

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-3-98-112>

УДК 551.577:556.32(235.211)

Исследование пространственного распределения атмосферных осадков Центрального и Западного Памира с применением стабильных изотопов поверхностных вод

И.Ш. Норматов¹, А. Хомидов², П.И. Норматов³, А.О. Муминов¹

¹Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан;

²Агентство по гидрометеорологии Республики Таджикистан, г. Душанбе, Таджикистан;

³Институт математики Национальной Академии наук Таджикистана,
г. Душанбе, Таджикистан
inomnor@gmail.com

По данным метеорологических станций на территории Республики Таджикистан исследуется пространственное распределение и источники атмосферных осадков Центрального и Западного Памира. Отмечено, что в западной части максимумы осадков наблюдаются в зимне-весенний, а в восточной части Памира – в летний период (май-август), что объясняется проникновением воздушных масс из северной части Индийского океана. Анализируется изменение соотношения жидких и твердых осадков в зависимости от высоты местности. При установлении закономерностей используются результаты определения изотопно-кислородного и дейтериевого состава вод рек на исследуемой территории.

Ключевые слова: Памир, Таджикистан, воздушные массы, атмосферные осадки, река Пяндж, стабильные изотопы (²H, ¹⁸O).

Studying the spatial distribution of precipitation in the Central and Western Pamirs using stable isotopes of surface water

I.Sh. Normatov¹, A. Homidov², P.I. Normatov³, A.O. Muminov¹

¹Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan;

²Hydrometeorology Agency of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan;

³Mathematics Institute of the Tajik National Academy of Sciences, Dushanbe, Tajikistan
inomnor@gmail.com

Data from meteorological stations on the territory of the Republic of Tajikistan are used to study the spatial distribution and sources of precipitation in the Central and Western Pamirs. It is noted that precipitation maxima are observed in the winter-spring period in the western part and in summer (May-August) in the eastern part of the Pamirs, which is explained by the penetration of air masses from the northern Indian Ocean. A change in the ratio of liquid and solid precipitation depending on altitude is analyzed. When establishing patterns, the results of determining the isotope-oxygen and deuterium composition of river water in the study area are used.

Keywords: Pamirs, Tajikistan, air mass, precipitation, Pyanj River, stable isotopes (²H, ¹⁸O)

Введение

Влияние горной системы Памир – Тянь-Шань на распространение воздушных масс является определяющим фактором в формировании гидрологического климата в Центральной Азии [3, 4, 8]. Горы Памира являются орографическим барьером [2], где происходит разделение западных воздушных масс на две ветви – западную, характеризующуюся высокими значениями осадков с максимумом в зимне-весенний период, и восточную – с низкими значениями осадков и максимумом в летний период.

На Памире около 85 % осадков выпадает в виде снега зимой [23], и снабжение воздушных масс влагой обусловлено синоптической циркуляцией западных ветров зимой с запада на восток и менее ограниченными вторжениями на север и юг летнего муссона из Индии и северными вторжениями летом [1, 12]. От соседних Гималаев и Гиндукуша Памир отличается тем, что водный сток рек в основном определяется таянием снега и ледников [1, 6, 20, 22, 26].

Уменьшение оледенения и количества осадков на востоке Памира напрямую подразумевает локально изменяющиеся величины стока. Сток демонстрирует отчетливую сезонность с устойчивым низким значением зимой, быстрым увеличением весной, высоким пиком с сильной изменчивостью летом и резким снижением в начале осени.

Водные ресурсы высокогорного Памира являются основным источником питания трансграничной реки Амударья в регионе Центральной Азии, включая двух ее главных притоков: рек Вахш и Пяндж. В свою очередь, водные ресурсы этих рек являются источниками водоснабжения населения региона, орошения земель, сельского хозяйства (более 40 % ВВП региона) и производства электрической энергии на крупных гидроэлектростанциях как Нурекский ГЭС (3000 МВт) и ныне строящейся Рогунской ГЭС (3600 МВт).

Целью настоящей работы являлось исследование пространственного распределения атмосферных осадков по территории Центрального и Западного Памира с изучением изотопно-кислородного и дейтериевого состава рек Памира – информативного индикатора в гидрологических и гляциологических исследованиях для установлении закономерностей процессов льдообразования, снегонакопления и протекания взаимных агрегатных превращений.

Материалы и методы

Разнообразие климатических условий Центральной Азии, закономерности изменения метеорологических процессов в зависимости от географических особенностей региона приводят к необходимости климатического районирования.

Территория Республики Таджикистан характеризуется четырьмя климатическими зонами, три из которых расположены в пределах Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО), охватывающей почти весь горный Памир (рис. 1) [16, 18].

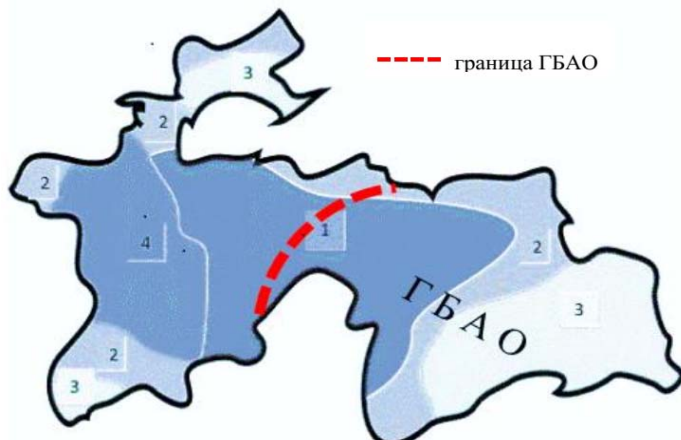


Рис. 1. Климатические зоны Республики Таджикистан: 1 – теплый континентальный климат; 2 – холодный полусухой климат; 3 – сухой холодный климат; 4 – теплый средиземноморский климат.

Fig. 1. Climatic zones of the Republic of Tajikistan: 1 – warm continental climate; 2 – cold semi-arid climate; 3 – dry cold climate; 4 – warm Mediterranean climate.

Для мониторинга метеорологических условий и оценки динамики атмосферных осадков по климатическим зонам использовались данные метеорологических станций Дарваз (1288 м), Хумроги (1737 м), Рушан (1981 м), Хорог (2080 м), Ирхт (3276 м), Булункул (3744 м), Мургаб (3576 м) и Шаймак (3840 м) за период 1950–2020 гг. (рис. 2) с применением общепринятых статистических методов обработки (корреляции Пирсона и Спирмена).

Исследование закономерностей распределения осадков базируется на результатах определения изотопно-кислородного и дейтериевого состава вод рек на рассматриваемой территории.

Изотопно-кислородный и дейтериевый состав, дейтериевый эксцесс считаются информативными индикаторами в гидрологических и гляциологических исследованиях для установления закономерностей процессов льдообразования, снегонакопления и протекания взаимных агрегатных превращений [17]. Дейтериевый эксцесс осадков связан с кинетическим фракционированием при испарении воды. Влажность относительного насыщения при температуре поверхности моря и скорости ветра являются основными факторами, влияющими на d-эксцесс осадков. В свою очередь, d-эксцесс является носителем информации о климатических условиях источников водяного пара. Анализы образцов речных вод выполнялись на Wavelength-Scanned Cavity Ringdown Spectroscopy (WS-CRDS), и изотопный состав водорода и кислорода выражались в относительных величинах $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$: $\delta = [(R_{об} / R_{ст}) - 1] \cdot 1000\%$, где $R_{об}$ и $R_{ст}$ – отношения

$^2\text{H}/^1\text{H}$ и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в измеряемом образце и в стандарте соответственно. В качестве стандарта принята средняя океаническая вода (SMOW, Vienna, IAEA). Точность измерения составляла $\pm 0.05\%$.

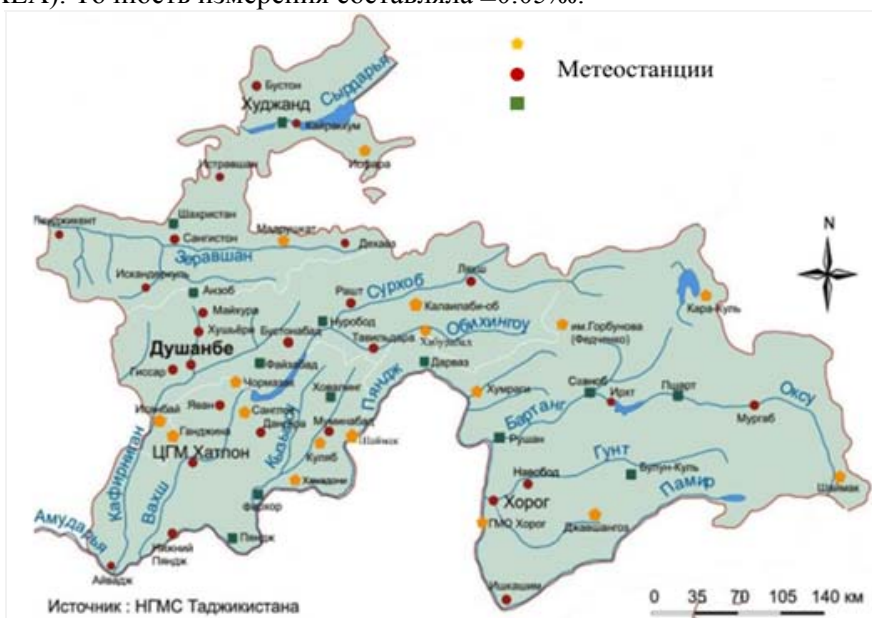


Рис. 2. Метеорологическая наблюдательная сеть Республики Таджикистан.
Fig. 2. Meteorological Observation Network of the Republic of Tajikistan.

Отборы проб воды для изотопного анализа производились за период 2016–2021 гг. с периодичностью 4 раза в год по 5 образцов с каждой точки отбора (рис. 3) из рек бассейна реки Пяндж (таблица).



Рис. 3. Точки отбора проб воды из притоков реки Пяндж.
Fig. 3. Points of water sampling from the Puanj river tributaries.

Таблица. Название рек, координаты и высоты их расположения над уровнем моря

Table. The names of the rivers, their coordinates and altitudes

№	Река	Координаты		Высота, м н.у.м
		N	E	
1	Язгулем	38.15277	71.33961	1525
2	Панджоб	38.30404	71.32921	1470
3	Вишихарв	38.36883	71.17133	1425
4	Курговород	38.40704	71.13806	1360
5	Вишхарв	38.47681	71.01158	1305
6	Обихумбод	38.46652	70.77991	1170
7	Чорчаман	38.41115	70.66496	1105
8	Шкев	38.34784	70.60146	1075

Исследование пространственного распределения атмосферных осадков

Влажный воздух океанического происхождения может переноситься на большие расстояния и способствовать выпадению осадков в отдаленных регионах. В условиях продолжающегося изменения климата взаимосвязь между источниками и поглотителями водяного пара постоянно меняется и играет важную роль в оценке водного бюджета [9]

Следует отметить, что поступление и распространение воздушных масс по террасам высокогорья имеет отличительные черты, обусловленные фактором влияния орографии горной местности. Высокие вершины гор в большинстве случаев становятся преградой в обеспечении удаленных территорий атмосферными осадками. В качестве примера можно привести средние многолетние за период 1950–2020 гг. месячные значения атмосферных осадков в западной, центральной и восточной части Памира. Данные значения показывают определенную последовательность в проявлении сезонов с максимальным значением осадков в выше указанных частях Памира (рис. 4а, б, в).

Анализ рис. 4 позволяет выявить закономерность пространственного распределения осадков: если на Западном и Центральном Памире обильное количество осадков приходится на весенний период с максимумами в март и апреле месяцах, то в восточной части Памира максимум атмосферных осадков приходится на май-август месяцы.

Проявление максимальных значений атмосферных осадков в восточной части Памира в конце весны и летом вызвано проникновением воздушных масс из северной части Индийского океана. Среднегодовое количество осадков на восточном Памире незначительно (40–140 мм при среднем значении около 76 мм).

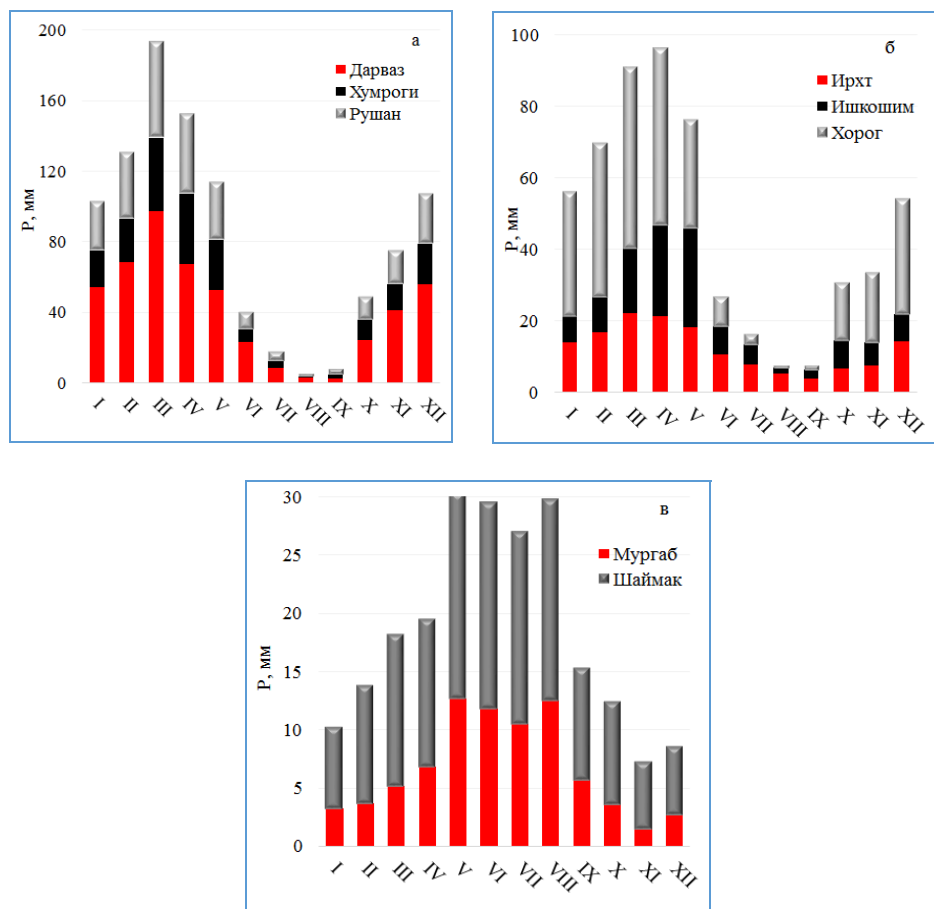


Рис. 4. Средние месячные многолетние значения атмосферных осадков в западной (а), центральной (б) и восточной части (в) Памира за период 1950–2020 гг.

Fig. 4. Average long-term monthly precipitation in the western (a), central (б), and eastern (в) parts of the Pamirs for the period of 1950–2020.

Для определения динамики процессов формирования снежно-ледовых ресурсов и прогнозирования будущих сценариев водообеспечения рек важна оценка доли снежного покрова в общем количестве осадков в бассейнах рек [10].

На рис. 5 приведены количественные значения глубины снежного покрова по отношению к атмосферным осадкам на метеорологических станциях. Эти значения показывают, что на более низких высотах Западного Памира (Дарваз, Хумроги) атмосферные осадки выпадают в основном в жидкой форме, а небольшой по глубине снежный покров сохраняется недолго. Далее с нарастанием высоты происходит преобладание осадков в твердой форме.

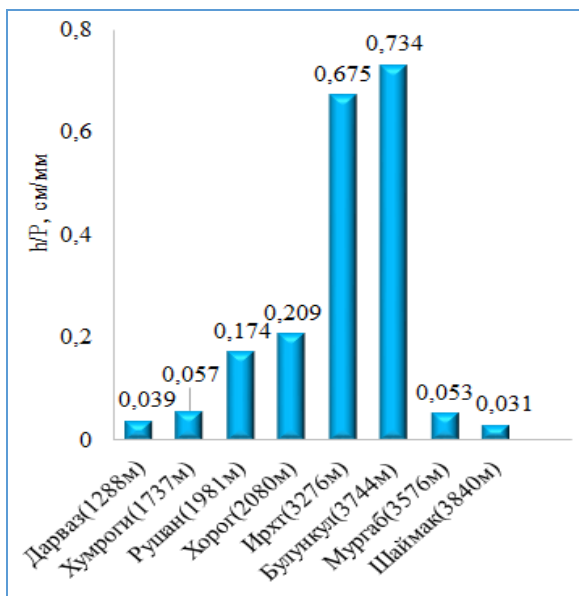


Рис. 5. Изменение отношения среднегодовых значений глубины снежного покрова (h , см) к среднегодовым осадкам (P , мм) от высоты местности на Западном, Центральном и Восточном Памире.

Fig. 5. Changes in the ratio of the average annual values of snow depth (h , cm) to average annual precipitation (P , mm) depending on altitude in the Western, Central and Eastern Pamirs.

Метеостанции Мургаб и Шаймак находятся на восточном Памире, где среднегодовое количество атмосферных осадков, как отмечено выше, ничтожно мало. На более низких высотах снежный покров в горах в целом сократился по продолжительности (в среднем на 5 дней за десятилетие, с вероятным диапазоном от 0 до 10 дней за десятилетие [9]. Изменение снежного покрова на меньших высотах в основном обусловлено увеличением количества осадков, выпадающих в виде жидкости (дождя), и увеличением таяния на всех высотах из-за изменений атмосферных воздействий, в частности повышения температуры воздуха [14], а также из-за влияния различных примесей и загрязняющих веществ атмосферного происхождения на процесс таяния снежного покрова.

В последнее время проблема влияния различных примесей и загрязняющих веществ атмосферного происхождения на процесс таяния снежного покрова стала особенно актуальной [25]. Это связано с светопоглощающими частицами, которые включают в себя осажденные аэрозоли, такие как сажа, органический углерод и минеральная пыль [24]. Из-за их сезонно изменяющегося потока и воздействия осажденных на снежном покрове аэрозолей, а также эпизодического характера в случае осаждения пыли [5, 11], светопоглощающие частицы способствуют межгодовым

колебаниям скорости сезонного таяния снега [19]. Так, увеличение осадения черного углерода из антропогенных источников и источников сжигания биомассы способствовало снижению снежного покрова в Высокогорной Азии [12, 28] и Южной Америке [15].

Исследование изотопного состава поверхностных вод Западного и Центрального Памира

Для установления вклада воздушных масс в перенос водяного пара широко применяются изотопные методы. Эти методы основаны на прослеживании изменения значений изотопов ^2H и ^{18}O по мере продвижения водяного пара из исходной зоны формирования и агрегатного перехода и формирования атмосферных осадков. Например, согласно [13], западный поток из Северной Атлантики и Северного Ледовитого океанов связан с водяным паром, обедненным ^{18}O , в то время как муссонный перенос на восток из тропического Индийского океана, Южно-Китайского моря и Восточной Азии связан с водяным паром, обогащенным ^{18}O .

На рис. 6 представлены результаты исследования изотопного состава рек Западного и Центрального Памира между 70° и 71.1° восточной долготы на высотах 1075–1525 м н.у.м. На рисунке видно, что изотопный состав рек ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) изменяется в пределах $-11,5\%$ — $-15,05\%$ и $-73,68\%$ — $-102,67\%$ с взаимной зависимостью $\delta^2\text{H} = 8,08\delta^{18}\text{O} + 18,97$ ($R^2 = 0,9996$). От рек, расположенных на высотах 1075–1525 м н.у.м, трудно ожидать обильного испарения, однако континентальность климата и сухость атмосферы в летний сезон приводят к некоторым локальным испарениям, о чем свидетельствует близко расположенные к Глобальной метеоритной водной линии (ГМВЛ) точки рассеяния изотопных значений (рис. 6).

Другим важным параметром изотопного состава вод, связанного с изотопным фракционированием при испарении воды, является d-эксцесс, который имеет среднее значение около 10 в глобальных осадках. Как было показано выше, на Западном и Центральном Памире летом выпадает мало осадков и основным источников водоснабжения рек становится талая вода ледников. Для рек Западного и Центрального Памира нами были обнаружены высокие значения d-эксцесса и линейная положительная связь с высотой (рис. 7).

Следует отметить, что осадки вблизи Средиземного моря и других морей, граничащих с сушей (Аральское море, Каспийское море, Черное море), характеризуются более высоким d-эксцессом (20‰) [7]. Очевидно, что эта влага может привести к более высокому d-эксцессу в местных осадках и, следовательно, в речной воде.

Уменьшение $\delta^{18}\text{O}$ с увеличением высоты характеризует пространственное изменение осадков между 70° и 71.3° восточной долготы. Высота отбора проб варьируется в диапазоне от 1075 м до 1525 м н.у.м (см. табл. 1), при этом соответствующие значения $\delta^{18}\text{O}$ в речной воде варьируются от $-11,6\%$ при 70°E до $-15,1\%$ при $71,3^\circ\text{E}$.

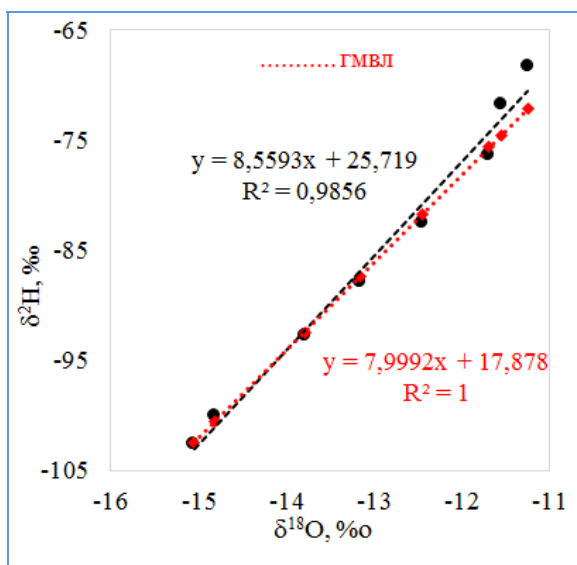


Рис. 6. Линейная зависимость между $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в речных водах Западного и Центрального Памира по сравнению с ГМВЛ.
Fig. 6. The linear relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in the river water of the Western and Central Pamirs as compared to the GMWL.

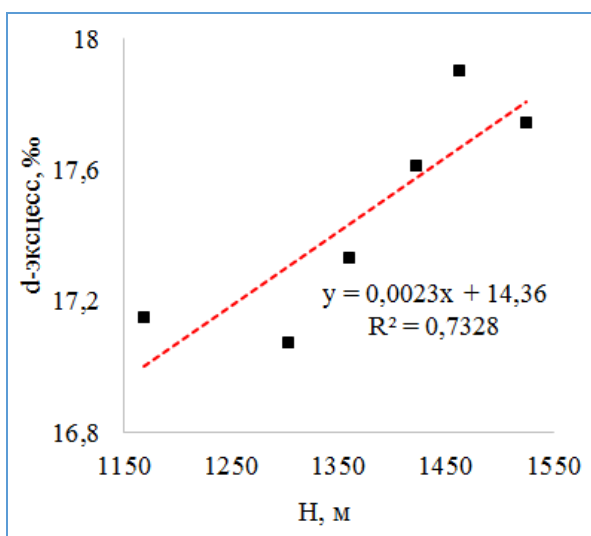


Рис. 7. Связь d-экцесса рек Западного и Центрального Памира с высотой.
Fig. 7. The connection of the d-excess of the rivers of the Western and Central Pamirs with altitude.

Связь между $\delta^{18}\text{O}$ и δD речной воды с высотой является значительной, с общей корреляцией $\delta^{18}\text{O} = -0,0084h - 1,974$ ($R^2 = 0,94$) и $\delta^2\text{H} = -0,0691h + 4,153$ ($R^2 = 0,957$). Следовательно, значения $\delta^{18}\text{O}$ в речной воде демонстрируют небольшие изменения магнитуды в более низком диапазоне высот (рис. 8.). Общая скорость вертикального падения $\delta^{18}\text{O}$ составляет 0,16‰/100м которая ниже, чем в среднем по миру 0,28‰/100м [21].

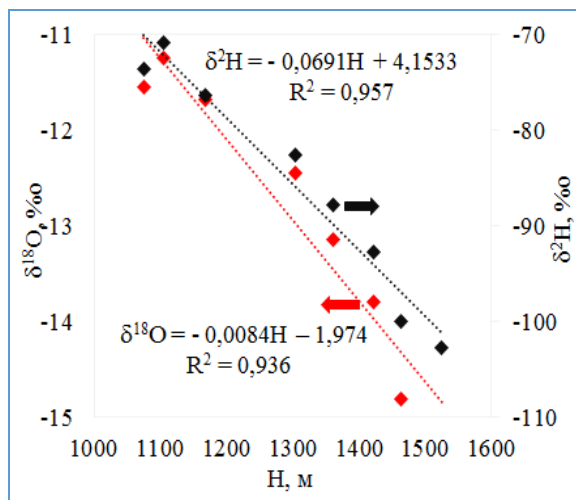


Рис. 8. Зависимость содержания изотопов ^{18}O , ^2H в речных водах Западного и Центрального Памира от высоты обора проб воды.

Fig. 8. The dependence of the concentration of ^{18}O , ^2H isotopes in the river water of the Western and Central Pamirs on the water sampling altitude.

Главным фактором, влияющим на величину d-эксцесса, является неперенное существование изотопов ^2H , ^{18}O в молекулярном виде, т. е. в виде молекулы H_2O . При этом молекулы, содержащие атом ^{18}O , тяжелее тех, которые содержат атом дейтерия, и они в первую очередь выпадают при конденсации, способствуя росту избытка дейтерия в последующих порциях осадков. Содержание более тяжелых молекул H_2^{18}O превышает содержание более легких молекул HDO (H – водород, D – дейтерий, O – кислород) в различных агрегатных состояниях воды в 10–20 раз. Это ведет к более выраженному обеднению тяжелыми молекулами H_2^{18}O пара в облаках при затяжных осадках и соответственно к все более заметному присутствию в последующих порциях осадков легких молекул HDO [27].

Заключение

Установлена последовательность проявления сезонов с максимальным количеством осадков в западной (весной), центральной (поздней весной) и восточной (летом) части Памира, что свидетельствует

о преобладание западных воздушных масс и ослабление их влияния по мере передвижения в восточные части Памира благодаря влиянию горной орографии.

Обнаружено, что отношение глубины снежного покрова к общему количеству осадков на больших высотах является преобладающим. На более низких высотах Западного Памира (Дарваз, Хумроги) атмосферные осадки выпадают в основном в жидкой форме, а при выпадении осадков в виде снега формируемый снежный покров характеризуется небольшой глубиной с коротким периодом существования.

Исследованием изотопного состава рек Западного и Центрального Памира между 70° и $71,1^\circ$ восточной долготы на высотах 1075–1525 м н.у.м. показано, что $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ варьируются между $-11,5\%$ – $-15,05\%$ и $-73,68\%$ – $-102,67\%$, с взаимной зависимостью $\delta^2\text{H} = 8,08\delta^{18}\text{O} + 18,97$ ($R^2 = 0,9996$). Точки рассеяния значений изотопов для изученных рек Памира располагаются вплотную к ГМВЛ, что связано с тем, что летом в западной и центральной части Памира выпадает мало осадков, а талая вода ледников обеспечивает основное питание рек, которое характеризуется незначительной степенью фракционирования.

Для рек Западного и Центрального Памира обнаружена обратная тенденция между пространственным D-избытком и высотой. Высокие его значения дают основание утверждать, что основным источником атмосферных осадков на Западном и Центральном Памире является влага из Средиземноморья, переносимая западными воздушными массами.

Установленное уменьшение $\delta^{18}\text{O}$ с увеличением высоты характеризует пространственное изменение осадков между 70° и $71,3^\circ$ восточной долготы. Высота отбора проб варьируется в диапазоне 1075–1525 м н.у.м, при этом соответствующие значения $\delta^{18}\text{O}$ в речной воде варьируются от $-11,6\%$ при 70°E до $-15,1\%$ при $71,3^\circ\text{E}$. Связь между $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в речных водах с высотой является значительной, с общей корреляцией $\delta^{18}\text{O} = -0,0084h - 1,974$ ($R^2 = 0,94$) и $\delta^2\text{H} = -0,0691h + 4,153$ ($R^2 = 0,957$). Обнаружено, что значения $\delta^{18}\text{O}$ демонстрируют небольшие изменения магнитуды в более низком диапазоне высот. Общая скорость вертикального падения $\delta^{18}\text{O}$ $0,16\%/100\text{м}$ и ниже, чем в среднем по миру $0,28\%/100\text{м}$.

Благодарность: Авторы выражают благодарность доктору Элис Хилл за ее участие в исследованиях по изотопному анализу вод, интерпретацию результатов и за конструктивные замечания и предложения по значительному улучшению статьи. Это исследование поддержано USAID в рамках проекта 5-140 Партнерства по расширению участия в исследованиях (PEER).

Acknowledgments: We thank Dr. Alice Hill for her participation in research on isotope analysis of waters, interpretation of the results and for constructive comments and suggestions for significant improvement of the article. This study supported by USAID as part of the Project 5-140 of the Partnerships for Enhanced Engagement in Research (PEER).

Список литературы

1. Aizen V. B., Mayewski P. A., Aizen E. M., Joswiak D. R., Surazakov A. B., Kaspari S., Grigholm B., Krachler M., Handley M., Finaev A. Stable-isotope and trace element time series from Fedchenko glacier (Pamirs) snow/firn cores // *J. Glaciol.* 2009. Vol. 55. P. 275-291.
2. Baldwin J., Vecchi G. Influence of the Tian Shan on arid extratropical Asia // *Journal of Climate.* 2016. Vol. 29. P. 5741-5762. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0490.1>.
3. Caves J.K., Winnick M.J., Graham S.A., Sj Ostrom D.J., Mulch A., Chamberlain C.P. Role of the esterlies in Central Asia climate over the Cenozoic // *Earth and Planetary Science Letters.* 2015. Vol. 428. P. 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.07.023>.
4. Chen F., Chen J., Huang W., Chen S., Huang X., Jin L., Jia J., Zhang X., An C., Zhang J., Zhao Y., Yu Z., Zhang R., Liu J., Zhou A., Feng S. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales // *Earth-Science Reviews.* 2019. Vol. 192. P. 337-354. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.005>.
5. Di Mauro B., Fava F., Ferrero L., Garzonio R., Baccolo G., Delmonte B., Colombo R. Mineral dust impact on snow radiative properties in the European Alps combining ground, UAV, and satellite observations // *J. Geophys. Res.* 2015. Vol. 120, no. 12. P. 6080-6097. DOI:10.1002/2015JD023287.
6. Fuchs M. C., Gloaguen R., Pohl E. Tectonic and climatic forcing on the Pyanj river system during the Quaternary // *Int. J. Earth Sci.* 2013. Vol. 102. P.1985-2003.
7. Gat J.R., Carmi I. Evolution of the isotope composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area // *J. Geophys. Res.* 1970. Vol. 75. P. 3039-3048.
8. Heermance R.V., Pearson J., Moe A., Liu L.T., Xu J.H., Chen J., Richter F., Garzzone C.N., Nie J.S., Bogue S. Erg deposition and development of the ancestral Taklimakan Desert (western China) between 12.2 and 7.0 Ma // *Geology.* 2018. Vol. 4. P. 919-922. <https://doi.org/10.1130/G45085.1>
9. Hock R., Rasul G., Adler C., Cáceres B., Gruber S., Hirabayashi Y., Jackson M., Kääb A., Kang S., Kutuzov S., Milner A., Molau U., Morin S., Orlove B., Steltzer H. High Mountain Areas // IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Eds: H. O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer. 2019. P. 131-202.
10. Kapnick S., Hall A. Causes of recent changes in western North American snowpack // *Clim. Dyn.* 2012. Vol. 38, no. 9-10. P. 1885-1899. DOI: 10.1007/s00382-011-1089-y.
11. Kaspari S., Painter T.H., Gysel M., Skiles S.M., Schwikowski M. Seasonal and elevational variations of black carbon and dust in snow and ice in the Solu-Khumbu, Nepal and estimated radiative forcings // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. Vol. 14, no. 15. P. 8089-8103. DOI: 10.5194/acp-14-8089-2014.
12. Li C., Bosch C., Kang S., Andersson A., Chen P., Zhang Q., Cong Z., Chen B., Qin D., Gustafsson O. Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers // *Nat. Commun.* 2016. Vol. 7, no. 1. P. 1-7. DOI:10.1038/ncomms12574.
13. Liu Q., Tian L.D., Wang J.L., R. 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 // *Atmospheric Research.* 2015. Vol. 153. P. 10-18.
14. Marty C., Tilg A. M., Jonas T. Recent evidence of large-scale receding snow water equivalents in the European Alps // *J. Hydrometeorology.* 2017. Vol. 18, no. 4. P. 1021-1031. DOI:10.1175/JHM-D-16-0188.1.
15. Molina, L.T., Gallardo L., Andrade M., Baumgardner D., Borbor-Cordova M., Borques R., Casessa G., Cereceda-Balic F., Dawidowski L., Garreaud R., Huneus N., Lambert F., McCarty J.L., McPhee J., Mena-Carrasco M., Raga G.B., Schmitt C., Schwartz J.P. Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere // *Earth's Future.* 2015. Vol. 3. P. 345-369. DOI:10.1002/2015EF000311.
16. Normatov I., Normatov P. Climate change impact on hydrological characteristics and water availability of the Mountain Pamir Rivers // *Proc. IAHS.* 2020. Vol. 383. P. 31-41. <https://doi.org/10.5194/piahs-383-31-2020>.

17. *Normatov P.I., Frumin G.T., Muminov A.O., Normatov I. Sh.* The water isotope composition ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) of the transboundary Zeravshan and Vakhsh rivers and their tributaries // *Geographical bulletin*. 2017. No. 4 (43). P. 97-104. DOI:10.17072/2079-7877-2017-4-97-10.
18. *Normatov P. I., Markaev B. A., Normatov I. Sh.* Meteorological Features of Climatic Zones in the Basin of the Transboundary River Pyanj // *Bull. Irkutsk St. Univ.* 2017. Vol. 21. P. 106-113.
19. *Painter T.H., Flanner M.G., Kaser G., Marzeion B., VanCuren R.A., Abdalati W.* End of the Little Ice Age in the Alps forced by industrial black carbon // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. Vol. 110, no. 38. P. 15216-15221. DOI:10.1073/pnas.1302570110.
20. *Palazzi E., Hardenberg J. V., Provenzale A.* Precipitation in the Hindu-Kush Karakoram Himalaya: observations and future scenarios // *J. Geophys. Res.-Atmos.* 2013. Vol. 118. P. 85-100.
21. *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.
22. *Pohl E., Knoche M., Gloaguen R., Andermann C., Krause P.* Sensitivity analysis and implications for surface processes from a hydrological modelling approach in the Gunt catchment, high Pamir Mountains // *Earth Surf. Dynam.* 2015. Vol. 3. P. 333-362. <https://doi.org/10.5194/esurf-3-333-2015>.
23. *Pohl E., Gloaguen R., Seiler R.* Remote sensing-based assessment of the variability of winter and summer precipitation in the Pamirs and their effects on hydrology and hazards using harmonic time series analysis // *Remote Sens.* 2015. Vol. 7, no. 8. P. 9727-9752. DOI:10.3390/rs70809727.
24. *Qian Y.* Light-absorbing particles in snow and ice: Measurement and modeling of climatic and hydrological impact // *Adv. Atmos. Sci.* 2015. Vol. 3, no. 1. P. 64-91. DOI:10.1007/s00376-014-00100.
25. *Skiles S.M., Flanner M., Cook J.M., Dumond M., Painter T.H.* Radiative forcing by light-absorbing particles in snow // *Nat. Clim. Change*. 2018. Vol. 8, no. 11. P. 964-971. DOI:10.1038/s41558-018-0296-5.
26. *Syed F.S., Giorgi F., Pal J.S., King M.P.* Effect of remote forcings on the winter precipitation of central southwest Asia, part 1: observations // *Theor. Appl. Climatol.* 2006. Vol. 86. P. 147-160.
27. *Vasilchuk Yu.K.* New data on trends and causes of change the magnitude of the Deuterium excess in a single snowfall // *Reports of the Academy of Sciences*. 2014. Vol. 459 (1). P. 109-111.
28. *Zhang Y., Kang S., Sprenger M., Cong Z., Gao T., Li T., Tao S., Zhong X., Xu M., Meng W., Neupane B., Qin X., Sillanpaa M.* Black carbon and mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau // *Cryosphere*. 2018. Vol. 12, no. 2. P. 413-431. DOI:10.5194/tc-12-413-2018.

References

1. *Aizen V. B., Mayewski P. A., Aizen E. M., Joswiak D. R., Surazakov A. B., Kaspari S., Grigholm B., Krachler M., Handley M., Finaev A.* Stable-isotope and trace element time series from Fedchenko glacier (Pamirs) snow/firn cores. *J. Glaciol.*, 2009, vol. 55, pp. 275-291.
2. *Baldwin J., Vecchi G.* Influence of the Tian Shan on arid extratropical Asia. *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, pp. 5741-5762. DOI:10.1175/JCLI-D-15-0490.1.
3. *Caves J.K., Winnick M.J., Graham S.A., Sj Ostrom D.J., Mulch A., Chamberlain C.P.* Role of the esterlies in Central Asia climate over the Cenozoic. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, vol. 428, pp. 33-43. DOI:10.1016/j.epsl.2015.07.023.
4. *Chen F., Chen J., Huang W., Chen S., Huang X., Jin L., Jia J., Zhang X., An C., Zhang J., Zhao Y., Yu Z., Zhang R., Liu J., Zhou A., Feng S.* Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales. *Earth-Science Reviews*, 2019, vol. 192, pp. 337-354. DOI:10.1016/j.earscirev.2019.03.005.

5. Di Mauro B., Fava F., Ferrero L., Garzonio R., Baccolo G., Delmonte B., Colombo R. Mineral dust impact on snow radiative properties in the European Alps combining ground, UAV, and satellite observations. *J. Geophys. Res.*, 2015, vol. 120, no. 12, pp. 6080-6097. DOI:10.1002/2015JD023287.

6. Fuchs M. C., Gloaguen R., Pohl E. Tectonic and climatic forcing on the Pyanj river system during the Quaternary. *Int. J. Earth Sci.*, 2013, vol. 102, pp.1985-2003.

7. Gat J.R., Carmi I. Evolution of the isotope composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. *J. Geophys. Res.*, 1970, vol. 75, pp. 3039-3048.

8. Heermance R.V., Pearson J., Moe A., Liu L.T., Xu J.H., Chen J., Richter F., Garziona C.N., Nie J.S., Bogue S. Erg deposition and development of the ancestral Taklimakan Desert (western China) between 12.2 and 7.0 Ma. *Geology*, 2018, vol. 4, pp. 919-922. DOI: 10.1130/G45085.1.

9. Hock R., Rasul G., Adler C., Cáceres B., Gruber S., Hirabayashi Y., Jackson M., Kääb A., Kang S., Kutuzov S., Milner A., Molau U., Morin S., Orlove B., Steltzer H. High Mountain Areas. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. *Weyer*. 2019, pp. 131-202.

10. Kapnick S., Hall A. Causes of recent changes in western North American snowpack. *Clim. Dyn.*, 2012, vol. 38, no. 9-10, pp. 1885-1899. DOI: 10.1007/s00382-011-1089-y.

11. Kaspari S., Painter T.H., Gysel M., Skiles S.M., Schwikowski M. Seasonal and elevational variations of black carbon and dust in snow and ice in the Solu-Khumbu, Nepal and estimated radiative forcings. *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, no. 15, pp. 8089-8103. DOI: 10.5194/acp-14-8089-2014.

12. Li C., Bosch C., Kang S., Andersson A., Chen P., Zhang Q., Cong Z., Chen B., Qin D., Gustafsson O. Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers. *Nat. Commun.*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 1-7. DOI:10.1038/ncomms12574.

13. Liu Q., Tian L.D., Wang J.L., R. 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. *Atmospheric Research*, 2015, vol. 153, pp. 10-18.

14. Marty C., Tilg A. M., Jonas T. Recent evidence of large-scale receding snow water equivalents in the European Alps., *J. Hydrometeorology*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 1021-1031. DOI:10.1175/JHM-D-16-0188.1.

15. Molina, L.T., Gallardo L., Andrade M., Baumgardner D., Borbor-Cordova M., Borques R., Casessa G., Cereceda-Balic F., Dawidowski L., Garreaud R., Humeus N., Lambert F., McCatry J.L., McPhee J., Mena-Carrasco M., Raga G.B., Schmitt C., Schwartz J.P. Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere. *Earth's Future*, 2015, vol. 3, pp. 345-369. DOI:10.1002/2015EF000311.

16. Normatov I., Normatov P. Climate change impact on hydrological characteristics and water availability of the Mountain Pamir Rivers. *Proc. IAHS*, 2020, vol. 383, pp. 31-41. DOI: 10.5194/piahs-383-31-2020.

17. Normatov P.I., Frumin G.T., Muminov A.O., Normatov I. Sh. The water isotope composition ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) of the transboundary Zeravshan and Vakhsh rivers and their tributaries. *Geographical bulletin*, 2017, vol. 43, no. 4, pp. 97-104. DOI:10.17072/2079-7877-2017-4-97-10.

18. Normatov P. I., Markaev B. A., Normatov I. Sh. Meteorological Features of Climatic Zones in the Basin of the Transboundary River Pyanj. *Bull. Irkutsk St. Univ.*, 2017, vol. 21, pp. 106-113.

19. Painter T.H., Flanner M.G., Kaser G., Marzeion B., VanCuren R.A., Abdalati W. End of the Little Ice Age in the Alps forced by industrial black carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, vol. 110, no. 38, pp. 15216-15221. DOI:10.1073/pnas.1302570110.

20. Palazzi E., Hardenberg J. V., Provenzale A. Precipitation in the Hindu-Kush Karakoram Himalaya: observations and future scenarios, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 2013, vol. 118, pp. 85-100.

21. 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, pp. 1-15.

22. Pohl E., Knoche M., Gloaguen R., Andermann C., Krause P. Sensitivity analysis and implications for surface processes from a hydrological modelling approach in the Gunt catchment, high Pamir Mountains. *Earth Surf. Dynam.*, 2015, vol. 3, pp. 333-362. DOI: 10.5194/esurf-3-333-2015.

23. Pohl E., Gloaguen R., Seiler R. Remote sensing-based assessment of the variability of winter and summer precipitation in the Pamirs and their effects on hydrology and hazards using harmonic time series analysis. *Remote Sens.*, 2015, vol. 7, no. 8, pp. 9727-9752. DOI:10.3390/rs70809727.

24. Qian Y. Light-absorbing particles in snow and ice: Measurement and modeling of climatic and hydrological impact. *Adv. Atmos. Sci.*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 64-91. DOI:10.1007/s00376-014-00100.

25. Skiles S.M., Flanner M., Cook J.M., Dumond M., Painter T.H. Radiative forcing by light-absorbing particles in snow. *Nat. Clim. Change.*, 2018, vol. 8, no. 11, pp. 964-971. DOI: 10.1038/s41558-018-0296-5.

26. Syed F.S., Giorgi F., Pal J.S., King M.P. Effect of remote forcings on the winter precipitation of central southwest Asia, part 1: observations. *Theor. Appl. Climatol.*, 2006, vol. 86, pp. 147-160.

27. Vasilchuk Yu.K. New data on trends and causes of change the magnitude of the Deuterium excess in a single snowfall. *Reports of the Academy of Sciences*, 2014, vol. 459, no. 1, pp. 109-111.

28. Zhang Y., Kang S., Sprenger M., Cong Z., Gao T., Li T., Tao S., Zhong X., Xu M., Meng W., Neupane B., Qin X., Sillanpaa M. Black carbon and mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau. *Cryosphere*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 413-431. DOI:10.5194/tc-12-413-2018.

*Поступила 21.01.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022;
принята в печать 23.10.2022.*

*Submitted 21.01.2022; approved after reviewing 07.09.2022;
accepted for publication 23.10.2022.*