снега показали, что испарение и повторное замерзание приводят к уменьшению наклона зависимости  $\delta^2\text{H}$  от  $\delta^{18}\text{O}$ , а таяние не оказывает явного влияния на изотопный состав воды [16]. В среднем, линия испарения воды располагается под ГМВЛ [17, 18]. Однако, расположение точек на зависимости  $\delta^2\text{H} \sim \delta^{18}\text{O}$  выше ГМВЛ означает, что испарение речной воды не оказывает существенного влияния на соотношение  $\delta^2\text{H} \sim \delta^{18}\text{O}$ .

На западном и центральном Памире дефицит атмосферных осадков наблюдается летом, и речной сток формируется в основном из талых вод ледников, в которых изотопное фракционирование минимально. Из рис. 3 видно, что значения изотопов  $^2\text{H}$  и  $^{18}\text{O}$  на диаграмме вплотную расположены к ГМВЛ, определяющие почти отсутствие испарения речных вод и существенный вклад талых ледниковых вод в формирование стока (рис. 4).

Пространственное изменение влажного воздуха с запада на восток происходит по механизму его постепенного облегчения по маршруту движения в результате перемешивания теплой воздушной массы с местным холодным воздухом и образования осадков.

Распространение западных ветров на большие расстояния происходит в декабре и январе, и значения  $d$  варьируются от 0 до 18 %. Атмосферные условия

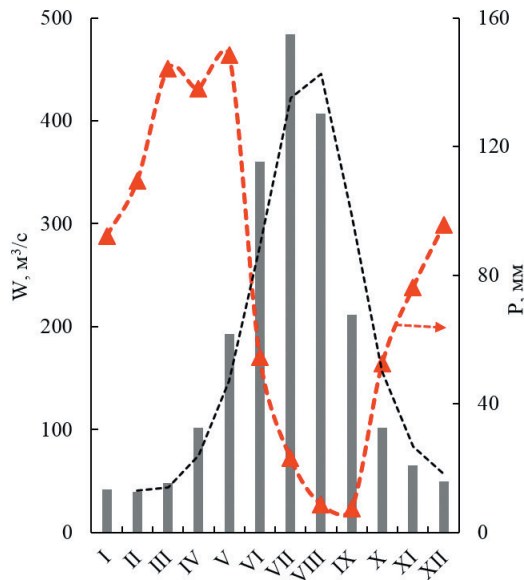


Рис. 4. Среднемесячные значения атмосферных осадков в бассейне и гидрограф р. Обихингоу за период 1950–2020 гг.

Fig. 4. Average monthly values of atmospheric precipitation in the basin and Hydrograph of the Obikhingou River for the period 1950—2020.

в холодное время года благоприятствуют образованию водяного пара с более высокими значениями  $d$ , когда преобладает холодный и сухой воздух с континента [19—21].

Общее увеличение значений  $d$  в атмосферных осадках с западной части на восточную часть Памира соответствует метеорологической эволюции средиземноморского потока, в котором воздух становится суше по мере продвижения на восток. Характер сезонного распределения атмосферных осадков на западном и восточном Памире оценивался с помощью обобщения данных метеорологических станций Нуробод и Мургаб за период 1960—2020 гг. (рис. 5). Как видно из рис. 5, если максимальное количество атмосферных осадков на западном Памире выпадает весной (март—май), то на востоке Памира оно приходится на лето. Наряду с этим, значения  $d$  для речных вод бассейна р. Вахш лежат в пределах от 15,85 до 17,94 %, что свидетельствует о средиземноморском происхождении влаги.

Изотопный состав рек Сурхоб и Обихингоу, как видно из рис. 6, зависит от высоты точек отбора проб воды. Судя по корреляциям, представленным на рис. 6, связь между  $\delta^{18}\text{O}$  речных вод и высотой является значительной.

Наблюдаемая скорость вертикального падения  $\delta^{18}\text{O}$  воды р. Обихингоу (0,007 ‰ / 100 м) значительно ниже, а у р. Сурхоб (0,32 ‰ / 100 м) немного выше среднего мирового значения, что чуть превышает среднее значение по миру (0,28 ‰ / 100 м) [22]. В бассейне р. Обихингоу более низкая наблюдаемая скорость



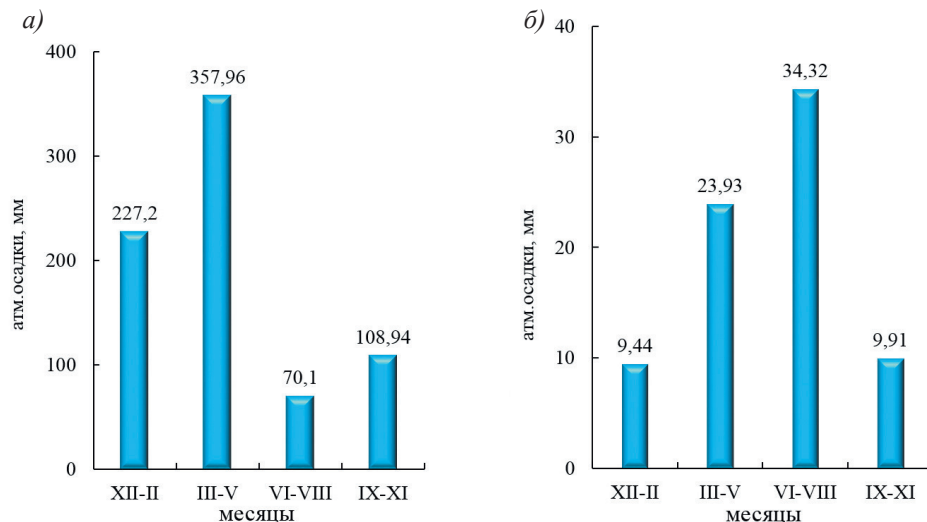


Рис. 5. Сезонное распределение атмосферных осадков на западной (метеостанция Нуробод) (а) и восточной (метеостанция Мургаб) (б) части Памира.

Fig. 5. Seasonal distribution of atmospheric precipitation in the Western (Nurobod meteostation) (a) and Eastern (Murgab meteostation) (b) parts of the Pamirs.

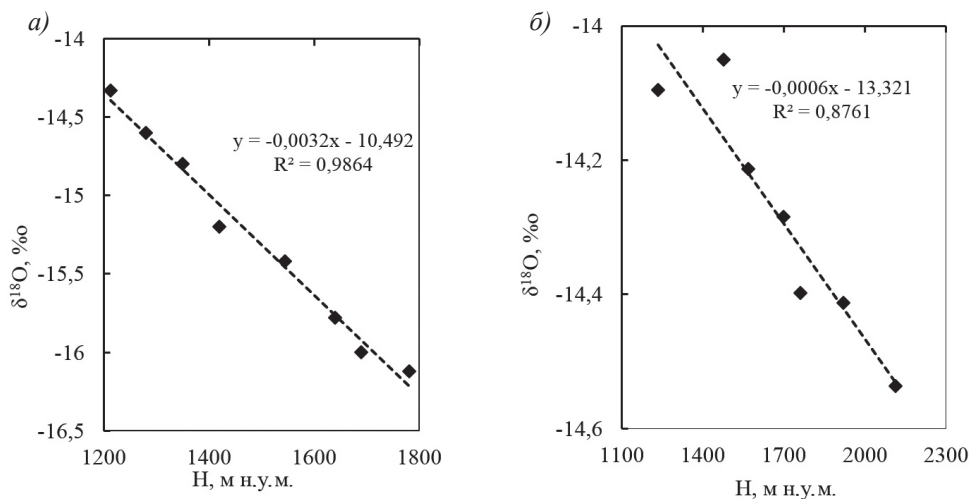


Рис. 6. Высотная зависимость  $\delta^{18}\text{O}$  для рек Сурхоб (а) и Обихингоу (б).

Fig. 6. Altitude dependence of  $\delta^{18}\text{O}$  for the Surkhob (a) and Obikhingou (b) rivers.

вертикального падения  $\delta^{18}\text{O}$  в речной воде, вероятно, связана с особенностями рельефа и водных ресурсов. Горный регион Памир состоит из острых гор и глубоких долин. Глубокий накопленный в долинах снег представляет собой смешанный

слой снега с разных высот; он тает в период с мая по август, ограничивая выбор изотопов. Такая топография способствует постепенному таянию снега и льда в относительно узком диапазоне высот по мере постепенного повышения температуры с весны до лета. Это ограничивает диапазон изменения  $\delta^{18}\text{O}$  воды и приводит к наблюдаемой низкой скорости вертикального падения  $\delta^{18}\text{O}$  речной воды.

При нулевых значениях  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках значения  $\delta^2\text{H}$  в среднем равны 10 ‰, а в морской воде они равны приблизительно нулю как по дейтерию, так и по кислороду 18. Это превышение значений  $\delta^2\text{H}$  над линией с наклоном 8, проходящей через пересечение осей координат, получило название избытка дейтерия, обозначаемой  $d$ :

$$d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}. \quad (1)$$

Как было указано выше, с увеличением высоты происходит уменьшение значений  $\delta^{18}\text{O}$  и, согласно (1),  $d$  возрастает. Например, значения  $d$  вод р. Сурхоб, отобранных на высотах 1200 м н.у.м. и 1800 м н.у.м., соответствуют 10 и 16 ‰.

В бассейне р. Вахш наблюдается очевидная пространственная тенденция уменьшения  $d$  в речных водах с запада на восток, и его значения находятся в диапазоне от 15 до 18 ‰. Более высокий  $d$  в речных водах бассейна р. Вахш отражает влияние влаги из Средиземного моря. Еще одной причиной пространственного изменения  $d$  речных вод является сезонность осадков между западом и востоком Таджикистана. Таким образом, сезонная структура осадков оказывает значительное влияние на  $d$  осадков. На станциях центральной и западной частях Таджикистана осадки выпадают в основном зимой и весной, а летом наблюдается явный недостаток осадков.

### Выводы

Обнаружено умеренное уменьшение  $\delta^{18}\text{O}$  с высотой для рек Сурхоб и Обихингоу со скоростью 0,32 ‰ / 100 м и 0,007 ‰ / 100 м, соответственно.

Обнаружена пространственная тенденция уменьшения избытка дейтерия ( $d$ ) в речных водах бассейна р. Вахш с запада на восток, указывающая, что основным источником атмосферных осадков в бассейне р. Вахш является средиземноморская влага, переносимая западными воздушными массами.

Обнаружены уменьшение  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  с высотой и пространственное уменьшение избытка дейтерия ( $d$ ) с запада на восток, обусловленные изменением весового соотношения  $\text{H}_2\text{O} / \text{HDO}$  по высоте и направлению движения влажной воздушной массы из Средиземноморья.

### Список литературы

1. Aizen V.B., Aizen E.M., Melack J.M. Climate, snow cover, glaciers, and runoff in the Tien Shan, central Asia // J. Am. Water Resources Assoc. 1995. Vol. 31. P. 1113—1129. doi: 10.1111/j.1752-1688.1995.tb03426.x12.
2. Liu Q., Tian L.D., Wang J.L., Wen R., Weng Y.B., Shen Y.P., Vladislav M., Kanaev E. A study of longitudinal and altitudinal variations in surface water stable isotopes in West Pamir, Tajikistan // Atmos. Res. 2015. Vol. 153. P. 10—18. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.07.029.

3. Juhlke T.R., Meier Ch., Geldern R., Vanselow K.A., Wernicke J., Baidulloeva J., Johannes A.C., Barth J.A.C., Weise S.M. Assessing moisture sources of precipitation in the Western Pamir Mountains (Tajikistan, Central Asia) using deuterium excess. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2019. Vol. 71(1). P. 1—16. doi: 10.1080/16000889.2019.1601987.
4. Jeelani G., Deshpande R.D., Shah R.A., Hassan W. Influence of southwest monsoons in the Kashmir Valley, western Himalayas // *Isotope Environ. Health Study*. 2017. Vol. 53. P. 400—412. doi: 10.1080/10256016.2016.1273224.
5. Kattan Z. Chemical and environmental isotope study of precipitation in Syria // *J. Arid. Environ.* 1997. Vol. 35. P. 601—615. doi: 10.1006/jare.1996.0228.
6. Al Charideh A.R., Zakhem B.A. Distribution of tritium and stable isotopes in precipitation in Syria // *J. Hydrol. Sci.* 2010. Vol. 55. P. 832—843. doi: 10.1080/02626667.2010.487977.
7. Hussain Sh., Song Xianfang S., Hussain I., Jianrong L., Mei H.D., Hu Y.L., Huang W. Controlling factors of the stable isotope composition in the precipitation of Islamabad, Pakistan // *Adv. Meteorol.* 2015. Vol. 9. P. 1—11. doi: 10.1155/2015/817513.
8. Wang X., Li Z., Tayier R., Wang S. Characteristics of atmospheric precipitation isotopes and isotopic evidence for the moisture origin in Yushugou River basin, Eastern Tianshan Mountains, China // *Quat. Int.* 2015. Vol. 380—381. P. 106—115. doi: 10.1016/j.quaint.2014.12.023.
9. Aizen V.B., Aizen E.M., Melack J., Martma T. Isotopic measurements of precipitation on central Asian glaciers (southeastern Tibet, northern Himalayas, central Tien Shan) // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101. P. 9185—9196. doi: 10.1029/96JD00061.
10. Kreutz K.J., Wake C.P., Aizen V.B., DeWayne Cecil L., Synal H.A. Seasonal deuterium excess in a Tien Shan ice core: influence of moisture transport and recycling in Central Asia // *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30. P. 2-1—2-4.
11. Tian L., Yao T., Macclune K., White J.W.C., Schilla A., Bruce H., Vaughn R., Vachon K.I. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. P. 1—12.
12. Lamb K.D., Clouser B.W., Bolot M., Sarkozy L., Ebert V. Laboratory measurements of HDO/H<sub>2</sub>O isotopic fractionation during ice deposition in simulated cirrus clouds. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2017. Vol. 114. P. 5612—5617. doi: 10.1073/pnas.1618374114.
13. Jouzel J., Merlivat L. Deuterium and oxygen 18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89. P. 11749—11757.
14. Uemura R., Matsui Y., Yoshida N., Abe O., Mochizuki S. Isotopic fractionation of water during snow formation: experimental evidence of kinetic effect. *Polar Meteorol. Glaciol.* 2005. Vol. 19. P. 1—14.
15. Норматов П.И., Фрумин Г.Т., Муминов А.О., Норматов И.Ш. Исследование изотопного состава воды ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) трансграничных рек Зеравшана, Вахша и их притоков // *Географический вестник*. 2017. № 4 (43). С. 97—104. doi: 10.17072/2079-7877-2017-4-97-104.
16. МКВК. База знаний по использованию земельных и водных ресурсов бассейна Аральского моря. Реки. Вахш: [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.cawater-info.net](http://www.cawater-info.net). Дата обращения: 12.03.2022.
17. Zhou S., Nakawo M., Sakai A., Matsuda Y., Duan K., Pu J. Water isotope variations in the snow pack and summer precipitation at July. Glacier, Qilian Mountains in northwest China // *Chin. Sci. Bull.* 2007. Vol. 52. P. 2963—2972.
18. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science*. 1961. Vol. 133. P. 1702—1703.
19. Rozanski K., Arguas-Arguas L., Gongiantini R. Isotope patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotope Records. Geophysical Monograph.* // American Geophysical Union. 1993. Vol. 78. P. 1—36.
20. Gat J.R., Carmi I. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area // *J. Geophys. Res.* 1970. Vol. 75. P. 3039—3048. doi: 10.1029/JC075i015p03039.
21. Rindsberger M., Magaritz M., Carmi I., Gilad D. The relation between air mass trajectories and the water isotope composition of rain in the Mediterranean Sea area // *Geophys. Res. Lett.* 1983. Vol. 10. P. 43—46. doi: 10.1029/GL010i001p00043.
22. Liotta M., Favara R., Valenza M. Isotopic composition of the precipitations in the central Mediterranean: origin marks and orographic precipitation effects // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2006. Vol. 111. P. 1—12.

23. *Poage M.A., Chamberlain C.P.* Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: considerations for studies of paleoelevation change // *Am. J. Sci.* 2001. Vol. 301. P. 1—15.

### References

1. *Aizen V.B., Aizen E.M., Melack J.M.* Climate, snow cover, glaciers, and runoff in the Tien Shan, central Asia. *J. Am. Water Resources Assoc.* 1995, 31: 1113—1129. doi: 10.1111/j.1752-1688.1995.tb03426.x12.
2. *Liu Q., Tian L.D., Wang J.L., Wen R., Weng Y.B., Shen Y.P., Vladislav M., Kanaev E.* A study of longitudinal and altitudinal variations in surface water stable isotopes in West Pamir, Tajikistan. *Atmos. Res.* 2015, 153: 10—18. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.07.029.
3. *Juhlke T.R., Meier Ch., Geldern R., Vanselow K.A., Wernicke J., Baidulloeva J., Johannes A.C. Barth J.A.C., Weise S.M.* Assessing moisture sources of precipitation in the Western Pamir Mountains (Tajikistan, Central Asia) using deuterium excess. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology.* 2019, 71(1): 1—16. doi: 10.1080/16000889.2019.1601987.
4. *Jeelani G., Deshpande R.D., Shah R.A., Hassan W.* Influence of southwest monsoons in the Kashmir Valley, western Himalayas. *Isotope Environ. Health Study.* 2017, 53: 400—412. doi: 10.1080/10256016.2016.1273224.
5. *Kattan Z.* Chemical and environmental isotope study of precipitation in Syria. *J. Arid. Environ.* 1997, 35: 601—615. doi: 10.1006/jare.1996.0228.
6. *Al Charideh A.R., Zakhem B.A.* Distribution of tritium and stable isotopes in precipitation in Syria. *J. Hydrol. Sci.* 2010, 55: 832—843. doi:10.1080/02626667.2010.487977.
7. *Hussain Sh., Song Xianfang S., Hussain I., Jianrong L., Mei H.D., Hu Y.L., Huang W.* Controlling factors of the stable isotope composition in the precipitation of Islamabad, Pakistan. *Adv. Meteorol.* 2015, 9: 1—11. doi: 10.1155/2015/817513.
8. *Wang X., Li Z., Tayier R., Wang S.* Characteristics of atmospheric precipitation isotopes and isotopic evidence for the moisture origin in Yushugou River basin, Eastern Tianshan Mountains, China. *Quat. Int.* 2015, 380—381: 106—115. doi: 10.1016/j.quaint.2014.12.023.
9. *Aizen V.B., Aizen E.M., Melack J., Martma T.* Isotopic measurements of precipitation on central Asian glaciers (southeastern Tibet, northern Himalayas, central Tien Shan). *J. Geophys. Res.* 1996, 101: 9185—9196. doi: 10.1029/96JD00061.
10. *Kreutz K.J., Wake C.P., Aizen V.B., DeWayne Cecil L., Synal H.A.* Seasonal deuterium excess in a Tien Shan ice core: influence of moisture transport and recycling in Central Asia. *Geophys. Res. Lett.* 2003, 30: 2-1—2-4.
11. *Tian L., Yao T., Macclune K., White J.W.C., Schilla A., Bruce H., Vaughn R., Vachon K.I.* Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources. *J. Geophys. Res.* 2007, 112: 1—12.
12. *Lamb K.D., Clouser B.W., Bolot M., Sarkozy L., Ebert V.* Laboratory measurements of HDO/H<sub>2</sub>O isotopic fractionation during ice deposition in simulated cirrus clouds. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2017, 114: 5612—5617. doi: 10.1073/pnas.1618374114.
13. *Jouzel J., Merlivat L.* Deuterium and oxygen 18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation. *J. Geophys. Res.* 1984, 89: 11749—11757.
14. *Uemura R., Matsui Y., Yoshida N., Abe O., Mochizuki S.* Isotopic fractionation of water during snow formation: experimental evidence of kinetic effect. *Polar Meteorol. Glaciol.* 2005, 19: 1—14.
15. *Normatov P.I., Frumin G.T., Muminov A.O., Normatov I. Sh.* Study of water isotope composition ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) of Transboundary Rivers Zeravshan, Vakhsh and their tributaries. *Geograficheskii vestnik. Geographical Bulletin.* 2017, 4(43): 97—104. doi: 10.17072/2079-7877-2017-4-97-104. [In Russian].
16. ICWC. Knowledge base on land and water resources use in the Aral Sea Basin. Rivers. Vakhsh. Available at: [www.cawater-info.net](http://www.cawater-info.net) (accessed 12.03.2022). [In Russian].
17. *Zhou S., Nakawo M., Sakai A., Matsuda Y., Duan K., Pu J.* Water isotope variations in the snow pack and summer precipitation at July. Glacier, Qilian Mountains in northwest China. *Chin. Sci. Bull.* 2007, 52: 2963—2972.
18. *Craig H.* Isotopic variations in meteoric waters. *Science.* 1961, 188: 1702—1703.

19. *Rozanski K., Arguas-Arguas L., Gongiantini R.* Isotope patterns in modern global precipitation. *Climate Change in Continental Isotope Records. Geophysical Monograph. American Geophysical Union.* 1993, 78: 1—36.
20. *Gat J.R., Carmi I.* Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. *J. Geophys. Res.* 1970, 75: 3039—3048. doi: 10.1029/JC075i015p03039.
21. *Rindsberger M., Magaritz M., Carmi I., Gilad D.* The relation between air mass trajectories and the water isotope composition of rain in the Mediterranean Sea area. *Geophys. Res. Lett.* 1983, 10: 43—46. doi: 10.1029/GL010i001p00043.
22. *Liotta M., Favara R., Valenza M.* Isotopic composition of the precipitations in the central Mediterranean: origin marks and orographic precipitation effects. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2006, 111: 1—12.
23. *Poage M.A., Chamberlain C.P.* Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: considerations for studies of paleoelevation change. *Am. J. Sci.* 2001, 301: 1—15.

### ***Информация об авторах***

*Норматов Ином Шерович*, д-р хим. наук, профессор, член-корреспондент Национальной Академии наук Таджикистана, заведующий кафедрой метеорологии и климатологии физического факультета Таджикского национального университета, inomnor@mail.ru.

*Фрумин Григорий Тевелевич*, д-р хим. наук, профессор, профессор физической географии и природопользования Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, gfrumin@mail.ru.

*Хомидов Анвар*, ведущий специалист Агентства по гидрометеорологии Республики Таджикистан, anvar@mail.ru.

### ***Information about authors***

*Normatov Inom Sherovich*, Doctor of Sciences (Chem.), Corresponding member National Academy of Sciences of Tajikistan, Head of Meteorology and Climatology Department of the Tajik National University.

*Frumin Grigory Tevelevich*, Grand PhD (Chem Sci.), Prof. of the Physical Geography and Nature Management of the Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen.

*Homidov Anvar*, Leading Specialist of the Agency for Hydrometeorology of the Republic of Tajikistan.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 30.01.2022.*

*Принята к публикации после доработки 29.04.2022.*

*The article was received on 30.01.2022.*

*The article was accepted after revision on 29.04.2022.*