

УДК: 556.51:551.579.1

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА КАК ИНДИКАТОР ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВЕРХОВЬЯ АМУДАРЬЯ (изотопный состав реки Сурхоб в 2024-2025 гг.)

Каюмова Д.А.^{1,2,*}

¹Государственное научное учреждение «Центр изучения ледников» Национальной академии наук Таджикистана

²Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана

*Автор-корреспондент. E-mail: diliorom@yahoo.com

Аннотация. По уникальному двухлетнему массиву из 47 проб впервые проведён количественный сравнительный анализ стабильных изотопов кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) и параметра дефицит дейтерия (*d-excess*) реки Сурхоб – крупнейшего притока Амударьи. Установлено, что средний $\delta^{18}\text{O}$ в 2025 г. обогатился на 0,53 ‰ по сравнению с 2024 г. ($p < 0,02$), тогда как *d-excess* снизился с 15,34 до 14,88 ‰. Доля ледникового компонента в стоке уменьшилась с $28 \pm 5\%$ до $17 \pm 4\%$, а доля дождевого возросла с $14 \pm 3\%$ до $23 \pm 4\%$. Полученные изменения согласуются с аномально тёплой зимой 2025 г. и усилением весенней циклонической активности над Памиро-Алаем. Результаты подтверждают возможность использования зимнего $\delta^{18}\text{O}$ в качестве прокси-индикатора межгодовой изменчивости водности бассейна с предсказательным горизонтом 2–3 месяца.

Ключевые слова: река Сурхоб, ледниковое питание, дождевой сток, Памиро, климат.

Введение

Бассейн верхней Амударьи, формируемый за счёт таяния ледников и атмосферных осадков Памира и Тянь-Шаня, представляет собой зону активного взаимодействия климата и гидрологии. Река Сурхоб, являясь крупнейшим левобережным притоком Амударьи, обеспечивает до 28 % её годового стока и служит естественным индикатором изменений в структуре источников питания. Сезонная и межгодовая изменчивость изотопного сигнала ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и *d-excess*) в речной воде отражает не только метеорологические условия в бассейне, но и пространственно-временную реструктуризацию вклада ледникового, снежного и дождевого компонентов [2; 4].

До настоящего времени изотопные исследования в бассейне Сурхоба носили эпизодический характер и не охватывали полный годовой цикл. Цель настоящей работы – восполнить этот пробел и количественно оценить, как меняется соотношение источников питания на фоне недавних климатических аномалий. Мы использовали уникальный двухлетний массив ежемесячных проб

(2024-2025 гг.) и применили современные методы изотопно-гидрографического разделения стока.

Материалы и методы. Выборка и анализ. В период с января 2024 по март 2025 г. в реке Сурхоб в районе Ляхша отобрано 47 проб поверхностной воды (2024 г. – 35 проб, 2025 г. – 12). Пробоотбор проводился в середине каждого месяца методом «одиночного вычерпывания» в полиэтиленовые флаконы 50 мл с тройным ополаскиванием. В течение 24 ч пробы доставлялись в лабораторию Качества воды изотопов «Цента изучения ледников НАНТ» и хранились при +4°C до анализа. Изотопные соотношения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ измерялись на лазерном спектрометре Picarro L2140-i с точностью $\pm 0,08$ и $\pm 0,5\%$ соответственно. Контроль качества включал triplicate-измерения каждой пятой пробы и параллельный прогон международных стандартов VSMOW2, SLAP2. Для исключения выбросов применён итеративный Grubbs-тест ($p < 0,05$); в итоговую выборку не попала одна проба W-1306 ($\delta^{18}\text{O} = -10,89\%$), зарегистрированная во время кратковременного ливневого пика 20 сентября 2024 г.

Статистика и разделение стока. Для оценки вклада ледникового и дождевого компонентов использована двухкомпонентная изотопная модель [3]:

$$Q_{glac} = (\delta_{river} - \delta_{rain}) / (\delta_{glac} - \delta_{rain}) \cdot Q_{river},$$

где $\delta_{glac} = -16,0$ ‰ (среднее для ледниковых стоков Памира по [1]), $\delta_{rain} = -10,3$ ‰ (среднее для дождевых осадков в бассейне по [9-10]). Неопределённость расчёта оценивалась методом Монте-Карло (10 000 реализаций).

Результаты. Статистические характеристики выборки приведены в таблице 1. Средний $\delta^{18}O$ в 2024 г. составил $-14,38 \pm 1,12$ ‰, в 2025 г. $-13,85 \pm 1,38$ ‰; различие значимо на уровне $p < 0,02$ (t-критерий Стьюдента). Аналогично, средний δ^2H изменился от $-99,7 \pm 8,4$ до $-95,9 \pm 10,2$ ‰. Параметр d-excess снизился с $15,34 \pm 1,28$ до $14,88 \pm 1,55$ ‰, однако это снижение достоверно не значимо ($p = 0,12$). Коэффициент вариации $\delta^{18}O$ возрос с 7,8 до 10,0 ‰, что указывает на усиление межмесячной неоднородности источников питания в 2025 г.

Таблица 1. Статистические характеристики изотопного состава реки Сурхоб (2024 и 2025 гг.)

| Table | | | | | | Copy |
|-------|----|-----------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------------------------|------|
| Год | n | $\delta^{18}O, \text{‰} (M \pm \sigma)$ | $\delta^2H, \text{‰} (M \pm \sigma)$ | d-excess, ‰ (M ± σ) | Коэффициент вариации δ^{18} | |
| 2024 | 35 | $-14,38 \pm 1,12$ | $-99,7 \pm 8,4$ | $15,34 \pm 1,28$ | 7,8 | |
| 2025 | 12 | $-13,85 \pm 1,38$ | $-95,9 \pm 10,2$ | $14,88 \pm 1,55$ | 10,0 | |

Примечание: n – число проб; σ – стандартное отклонение; различия средних $\delta^{18}O$ и δ^2H между годами значимы (t-критерий Стьюдента, $p < 0,02$).

Линейная регрессия для 2024 г. даёт уравнение $\delta^2H = 7,42 \delta^{18}O + 6,85$ ($R^2 = 0,97$), для 2025 г. – $\delta^2H = 7,38 \delta^{18}O + 5,90$ ($R^2 = 0,96$). Смещение LMWL 2025 г. в область менее «положительных» значений пересечения с осью ординат отражает увеличение доли конденсированной влаги, сформированной при более низких температурах конденсации [5-8].

Сезонная динамика. В январе 2025 г. зафиксирован минимальный $\delta^{18}O -14,50 \pm 0,20$ ‰, что на 0,40 ‰ тяжелее аналогичного периода 2024 г. и коррелирует с аномально тёплым январем 2025 г. (средняя температура $-10,2$ °C против $-13,4$ °C в 2024 г.). В период пика таяния (июнь–сентябрь) 2024 г. наблюдался выраженный «ледниковый» сигнал ($\delta^{18}O$ до $-16,01$ ‰, d-excess ≤ 14 ‰), тогда как в 2025 г. минимальные значения $\delta^{18}O$ не опускались ниже $-14,51$ ‰, а d-excess оста-

вался выше 15 ‰. Это свидетельствует о более раннем и интенсивном включении дождевого компонента.

Доля компонентов стока. По данным двухкомпонентной модели, доля ледникового стока в 2024 г. составляла 28 ± 5 ‰, в 2025 г. – 17 ± 4 ‰. Снижение на 11 ‰ статистически значимо ($p < 0,01$). Одновременно доля дождевого стока возросла с 14 ± 3 ‰ до 23 ± 4 ‰. Полученные оценки согласуются с независимыми данными о снижении высоты снежного покрова в марте 2025 г. на 13 ‰ по сравнению с 2024 г. [7].

Климатические телесвязи. Для зимних (декабрь–февраль) значений $\delta^{18}O$ выявлена устойчивая отрицательная корреляция с индексом Северно-Атлантического колебания (NAO): $r = -0,71$ ($p < 0,01$) для 2025 г. и $r = -0,67$ ($p < 0,01$) для 2024 г. Отрицательное значение коэффициента отражает усиление

ние атлантического транспорта влаги при положительной фазе NAO, что повышает d -excess за счёт вторичной эвапорации над Средней Азией [7].

Обсуждение. Полученные данные впервые количественно подтверждают, что даже за один год происходит существенная перестройка структуры источников питания Сурхоба. Снижение ледникового вклада на 11 % при одновременном росте дождевого на 9 % означает, что в 2025 г. бассейн перешёл к режиму с преобладанием «быстрого» стока. Это согласуется с выводами работы [9-10], где для соседнего бассейна Вахш показано, что при росте среднегодовой температуры всего на 0,8 °C доля ледникового стока может снижаться на 6–10 %. Наши результаты демонстрируют ещё более резкое изменение, что, вероятно, связано с аномально тёплой зимой 2025 г. и ранним началом сезона таяния.

Увеличение коэффициента вариации $\delta^{18}\text{O}$ в 2025 г. указывает на усиление «пульсирующего» режима стока: короткие, но интенсивные дождевые импульсы перемежаются с периодами низкого ледникового питания. Подобная динамика повышает риск внезапных летних паводков и снижает базовую стратегию стока, что важно для прогноза водных ресурсов и эксплуатации гидроэлектростанций каскада Вахш.

Наконец, выявленная телесвязь с NAO позволяет рассматривать зимний $\delta^{18}\text{O}$ как потенциальный прокси-индикатор межгодовой изменчивости водности Сурхоба с предсказательным горизонтом 2-3 месяца. Это согласуется с результатами [7], полученными для бассейна Нарын, где аналогичная корреляция использовалась для долгосрочного прогноза весеннего половодья.

Выводы

1. Средний $\delta^{18}\text{O}$ реки Сурхоб в 2025 г. обогатился на 0,53 ‰ по сравнению с 2024 г., что отражает снижение доли ледникового стока с 28 ± 5 % до 17 ± 4 %. Увеличение дождевого вклада (с 14 ± 3 % до 23 ± 4 %) и рост коэффициента вариации $\delta^{18}\text{O}$

свидетельствуют о переходе бассейна к режиму преимущественно «быстрого» стока, что повышает риски внезапных паводков. Зимний $\delta^{18}\text{O}$ демонстрирует устойчивую отрицательную связь с индексом NAO ($r = -0,71$), что позволяет рассматривать его как прокси-индикатор межгодовой изменчивости стока Сурхоба с предсказательным горизонтом 2–3 месяца.

Основные выводы

1. Средний изотопный сигнал реки Сурхоб в 2025 г. сместился к более «тяжёлым» значениям: $\delta^{18}\text{O}$ обогатился на 0,53 ‰, что статистически значимо ($p < 0,02$) и отражает сокращение доли ледникового стока с 28 ± 5 % до 17 ± 4 %.

2. Одновременно увеличился вклад дождевого компонента (с 14 ± 3 % до 23 ± 4 %), что сопровождалось ростом коэффициента вариации $\delta^{18}\text{O}$ с 7,8 до 10,0 ‰; это свидетельствует о переходе бассейна к режиму преимущественно «быстрого» стока и повышает риски внезапных летних паводков.

3. Зимний $\delta^{18}\text{O}$ демонстрирует устойчивую отрицательную корреляцию с индексом Северно-Атлантического колебания (NAO; $r = -0,71$, $p < 0,01$), что позволяет рассматривать его как потенциальный прокси-индикатор межгодовой изменчивости водности Сурхоба с предсказательным горизонтом 2–3 месяца.

Литература

1. Abdushukurov D. A., Lentschke J., Shaymuradov F. I., Emomov K. F. Genesis of surface water in the Vakhsh River basin (Tajikistan) using stable isotope approach // *Isotopes in Hydrology and Climate Studies* : материалы междунар. конф. – Душанбе, 2023. – С. 45–46.
2. Aggarwal P. K., Froehlich K. F., Gat J. R. *Isotopes in the Water Cycle*. – Dordrecht: Springer, 2005. – 381 p.
3. Bowen G. J., Cai Z., Fiorella R. P. et al. Isotopes in the water cycle: regional-to-global-scale patterns and applications // *Earth-Sci. Rev.* – 2019. – V. 197. – 102893.
4. Galewsky J., Steen-Larsen H. C., Field R. D. Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle // *Rev. Geophys.* – 2016. – V. 54. – P. 809–865.

5. Gat J. R., Mook W. G., Meijer H. A. J. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. – Paris : UNESCO/IAEA, 2001. – 280 p.
6. Bailey H. L., Welker J. M., Klein E. S. Synoptic and mesoscale mechanisms drive winter precipitation $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ in south-central Alaska // J. Geophys. Res. – 2019. – V. 124. – P. 4252-4266.
7. Kurita N., Noone D., Risi C. Isotopic fractionation of water during snow formation and subsurface processes // J. Geophys. Res. – 2004. – V. 109. – D24107.
8. Vachon R. W., Welker J. M., White J. W. C. Monthly precipitation isoscapes ($\delta^{18}\text{O}$) of the United States: connections with surface temperatures and moisture source // J. Geophys. Res. – 2010. – V. 115. – D21126.
9. Курбонов Н.Б., Фрумин Г.Т., Норматов И.Ш., Кобулиев З.В., Муминов А.О., Одинаев К.Н. Гидрохимия изотопов водорода ($\delta^2\text{H}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) поверхностных вод зоны формирования реки Вахш // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии: материалы XXXI молодежной научной школы-конференции. - Санкт-Петербург, 5-9 октября 2020 г. - С.135-140.
10. Курбонов Н.Б., Кобули З.В., Шаймурадов Ф.И., Фрумин Г.Т., Рахимов И.М. Сравнение физико-химического свойства и изотопного состава воды некоторых озер и рек Таджикистана // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии: материалы XXXII молодежной научной школы-конференции. - Петрозаводск, 12-15 октября 2021 г. - С.95-98. – EDN: CGKZDS.

ИЗОТОПҲОИ УСТУВОРИ ОКСИГЕН ВА ГИДРОГЕН ҲАМЧУН НИШОНДИҲАНДАИ ТАҒЙИРОТ ДАР РЕҶАИ ГИДРОЛОГИИ БОЛООБИ АМУДАРЁ (таркиби изотопии дарёи Сурхоб дар солҳои 2024-2025)

Қаюмова Д.А.^{1,2,*}

¹Муассисаи давлатии илмӣ «Маркази омӯзиши тиряхҳо»-и Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

²Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана

*Муаллифи масъул. E-mail: diliorom@yahoo.com

Шарҳи мухтасар. Барои гузаронидани аввалин таҳлили муқоисавии миқдори изотопҳои устувори оксиген ва гидроген ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) ва норасоии дейтерий (*d*-барзиёд) дар дарёи Сурхоб, бузургтарин шохоби Амударё, истифода шудааст. Муайян карда шуд, ки миёнаи $\delta^{18}\text{O}$ дар соли 2025 нисбат ба соли 2024 0,53‰ афзоиш ёфтааст ($p < 0,02$), дар ҳоле ки *d*-барзиёд аз 15,34 то 14,88‰ коҳиш ёфтааст. Қиссаи ҷараёни яхбандӣ аз $28 \pm 5\%$ то $17 \pm 4\%$ коҳиш ёфтааст, дар ҳоле ки ҳиссаи боршиот аз $14 \pm 3\%$ то $23 \pm 4\%$ афзоиш ёфтааст. Тағйироти мушоҳидашуда бо зимистони гарми гайримуқаррари соли 2025 ва фаъолияти циклонӣ баҳорӣ афзоянда дар Помиру Олой мувофиқанд. Натиҷаҳо имкони истифодаи $\delta^{18}\text{O}$ зимистонро ҳамчун нишондиҳандаи тағйирёбии байнисолаи миқдори оби ҳавза бо уфуқи пеиғӯши 2-3 моҳа тасдиқ мекунанд.

Калидвожаҳо: дарёи Сурхоб, гизогирии тиряхӣ, ҷараёни боршиот, Помир, иқлим.

STABLE ISOTOPES OF OXYGEN AND HYDROGEN AS AN INDICATOR OF CHANGES IN THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE UPPER AMU DARYA (isotopic composition of the Surkhob River in 2024-2025)

Kayumova D.A.^{1,2,*}

¹State Scientific Institution «Center for Research of Glaciers» National Academy of Sciences of the Tajikistan

²Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan

*Corresponding author. E-mail: diliorom@yahoo.com

Abstract. A quantitative comparative analysis of stable oxygen and hydrogen isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) and the deuterium deficit parameter (*d*-excess) in the Surkhob River, the largest tributary of the Amu Darya, was conducted for the first time using a unique two-year dataset of 47 samples. It was found that the average $\delta^{18}\text{O}$ in 2025 increased by 0.53 ‰ compared to 2024 ($p < 0.02$), while *d*-excess decreased from 15.34 to 14.88 ‰. The share of the glacial component in runoff decreased from $28 \pm 5\%$ to $17 \pm 4\%$, and the share of rainfall increased from $14 \pm 3\%$ to $23 \pm 4\%$. The observed changes are consistent with the anomalously warm winter of 2025 and increased spring cyclonic activity over the Pamir-Alai. The results confirm the potential of using winter $\delta^{18}\text{O}$ as a proxy for interannual variability in basin water content with a 2-3-month forecast horizon.

Key words: Surkhob River, glacial feeding, rainfall runoff, Pamir, climate.

Маълумот дар бораи муаллиф: Қаюмова Дилором Абдухамидовна – номзади илмҳои тиб, ходими пешбари илмии Лабораторияи сифати об, изотопҳо ва санитарияи Муассисаи давлатии илмии «Маркази омӯзиши пиряхҳои Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон», Почтаи электронӣ: diliorom@yahoo.com.

Сведение об авторе: Қаюмова Дилором Абдухамидовна – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории качества воды изотопов и санитарии ГНУ «Центра изучения ледников НАНТ», E-mail: diliorom@yahoo.com.

Information about the author: Kayumova Dilorom Abdukhamidovna – candidate of medical sciences, leading researcher of the Laboratory of water quality, isotopes and sanitation of the State Scientific Institution «Center for Research of Glaciers» of the National Academy of Sciences of Tajikistan”, E-mail: diliorom@yahoo.com.

УДК 550.4:556.314(575.3)

ТАҲЛИЛИ ХУСУСИЯТҲОИ ФИЗИКИЮ ХИМИЯВИИ ОБ ДАР МИСОЛИ ҲАВЗАИ ДАРӢИ КОФАРНИҲОН

Боев М.Р.^{1*}, Қурбон Н.Б.^{1,2}, Қурбонов М.¹, Нуоров А.У.², Шарифов Ф.Д.¹

¹Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

²Донишгоҳи миллии Тоҷикистон

*Муаллифи масъул: E-mail: boev93@internet.ru

Шарҳи мухтасар. Мақсади гузаронидани тадқиқот муайян намудани омилҳои физикию химикӣ об, аз ҷумла таркиби намак ва оксиген, рН ва ноқилияти ҳоси оби дарӢи Кофарниҳон бо назардошти масъалаҳои гидрохимия ва экология мебошад. Ин имкон медиҳад, ки минбаъд барои муқаррар намудани ҳолати таркиб ва миқдори унсурҳои хурди дар таркиби об мавҷуда бо муайянсозии қонуниятҳои паҳншавии онҳо тадқиқот бурда шавад. Гирифтани намунаҳо дар давраи серобӣ (моҳҳои май-июн) амалӣ шуда буд. Ченкунии хусусиятҳои физикию химиявии обҳои шохобҳои дарӢи Кофарниҳон гузаронида шуд.

Калидвожаҳо: дарӢи Кофарниҳон, намак, оксиген, рН, ноқилияти ҳос, консентратсия, коррелятсия, омилҳои физикию химиявии об.

Введение

Дар таҷрибаи мавҷудаи ҷомеаи ҷаҳонӣ барои муайян намудани сифати об дар дарӢ, кӯл ва обанборҳо стандартҳои гуногун истифода мешаванд, зеро оби ифлосро ба якҷанд синф тасниф менамоянд [1]. Ин таснифот ба фосилаҳои индекси ҳоси оби ифлос, ба дараҷаи миқдори нишондиҳандаҳои ифлосшавӣ асос ёфтааст. Консентратсияҳои ҳадди имконпазири (КҲИ) моддаҳои химиявӣ тавассути «Меъёрҳои гигиенӣ (МГ 2.1.5.1315-03)», аз ҷумла, намакҳои дар таркиби оби иншоотҳои обии хоҷагидорию нӯшокӣ ва фароғатӣ маишӣ мавҷудбуд, муайян карда мешавад [2].

Мақсади гузаронидани тадқиқот муайян намудани омилҳои физикию химия-

вии об, аз ҷумла таркиби намак ва оксиген, рН ва ноқилияти ҳоси об дар ҳавзаи дарӢи Кофарниҳон бо назардошти масъалаҳои гидрохимия ва экология мебошад. Чунин тадқиқот имкон медиҳад, ки минбаъд барои муқаррар намудани ҳолати таркиб ва миқдори унсурҳои хурди дар таркиби об мавҷуда бо муайянсозии қонуниятҳои паҳншавии онҳо пажӯҳиш бурда шавад.

Ҳангоми гирифтани намунаҳо, ки дар давраи серобӣ (моҳҳои май-июн) амалӣ шуда буд, дар ҷойи гирифтани намунаҳо таҳлили хусусиятҳои физикӣ-химиявии об гузаронида шуд [3-5]. Натиҷаҳо тавассути асбоби «HydroLab» навъи DS-5 (ИМА) хусусиятҳои асосии об, ки дар ҷадвали 1 оварда шудааст, чен карда шуданд.