

1 Научно-исследовательская статья

# 2 Раскрытие будущего водного пульса Центральной 3 Азии: комплексный гидрологический прогноз XXI 4 века на основе стохастического моделирования 5 водного баланса

6  
7 [Тобиас Зигфрид](#)<sup>1,\*</sup>, [Азиз Уль Хак Муджахид](#)<sup>2</sup>, [Беатрис Марти](#)<sup>1</sup>, [Питер Мольнар](#)<sup>3</sup>, [Дирк](#)  
8 [Николаус Каргер](#)<sup>4</sup>, и [Андрей Яковлев](#)<sup>5</sup>

9 1 Hydrosolutions GmbH, Цюрих, Швейцария

10 2 Швейцарский федеральный технологический институт, ETH Цюрих, Швейцария

11 3 Отдел гражданского, окружающей среды и геоматического инжиниринга, Швейцарский федеральный  
12 технологический институт, ETH Цюрих, Швейцария

13 4 Швейцарский федеральный институт исследований леса, снега и ландшафта WSL, Бирмендорф, Швейцария

14 5 Фрилансер, Ташкент, Узбекистан

15 \* Переписка: [siegfried@hidposolutions.ch](mailto:siegfried@hidposolutions.ch)

16

17 **Абстрактно** В этом исследовании используется новый набор данных о местонахождении гидрологических  
18 постов и водосборных бассейнов для оценки воздействия изменения климата в 21 веке на гидрологию 221  
19 высокогорный бассейн в Центральной Азии. Для прогнозирования изменений речного стока и испарения на  
20 2011–2040, 2041–2070 и 2071–2100 годы по сравнению с базовым периодом 1979–2011 годов использовалась  
21 стационарная стохастическая модель водного баланса влаги в почве. Базовые климатические данные были  
22 получены из климатологии CHELSA V21, в которой указаны средняя суточная температура воздуха и сумма  
23 осадков для каждого подбассейна. В будущих прогнозах используются скорректированные на  
24 систематическую ошибку выходные данные четырех моделей общей циркуляции в рамках четырех  
25 путей/сценариев (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5). Глобальные наборы данных позволили получить  
26 информацию о распределении параметров почвы, а данные об абляции ледников были интегрированы для  
27 уточнения моделирования расходов воды и проверены на основе долгосрочных данных о расходе воды в  
28 водосборе.

29 Атмосферные модели предсказывают увеличение среднего количества осадков от 5,5% до 10,1% и повышение  
30 средней температуры на 1,9–5,6 °C к концу XXI века, в зависимости от сценария, относительно базового уровня.  
31 Прогнозы гидрологической модели на этот период указывают на увеличение фактического испарения от 7,3%  
32 до 17,4% и изменения расходов воды от +1,1% до –2,7% для сценариев SSP1-2.6 и SSP5-8.5 соответственно. В  
33 рамках наиболее экстремального климатического сценария (SSP5-8.5) ожидается увеличение расходов воды на  
34 3,8% и 5,0% в течение первого и второго будущих периодов, за которым последует снижение на –2,7% в третьем  
35 периоде. Значительные потери ледников ожидаются в более низких зонах речного стока с общим сокращением  
36 стока в некоторых частях Тянь-Шаня, включая водосборный бассейн Нарына. И наоборот, согласно прогнозам,  
37 в высокогорных районах Гиссар-Алая и Памира произойдет увеличение расхода воды, что среди прочего,  
38 будет вызвано усилением абляции ледников и задержкой пика половодья. Изменения в характере осадков  
39 предполагают более экстремальные, но менее частые явления, потенциально изменяющие ландшафт  
40 гидроклиматических рисков в регионе.

41 Наши результаты подчеркивают различную гидрологическую реакцию на изменение климата в высокогорной  
42 части Центральной Азии. Эти идеи служат основой для стратегий эффективного и устойчивого управления  
43 водными ресурсами на национальном и трансграничном уровнях и помогают местным заинтересованным  
44 сторонам.

45

46 **Ключевые слова:** высокогорная гидрология, водные ресурсы Центральной Азии, последствия изменения  
47 климата, динамика речного стока, гидрологическое моделирование.

## 48 1 Введение

49 Изменение климата представляет собой одну из самых актуальных проблем XXI века, имеющую далеко  
50 идущие последствия для различных экологических и социально-экономических систем. Одним из важнейших  
51 аспектов этого явления является его влияние на глобальные водные ресурсы. Изменения температуры воздуха,  
52 характера осадков, а также частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений меняют доступность и  
53 распределение ресурсов пресной воды во всем мире (Held and Soden 2006; Arnell and Gosling 2013; Yang et al.  
54 2021; Caretta et al. 2022). Изменение надежности водоснабжения создает значительные риски для сельского  
55 хозяйства, питьевого водоснабжения и здоровья экосистем, подчеркивает необходимость всестороннего  
56 понимания взаимодействия климата и воды (Kundzewicz et al. 2008).

57  
58 Засушливые земли, которые занимают примерно 41% поверхности суши Земли и являются домом для более  
59 чем 2 миллиардов человек, особенно уязвимы к изменению климата (Reynolds et al. 2007). Эти регионы,  
60 характеризующиеся низким и сильно изменчивым количеством осадков, включают засушливые,  
61 полусухие и сухие субгумидные районы, которые особенно чувствительны к изменениям климата из-за  
62 их предельного водного баланса (Feng and Fu 2013). Климатические прогнозы показывают, что в засушливых  
63 районах повышение температуры воздуха будет сильнее, чем в среднем по миру, что возможно, усугубит  
64 нехватку воды и процессы опустынивания (Huang et al. 2016). Ожидается, что с увеличением  
65 демографического давления, будущие многогранные изменения засушливых земель создадут нагрузку на и без  
66 того ограниченные водные ресурсы, что повлияет на сельское хозяйство, биоразнообразие и средства к  
67 существованию людей (Schlaepfer et al. 2017; Lian et al. 2021).

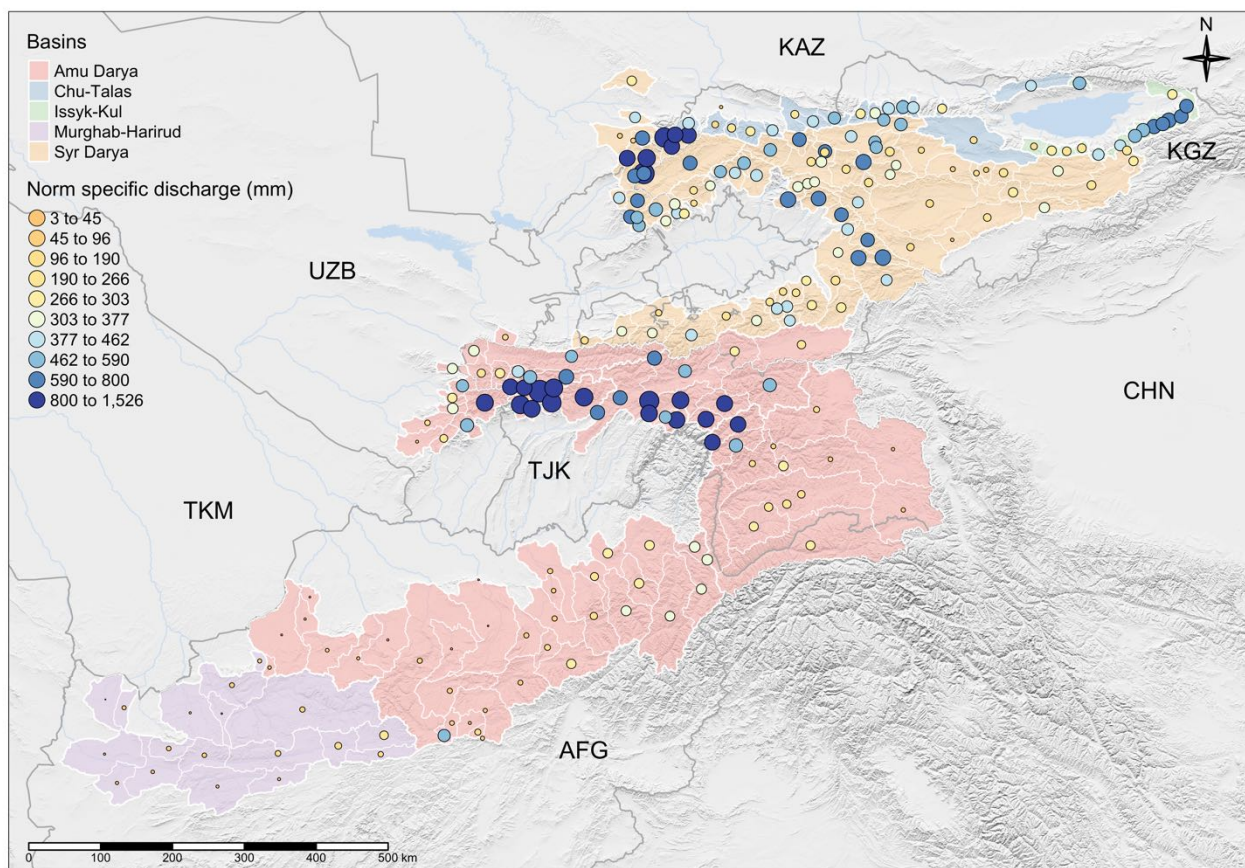
68  
69 Засушливые земли часто зависят от сезонного речного стока из высокогорных регионов, которые также  
70 уязвимы к изменению климата (Hock et al. 2019). Воздействие на водные ресурсы вызывает серьезную  
71 озабоченность в этих географических контекстах, особенно в регионах, где большое количество населения,  
72 расположенного ниже по течению, решающим образом зависит от доступа к воде в этой хрупкой окружающей  
73 среде (Zaitchik et al. 2023). Центральная Азия, включающая Афганистан, Казахстан, Кыргызстан, Узбекистан,  
74 Таджикистан и Туркменистан, является одним из таких регионов и характеризуется засушливым климатом,  
75 высокой зависимостью годового стока от таяния снега и ледников, а также наличием трансграничных речных  
76 систем (Jelen et al. 2021).

77  
78 Предыдущие исследования отдельных водосборов в регионе показали, что характеристики речного стока  
79 очень чувствительны к будущим климатическим воздействиям (Siegfried et al. 2012; Didovets et al. 2021).  
80 Например, важность таяния ледников в буферизации летнего и позднелетнего стока будет постепенно снижаться  
81 после пика половодья в низкорасположенных водосборах с небольшим оледенением. (Pohl et al. 2017; Su et al.  
82 2022; Yao et al. 2022). Ожидается, что произойдут типичные внутрисезонные сдвиги характеристик гидрографа  
83 в бассейнах с преобладанием снеготаяния (Zhumabaev et al. 2024). Возникающие в результате изменения  
84 доступности воды в зависимости от сезона и в межгодовом масштабе окажут существенное влияние на  
85 экономические сектора (Shaw et al. 2022), инфраструктуру (The World Bank 2009), средства к существованию  
86 людей (Reyer et al. 2017; Xenarios et al. 2019) и экосистем (Chen et al. 2022), и возможно, представляют угрозу  
87 безопасности (Bernauer and Siegfried 2012).

88  
89 Несмотря на растущее признание влияния изменения климата на водные ресурсы в Центральной Азии,  
90 остается несколько критических исследовательских пробелов. Один из них заключается в том, что скудность  
91 данных *in situ* для калибровки и проверки гидрологических моделей в регионе традиционно вынуждает  
92 региональных исследователей работать только на уровне крупных речных бассейнов. Другими словами, до сих  
93 пор не существует комплексного регионального исследования, которое позволило бы выявить климатические  
94 воздействия XXI века на уровне водосборных бассейнов основных горных хребтов и зон формирования стока.  
95 Отдавая должное гидроклиматологической сложности этого региона, такое исследование могло бы подробно  
96 и всесторонне информировать менеджеров по водным ресурсам о будущих проблемах, связанных с  
97 надлежащей подготовкой и адаптацией. В конечном итоге это принесет пользу национальным и  
98 трансграничным стратегиям.

99

100 Настоящее исследование заполняет этот пробел в исследованиях, сосредоточив внимание на гидрологии  
101 высокогорных водосборов в Центральной Азии с использованием недавно доступного набора данных о  
102 местоположениях гидрологических постов и соответствующих водосборных (Martí et al. 2023). Оценено влияние  
103 климата на гидрологию 221 высокогорного водосбора (рис. 1). Анализируя эти изменения, мы стремимся дать  
104 представление о будущей доступности и управлении водными ресурсами в этом уязвимом регионе. Наши  
105 выводы будут способствовать более широкому пониманию воздействия климата на полусухие регионы  
106 и поддержат разработку адаптивных стратегий для повышения водной безопасности в Центральной Азии.  
107



108 **Рис.1** Обзор исследуемого региона с 221 водосбором, общим для пяти крупных речных бассейнов (Martí et al. 2023).  
109 Большие бассейны имеют цветовую маркировку (см. легенду). Нормы расходов воды отдельных водосборов показаны  
110 пропорциональными по размеру и цветам "пузырькам". Для окраски используются квантили по десяти классам. Слой отмычки  
111 на схеме представляет собой топографию SRTM (NASA JPL 2013) . Постоянные водоемы были взяты из глобальной базы данных  
112 HydroLakes (Messenger et al. 2016) . Формы рек взяты из данных речной сети WMOBB (GRDC, Koblenz, Germany: Federal Institute  
113 of Hydrology (BfG) 2020). Названия стран даны с использованием трехзначных кодов, а границы взяты из базы данных GADM  
114 (GADM) (2022).  
115

116  
117 Наш подход и данные представлены в главе 2. Результаты и обсуждение находятся в главе 3, а в главе 4 -  
118 заключение. Статья сопровождается электронными дополнительными материалами (ESM).

## 119 **2 Методы и исходные данные**

### 120 **2.1 Гидрологическое моделирование и количественная оценка климатических воздействий**

121 Цели модели и доступность данных определяют выбор подхода к гидрологическому моделированию. Для  
122 изучения воздействия климата в Центральной Азии применялись разные подходы (Siegfried et al. 2012; Loodin  
123 2020; Didovets et al. 2021; Hu et al. 2021; Huang et al. 2022; Shannon et al. 2022). Эти исследования по  
124 моделированию имеют различные уровни сложности, и часто они сосредоточены на нескольких избранных

125 репрезентативных водосборах, для которых доступны ряды данные за более длительный период, которые  
126 необходимы для настройки модели, калибровки и проверки динамических моделей.

127

128 В центре внимания представленного здесь регионального исследования находится вся зона формирования  
129 стока на юге и юго-востоке высокогорной Центральной Азии (НМСА А, рис.1). Для большинства изученных  
130 водосборов доступны только исторические нормы расходов воды (Marti et al. 2023) , что само по себе также  
131 является ограничением для моделирования. Таким образом, мы сосредотачиваем наше исследование на  
132 использовании модели водного баланса, которая учитывает водосборные и климатические характеристики  
133 всего с несколькими параметрами, и мы используем упрощенную стохастическая модель динамики влажности  
134 почвы, представленную Porporato и др. (2004). Эта модель экономным образом описывает водный баланс в  
135 масштабе водосборного бассейна и его компоненты в суточном масштабе времени как

136

$$137 \quad w_0 \frac{dx(t)}{dt} = P_d(t) - E_d(E_m, x(t)) - Q_d(x(t), t), \quad (1)$$

138

139 где  $x(t)$ — переменная состояния, т. е. эффективная относительная влажность почвы, где  $x(t) = (s(t) -$   
140  $s_w)/(s_1 - s_w)(-)$  — относительная влажность почвы, а  $s_1 (s(t)-)$  — порог, выше которого осадки, превышающие  
141 доступную емкость хранения, непосредственно преобразуются в сток  $Q_d(\text{мм})$  в условиях обильного полива или  
142 теряется из-за глубокой фильтрации и дренажа, а  $s_w(-)$  — точка увядания почвы.  $w_0 = (s_1 - s_w) n Z_r(\text{мм})$  —  
143 максимальное количество воды в почве, доступное для испарения, где  $Z_r(\text{мм})$  — глубина корневой зоны, а  $n(-)$   
144 ) — пористость столба почвы . Мы называем эту модель моделью PSM (Porporato et al. 2004; Daly et al. 2019;  
145 Porporato and Yin 2022.

146

147  $P_d(\text{мм/день})$  — это суточное количество осадков, смоделированное как стохастический редкий  
148 Пуассоновский  $\lambda$  (1/день), предоставление ежедневного слоя осадков, полученного из экспоненциального  
149 распределения со средним значением  $\alpha$  (мм). Среднее многолетнее годовое количество осадков на водосборе  
150 можно выразить как  $P = \alpha \lambda n_d n_d$  дней в году (Daly et al. 2019) .

151

152 Модель PSM предполагает, что фактическое суточное испарение  $E_d(\text{мм/сутки})$  зависит линейно от  
153 потенциального испарения  $E_m(\text{мм/сутки})$ , т.е.  $E_d = E_m x(t)$ , таким образом, учитывается сокращение  
154 испарения при увеличении водного дефицита (Daly et al. 2019) . В упрощающем предположении, что  $E_m$  не  
155 зависит от времени, т. е. не имеет сезонности, среднегодовую скорость потенциального испарения  $E_p$  можно  
156 рассчитать как  $E_p = E_m n_d(\text{мм/год})$ . Ниже фактическое годовое испарение обозначается как  $E$ . Среднегодовой  
157 расход воды  $Q(\text{мм})$  можно рассчитать аналогично по суточным значениям, т. е.  $Q = Q_d n_d$ .

158

159 В установившихся условиях и при постоянной  $\alpha$  и  $\lambda$  линейной зависимости испарения от влажности почвы  
160 Daly et al. (2019) показали, что нормализованное уравнение водного баланса также может быть решено  
161 аналитически.

162

$$163 \quad \varepsilon = 1 - \frac{\Phi \gamma^{\gamma/\Phi - 1} e^{-\gamma}}{\Gamma(\frac{\gamma}{\Phi}) - \Gamma(\frac{\gamma}{\Phi} \gamma)}, \quad (2)$$

164

165 где  $\varepsilon = E/P$  будет испаряющейся фракцией,  $\phi = E_p/P(-)$  является индексом засушливости и  $\gamma = w_0/\alpha(-)$   
166 является индексом запаса воды в бассейне.  $\gamma$  описывает почвенную воду в условиях хорошего полива,  
167 нормализованную по глубине осадков, и определяет, сколько воды удерживается в водосборе относительно  
168 средней глубины выпадения осадков.  $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция,  $\Gamma(\cdot, \cdot)$ – неполная гамма-функция (Abramowitz  
169 Milton 1964). Долгосрочную норму расхода воды можно записать как

170

$$171 \quad Q = P \rho(\Phi, \gamma), \quad (3)$$

172

173 с

174

$$\rho(\Phi, \gamma) = \frac{\Phi \gamma^{\gamma/\Phi-1} e^{-\gamma}}{\Gamma(\frac{\gamma}{\Phi}) - \Gamma(\frac{\gamma}{\Phi} \gamma)} \quad (4)$$

176  
177 является коэффициентом стока. В изученных здесь моделях увеличение  $\gamma$  и  $\Phi$  связано со снижением  
178 коэффициента стока.

179  
180 Модель PSM в уравнениях (3) и (4) не отражает процессы в криосфере. Таким образом, вклад ледников  
181 учитывается с помощью имеющихся существующих данных недавних наблюдениях и будущих моделях  
182 таяния ледников (Rounce et al., 2023) и добавляется отдельно к смоделированным расходам воды.  
183 Следовательно,

$$184 \quad Q(0) = P \rho(\Phi, \gamma) + Q_G. \quad (5)$$

185  
186 где  $Q(0)$  – смоделированный расход воды, а  $Q_G$  – вклад абляции ледников в течение базового периода с 1979  
187 по 2011 гг. В подбассейнах без текущего оледенения или в сценариях будущих периодах, когда ледник исчезает  
188 в соответствии со сценариями будущего изменения климата, мы установили  $Q_G = 0$ . Проверка модели  
189 осуществляется путем сравнения  $Q_{obs}$  с  $Q(0)$  наблюдаемым  $Q_{obs}$  нормами расходов воды в течение базового  
190 периода. Наконец, предполагается, что динамика снеготаяния и снегонакопления не имеет значения в годовом  
191 масштабе.  
192  
193

194 Мы используем воздействие климатической модели CMIP6 и эмпирическую модель, которая связывает  
195 средние температуры бассейна с максимальным запасом почвенной воды, чтобы рассчитать будущие  
196 коэффициенты стока для периода 1 с 2011 по 2040 год, периода 2 с 2041 по 2070 год и периода 3 с 2071 по 2100  
197 год. Для каждого водосбора дельта изменений расходов воды по отношению к базовому периоду  
198 рассчитывается как  
199

$$200 \quad \Delta Q = \frac{Q(i,s,m) - Q(0)}{Q(0)} = \frac{P(i,s,m) \rho(\Phi(i,s,m), \gamma(i,s,m)) + Q_G(i,s,m) - Q(0)}{Q(0)}, \quad (6)$$

201  
202 где  $i$  обозначает будущий климатический период и рассматриваемый сценарий, рассчитанный с  
203 использованием климатической модели  $m$ . Поэтому при моделировании будущих расходов воды для  
204 отдельных бассейнов мы рассчитываем будущие коэффициенты стока, используя будущие значения индексов  
205 засушливости и накопления, которые являются результатом соответствующих прогонов модели GCM и  
206 смоделированных изменений в почвах, и добавляем соответствующий будущий расход воды с ледников.  
207

208 вычисления  $\rho(\Phi, \gamma)$  этих членов с использованием среды машинной точности могут возникнуть численные  
209 проблемы (см. Приложение A.2 в Daly et al. 2019). Мы решаем эту проблему, вычисляя численные значения  
210 для каждой комбинации индекса засушливости и индекса водоемкости с использованием Wolfram  
211 Mathematica и ее функции адаптивной точности (Wolfram Research Inc., 2023). Условия  $\rho(\Phi, \gamma)$  для отдельных  
212 водосборов рассчитывались с точностью до 200 знаков.  
213

## 214 **2.2 Данные о расходах воды и климате**

215 Данные о многолетних нормах годовых расходов воды по 295 горным гидропостам Кыргызстана, Казахстана,  
216 Узбекистана и Таджикистана взяты из Marti et al. (2023), вместе с соответствующими границами подбассейнов.  
217 Мы ограничиваем наше исследование водосборными бассейнами площадью более 200 км<sup>2</sup>, произвольно  
218 выбранным пороговым значением, чтобы избежать ложной статистики при выборке значений растра с  
219 конечным разрешением из сравнительно небольших полигонов. В результате для данного исследования был  
220 использован 221 водосбор (рис. 1). Изучаемые водосборы занимают общую площадь 423 099 км<sup>2</sup> при медианной  
221 площади 1 428 км<sup>2</sup> (91 водосбор имеют площадь менее 1000 км<sup>2</sup>). В территорию входят части Афганистана  
222 (АФГ), Казахстана (КАЗ), Кыргызстана (КГЗ), Таджикистана (ТДК) и Узбекистана (УЗБ).

223  
224  
225  
226  
227  
228  
229  
230  
231  
232  
233  
234  
235  
236  
237  
238  
239  
240  
241  
242  
243  
244  
245  
246  
247  
248  
249  
250  
251  
252  
253  
254  
255  
256  
257  
258  
259  
260  
261  
262  
263  
264  
265  
266  
267

Являясь частью бассейна Аральского моря, Амударья (водосборная площадь составляет 230 782 км<sup>2</sup>) и Сырдарья (107 744 км<sup>2</sup>) являются двумя наиболее значительными бассейнами региона (цветами на рис. 1 выделены крупные бассейны). За ними следует бассейн Мургаб-Харируд (63 415 км<sup>2</sup>), бассейн Чу-Талас (15 266 км<sup>2</sup>) и Иссык-Кульский бассейн (5 924 км<sup>2</sup>). Средняя высота водосборов составляет 2791 метр над уровнем моря (н.у.м.), минимальная 877 метров и максимальная 4 641 метр.

Для 221 изучаемого водосбора средний по региону коэффициент стока составляет  $\rho=42\%$  (подробное описание источников данных см. в разделе 2.2 Marti et al. 2023). Это та часть общего запаса воды из зоны формирования стока, которая в среднем поступает в аридные равнины. Там большая часть этой воды либо расходуется на орошение и испаряется, либо дренируется и позже возвращается в атмосферу (Shults 1965). Небольшие коэффициенты стока на севере Афганистана подтверждают крайне ограниченную водность этого региона (рис. 1). Напротив, западная оконечность Тянь-Шаня, Ферганский хребет в восточной части Ферганской долины, южный склон Гиссар-Аллая и Западный Памир — это места, где расположены влажные водосборы. В таблице 1 суммированы средние гидроклиматологические данные по бассейнам 221 водосбора.

**Таблица 1.** Средние статистические данные по водосборам.  $Q_{obs}$  — это измеренная историческая норма расхода воды,  $P$  — это норма исторических осадков,  $T$  — норма исторической температуры воздуха,  $\phi$  — индекс засушливости,  $\varepsilon$  — доля испарения, а  $\rho$  — коэффициент стока. Все значения представляют собой долгосрочные средние значения во времени и усреднены в пространстве по всем соответствующим подбассейнам (дополнительную информацию см. в Marti et al. 2023).

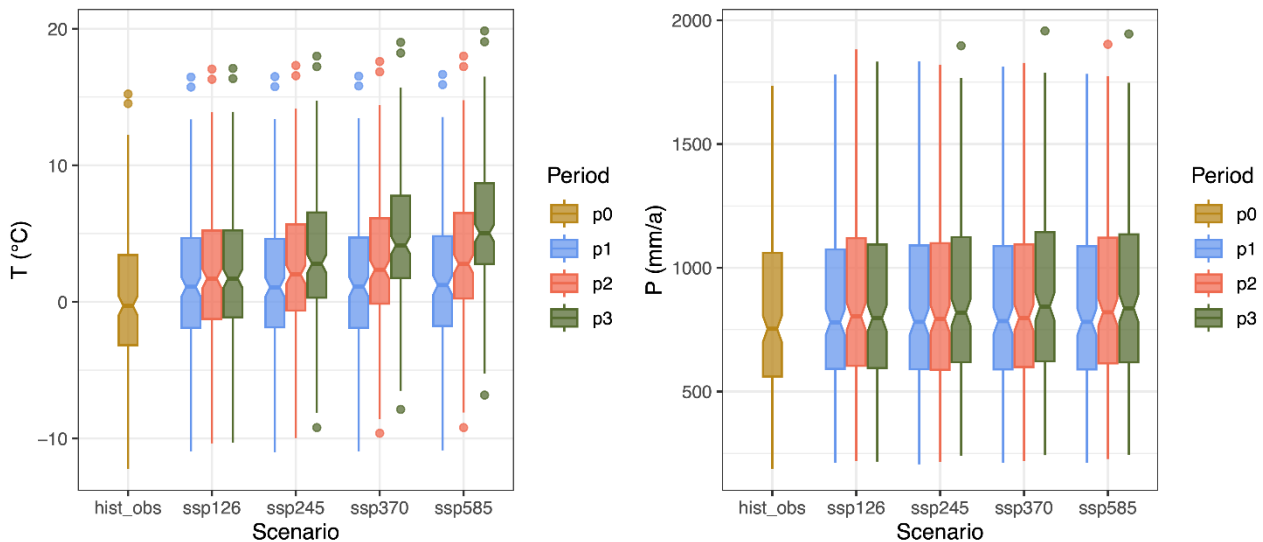
Бассейн	$Q_{obs}$ (мм)		$T$ (°C)	$\phi$ (-)	$\varepsilon$ (%)	$\rho$ (%)
АМУДАРЬЯ	382	819	-0,3	1.2	53,4	46,6
ЧУ ТАЛАС	329	1012	-2,1	0,7	67,5	32,5
ИССЫК-КУЛЬ	459	885	-4,7	0,7	48,1	51,9
МУРГАБ	67					
ХАРИРУД		589	6,8	2.1	88,7	11.3
СЫРДАРЬЯ	415	974	-0,1	0,8	57,4	42,6

Глобальные ежедневные климатические данные об осадках и температуре воздуха CHELSA V21 были обработаны в регионе Центральной Азии, а норма приземной температуры воздуха на высоте 2 метров и значения общей нормы годовых осадков (мм) были рассчитаны для водосборных бассейнов за базовый период с 01-01-1979 по 31-12-2011 (Karger et al. 2017, 2021). Для расчета средней растровой статистики по конкретному подбассейну мы повсюду используем пакет Exactextract R Package (Daniel Baston 2022). Слой осадков  $\alpha$  (мм) и частота выпадения осадков  $\lambda$  (а<sup>-1</sup>) для базового периода были рассчитаны с использованием порога осадков 1 мм в день, выше которого считается влажный день. Отсюда следует, что  $P = \alpha \lambda$ , где  $P$  — среднегодовое количество осадков в мм.

Будущая модель глобальной циркуляции (GCM) суточных осадков и временных рядов температуры воздуха были получены из проекта сравнения сопряженных моделей CMIP6, фаза 6, они были доступны через хранилище климатических данных Службы по изменению климата Copernicus (C3S) для будущего периода 2011–2100 гг. и исторического базового периода 1979—2011 гг. Были загружены и обработаны данные четырех моделей: UKESM1.0-LL (Tang et al. 2019), IPSL CM6A-LR (Boucher et al. 2018), MRI-ESM2-0 (Yukimoto et al. 2020) и GFDL-ESM4 (Krasting et al. 2018). Выбор GCM соответствовал выбору Проекта межсекторального сравнения моделей воздействия (ISIMIP, см. [https://www.isimip.org/documents/413/ISIMIP3b\\_bias\\_adjustment\\_fact\\_sheet\\_Gnsz7CO.pdf](https://www.isimip.org/documents/413/ISIMIP3b_bias_adjustment_fact_sheet_Gnsz7CO.pdf)).

Исследуются следующие четыре сценария общего социально-экономического пути (SSP) и репрезентативного пути концентрации (RCP): SSP1 RCP 2.6, SSP2 RCP 4.5, SSP3 RCP 7.0 и SSP5 RCP 8.5 (Vuuren et al. 2011; Riahi et al. 2017). Для краткости в тексте мы называем их сценариями SSP1-26, SSP2-45, SSP3-70 и SSP5-85. Мы предполагаем установившиеся условия для трех будущих периодов: период 1 с 2011 по 2040 год, период 2 с 2041 по 2070 год и период 3 с 2071 по 2100 год.

268 Растровые поля приземной температуры воздуха и осадков суточной климатической модели GCM  
 269 использовались для расчета среднесуточных временных рядов по подбассейнам. Используя историческое  
 270 моделирование GCM за 1979–2011 годы в сравнении со средней зональной статистикой подбассейна  
 271 ежедневных данных CHELSA V21, отдельные временные ряды были скорректированы на смещение в R для  
 272 каждой модели GCM отдельно с использованием квантильного картирования, доступного через пакет `qmap` R  
 273 (Gudmundsson et др., 2012 г.; R Core Team 2022 г.) . Эта коррекция смещения, специфичная для модели GCM,  
 274 в конечном итоге была применена ко всем будущим периодам и сценариям для каждой модели GCM. На рис.  
 275 2 показаны сценарные и зависящие от траектории изменения распределений средних значений температуры  
 276 воздуха и осадков по 221 подбассейну, ансамблированному по 4 GCM.  
 277



278 **Рис. 2 .** На левой панели показаны усредненные по GCM распределения приземных температур воздуха, усредненные по  
 279 подбассейнам за отдельные периоды, в зависимости от сценария. На правой панели представлена соответствующая статистика  
 280 по годовым нормам осадков. Базовый период (1979–2011 гг.) обозначен p0 и показывает статистику исторических наблюдений  
 281 из набора данных CHELSA V21. p1 – p3 обозначают соответствующие будущие климатические периоды. Сбобчатые  
 282 диаграммы визуализируют медианные значения, а также первый и третий квантили. Данные за пределами усов представляют  
 283 собой выбросы, которые отображаются по отдельности.  
 284

285  
 286 Для расчета потенциального испарения за базовый период и будущие периоды 1–3 использовались  
 287 ежедневные временные ряды температуры GCM для расчета значений в подбассейнах с использованием  
 288 формулы модели Йенсена-Хейза и МакГиннеса, как подробно описано в работе Oudin et al. (2005). Затем эти  
 289 значения были скорректированы на смещение с использованием квантильного картирования со средними по  
 290 подбассейнам  $E_p$  значениями CHELSA V21 Penman (Karger et al. 2017; Beck et al. 2020) для исторического  
 291 базового (базисного) периода. Наконец, поправка на ошибку была применена к будущим климатическим  
 292 периодам для каждой модели GCM.  
 293

### 294 2.3 Данные о почве

295 Для пространственного распределения параметров почвы по подбассейнам используются различные  
 296 наборы данных. Для определения пористости почвы  $n_{\text{слой WCsat}}$  взят из данных HiHydroSoil V2.0 (Simons et  
 297 al. 2020) . Значения глубины корневой системы были получены из трех глобальных наборов данных (Yang et  
 298 al. 2016; Fan et al. 2017; Stocker et al. 2021) и впоследствии сравнивались (см. Приложение А, ESM). Мы  
 299 предполагаем, что данные Fan et al. (2017) представляет собой хороший промежуточный компромиссный  
 300 продукт для исследуемого региона и рассчитывает значения D66 на уровне пикселей, то есть глубины, выше  
 301 которой находится 66% корневой биомассы. Мы использовали информацию о почвенно-растительном покрове  
 302 Sorernicus из продукта почвенно-растительного покрова 100 м 2019 года (Buchhorn et al. 2019) и доступные  
 303 масштабные коэффициенты, зависящие от класса почвенно-растительного покрова (Hauser et al. 2022), чтобы  
 304 перемасштабировать данные Fan et al. (2017) и вычислить усредненные значения подбассейна (см.

305 Приложение В, ESM).. Наконец, для расчета  $w_0$  и мы используем значения  $D66.Z_r$  (медианное значение 367  
306 мм по подбассейнам). Данные Simons et al. (2020) взяты для  $s_1$  (данные WCsat) и  $s_w$  (данные WCrF4.2) (рис. S5  
307 в ESM, В Приложение А, показана разница между  $s_1 - s_w$ ) и используются вместе со значениями пористости  
308 для расчета  $w_0$  по  $Z_r$ .

309  
310 Повышение температуры воздуха и концентрации  $CO_2$  в атмосфере связано с корневой системой (Iversen  
311 2010; Hu et al. 2018). При сильном повышении температуры воздуха в горном регионе Центральной Азии (левая  
312 панель, рис. 2) и увеличении запаса атмосферной влаги там (правая панель, рис. 2), ареалы экосистем, вероятно,  
313 будут увеличиваться в высотных поясах. Другими словами, более глубоко укоренившаяся растительность в  
314 будущем станет более обильной в местах, рост которых был бы маловероятен в течение базового периода. Мы  
315 учитываем эту динамику, устанавливая глубину корней и температурные зависимости, характерные для  
316 подбассейна. (см. рис. S6 в Приложении А, ESM).

317

## 318 2.4 Данные о таянии ледников

319 Модель PSM не отражает криосферные процессы, связанные с ледниками, вечной мерзлотой и снегом.  
320 Чтобы учесть влияние изменения климата на вклад ледников в сток бассейна, ежемесячные прогнозы по  
321 каждому леднику для 17 993 ледников, расположенных на территории 221 бассейна, были получены из Rounce  
322 et al. (2022). Геометрия ледников взята из Инвентаризации ледников Randolph 6.0 (RGI Consortium, 2017).

323

324 Ледниковый сток  $Q_G$  с 2000 года до конца столетия был агрегирован по каждому подбассейну и усреднен по  
325 базовому периоду и трем соответствующим климатическим периодам (Rounce et al. 2023). Прогнозы  
326 ледникового стока были рассчитаны Rounce et al. (2023) с использованием моделей PyGem-OGGM для  
327 конкретных ледников, дополненных климатическими моделями CMIP6 с учетом четырех сценариев выбросов.  
328 Таблица S2 в Приложении С (ESM) показывает агрегированную статистику по бассейнам.

329

## 330 3 Результаты и обсуждение

### 331 3.1 Проверка модели PSM

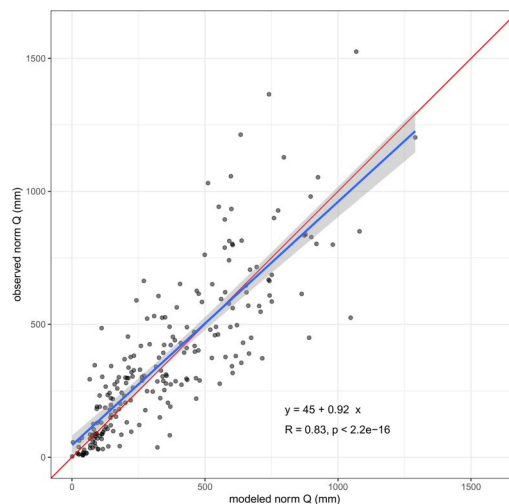
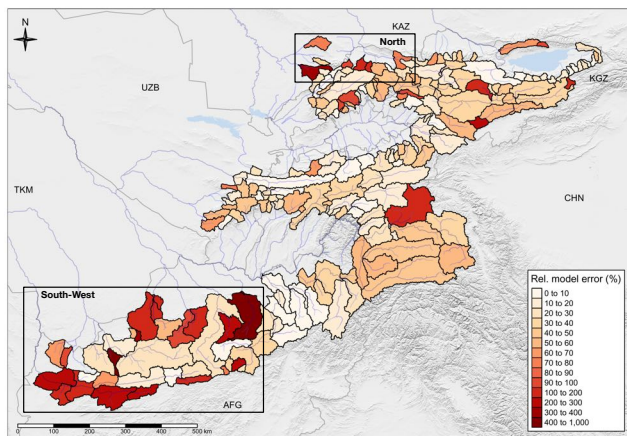
332 Чтобы проверить модель PSM (уравнение 4), мы рассчитываем коэффициент стока  $\rho(\Phi, \gamma)$  для базового  
333 периода и всех бассейнов, получаем смоделированный расход воды, согласно уравнения 5 и добавляем  
334  $Q_G(0)$  (Таблица S2, ESM) к смоделированному расходу воды для сравнения с наблюдаемой нормой расхода  
335 воды. Результаты показаны на рис. 3. На левой панели рисунка показана карта относительных ошибок модели  
336 за базовый период. Диаграмма рассеяния на правой панели рисунка показывает смоделированную норму  
337 расхода воды  $Q$  в сравнении с наблюдаемой базовой нормой  $Q$ . Проверка модели подтверждает  
338 удовлетворительную эффективность модели в НМСА.

339

340 Большие относительные ошибки модели наблюдаются в низкорасположенных водосборных бассейнах  
341 Афганистана (юго-западный регион на рис. 3) и в бассейне реки Арысь, а также в бассейне реки Талас  
342 (северный регион на рис. 3). Ошибки могут быть связаны с низкой точностью измерений, неправильным  
343 разграничением бассейна, неучтенными антропогенными воздействиями выше гидропостов, неправильными  
344 данными о воздействии на климат или ошибочными данными о почве или комбинацией любых из этих  
345 факторов. При любых обстоятельствах географическая группировка ошибок показывает корреляции в  
346 пространстве, которые должны возникать из основной закономерности. Можно предположить, что  
347 удаленность бассейнов в юго-западном регионе способствовала низкой точности измерений там. С другой  
348 стороны, в бассейнах рек Арысь и Талас на севере антропогенное воздействие на низкорасположенных  
349 водосборах может вызвать большие отклонения от моделируемого расхода.

350





351 **Рис. 3.** Относительные ошибки модели в % показаны на карте слева. Панель справа сравнивает модель с наблюдаемым  
 352 нормами расходов воды  $Q$  (мм). Красная линия на правой панели показывает соответствие 1:1, а синяя линия — линия  
 353 линейной регрессии. Также показаны уравнение регрессии, значение  $R^2$  и значение  $p$ . См. текст для выделенных юго-  
 354 западных и северных регионов.  
 355

356  
 357 Мы также сравниваем прогнозы модели PSM с прогнозами GCM для фактического испарения и  
 358 относительной влажности почвы. Более подробная информация доступна в Приложении F (ESM, рис. S67 и  
 359 S68). Прогнозы модели имеют положительные результаты, что укрепляет уверенность в результатах модели  
 360 PSM.  
 361

### 362 3.2 Анализ климатических изменений

363 Для комплексного анализа последствий изменения климата мы вычисляем социально-экономическую  
 364 траекторию и определяем относительные изменения ключевых переменных модели в зависимости от периода,  
 365 т. е.,  $da(\cdot)/\alpha(0)$ , как показано на рис. 4 (цифры в скобках являются идентификаторами периодов, например,  
 366  $E_0(0)$  относится к норме потенциального испарения в течение базового периода и является ориентиром для  
 367 соответствующих будущих климатических периодов.  
 368

369 Ожидается значительное повышение температуры воздуха в регионе с учетом изменений медианной дельты  
 370 периода 1: (SSP1-26: +1,3 °C, SSP2-45: +1,3 °C, SSP3-70: +1,3 °C, SSP5-85: + 1,4 °C), периода 2: (SSP1-26: +1,9 °C,  
 371 SSP2-45: +2,3 °C, SSP3-70: +2,7 °C, SSP5-85: +3,1 °C) и периода 3: (SSP1-26: +1,9 °C, SSP2-45: +3,1 °C, SSP3-70: +4,6  
 372 °C, SSP5-85: +5,6 °C) относительно исходного уровня (значения сначала суммируются по моделям GCM, а  
 373 медиана берется по значениям подбассейна). Рис. S28 – S31 в ESM показывает сопоставленные изменения.  
 374 Соответствующая диаграмма относительных изменений температуры воздуха показана на рис. S27.  
 375

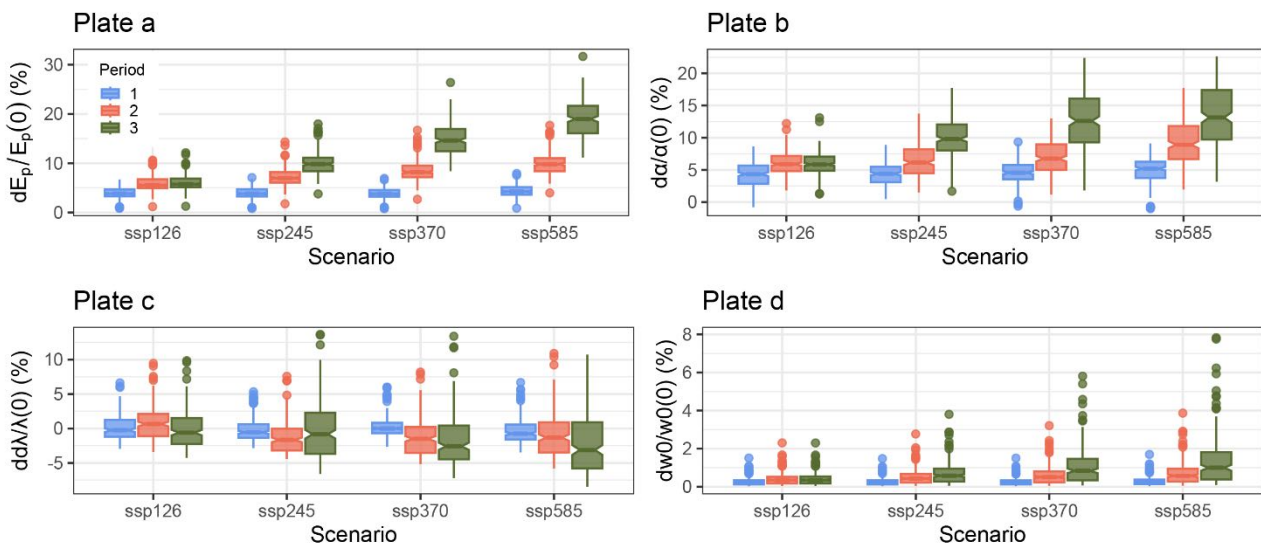
376 В соответствии с повышением температуры воздуха относительное увеличение медианного потенциального  
 377 испарения для периода 1: (SSP1-26: +3,8% , SSP2-45: +3,8%, SSP3-70: +3,8%, SSP5-85: +4,2%). ), периода 2: (SSP1-  
 378 26: +5,5%, SSP2-45: +7,0%, SSP3-70: +8,2%, SSP5-85: +9,8%) и периода 3: (SSP1-26: +5,7%, SSP2-45: +9,8%, SSP3-  
 379 70: +14,6%, SSP5-85: +19,0%). Рис. S7 – S11 в ESM показывают соответствующую диаграмму и карты.  
 380

381 Прогнозы модели GCM предполагают значительную модуляцию слоя  $\alpha_i$  , частоты осадков.  $\lambda$  на всем  
 382 горизонте прогнозирования климата. Медианное значение за период и сценарии увеличения слоя осадков  $\alpha$  о  
 383 тносятся к периоду 1: (SSP1-26: +4,3%, SSP2-45: +4,4%, SSP3-70: +4,6%, SSP5-85: +5,2% ), периоду 2: (SSP1-26:  
 384 +5,9% , SSP2-45: +6,1%, SSP3-70: +6,8%, SSP5-85: +8,9% ), и периоду 3: (SSP1-26: +5,8%, SSP2-45: +9,8%, SSP3-70  
 385 : +12,6%, SSP5-85: +13,1%). Соответствующая столбчатая диаграмма показана на рис. 4 (таблица б), а  
 386 картографированные изменения показаны на рис. S13 – S16, ECM. Медианное снижение частоты осадков за  
 387 период и сценарии  $\lambda$  за период 1: (SSP1-26: -0,3%, SSP2-45: -0,6%, SSP3-70: +0,0%, SSP5-85: -0,8% ), период 2:  
 388 (SSP1-26: +0,6%, SSP2-45: -1,7%, SSP3-70: -1,5%, SSP5-85: -1,3% ) и период 3: (SSP1-26: -0,6%, SSP2-45: -0,8%,  
 389 SSP3-70: -2,6%, SSP5-85: -3,1% ) (диаграмма на рис. 4, таблица с и карты в S18 – S21).

390  
391  
392  
393  
394  
395  
396  
397  
398  
399  
400  
401  
402  
403  
404  
405

Прогнозируемое снижение частоты осадков компенсируется более сильным увеличением слоя осадков, что указывает на несколько большее увлажнение в будущем в Центральной Азии. Точнее, относительное увеличение медианных значений за период по сценарию составляет для периода 1: (SSP1-26: +4,2%, SSP2-45: +4,1%, SSP3-70: +4,9%, SSP5-85: + 4,3% ), периода 2: (SSP1-26: +6,7%, SSP2-45: +4,6%, SSP3-70: +5,5%, SSP5-85: +8,0% ) и периода 3: (SSP1-26: +5,5 %, SSP2-45: +8,2%, SSP3-70: +11,4%, SSP5-85: +10,1% ) . Рис. S23 – S26 (ESM) показывают географическое распределение относительного увеличения значений осадков. На рис. S22 (ESM) показана столбчатая диаграмма изменений медианной дельты.

Значительные изменения температур НМСА приводят к изменениям максимального количества воды, доступной для испарения в корневой зоне. Для относительной медианной дельты изменений в  $w_0$  усредненных моделях и сценариях GCM для периода 1 получаем : (SSP1-26: +0,2%, SSP2-45: +0,2%, SSP3-70: +0,2%, SSP5-85: + 0,3% ), периода 2: (SSP1-26: +0,3%, SSP2-45: +0,4%, SSP3-70: +0,5%, SSP5-85: +0,6% ) и периода 3: (SSP1-26: +0,3%, SSP2-45: +0,6%, SSP3-70: +0,8%, SSP5-85: +1,0% ) . Соответствующая столбчатая диаграмма показана на рис. 4, табличка d, карты а – на рис. S33 – S36 (ESM).



406  
407  
408  
409  
410  
411  
412  
413  
414  
415  
416  
417  
418  
419  
420  
421  
422  
423  
424  
425  
426  
427

**Рис. 4.** Панель а: относительные изменения (в % по отношению к базовому уровню) потенциального испарения  $E_p$  для различных сценариев и целевых периодов. Панель б: относительные изменения (в % по отношению к базовому уровню) слоя осадков  $\alpha$  для различных сценариев и целевых периодов. Панель с: относительные изменения (в % по отношению к базовому уровню) частоты выпадения осадков  $\lambda$  для различных сценариев и целевых периодов. Панель d: относительные изменения (в % по отношению к базовому сценарию)  $w_0$  для различных сценариев и целевых периодов. Все значения суммируются по моделям GCM.

Относительные изменения расходов воды в результате абляции ледников относительно исходного уровня для периода 1: (SSP1-26: +24,3%, SSP2-45: +24,0%, SSP3-70: +26,1%, SSP5-85: +29,3% ), периода 2: (SSP1-26: +3,9%, SSP2-45: +9,0%, SSP3-70: +7,5%, SSP5-85: +7,4% ) и периода 3: (SSP1-26: -13,7 % , SSP2-45: -11,4%, SSP3-70: -11,1%, SSP5-85: -13,1% ) соответственно. Соответствующие столбчатые диаграммы и карты показаны на рис. S37 – S41 (ESM).

Медианные значения показывают, что региональное влияние абляции ледников на расходы воды в будущем периоде р3 (2071–2100 гг.) является умеренным. Однако есть места, где основная часть расходов воды теплого сезона образуется в результате абляции ледников, и к тому времени сокращение ледников значительно увеличилось. В этом отношении следует выделить бассейны рек Чу и Нарын (см. табличку с, рис. S41, ESM), где ожидается сильное сокращение ледникового стока. Такое сокращение летнего стока ледников имеет важные последствия для управления существующими или еще не построенными водохранилищами в этих бассейнах.

428

### 3.3 Количественная оценка климатических воздействий

429

Используя D66  $Z_7$  в качестве репрезентативных значений глубины корневой системы, медианный период ансамбля GCM и зависящие от сценария конкретные значения норм расходов воды и относительные изменения по сравнению с базовым периодом проиллюстрированы на рис. 5, панели а и б, соответственно. Ожидаемое относительное увеличение удельных расходов воды выглядит следующим образом: Период 1 ( SSP1-26: +3,5%, SSP2-45: +4,2%, SSP3-70: +5,5%, SSP5-85: +3,8%), Период 2 ( SSP1-26: +5,6%, SSP2-45: +0,8%, SSP3-70: +0,4%, SSP5-85: +5,0%) и Период 3 ( SSP1-26: +1,1%, SSP2-45: +3,8%, SSP3-70: +4,1%, SSP5-85: -2,7%). Подробные пространственные изменения представлены на рис. S42 – S46 (ESM).

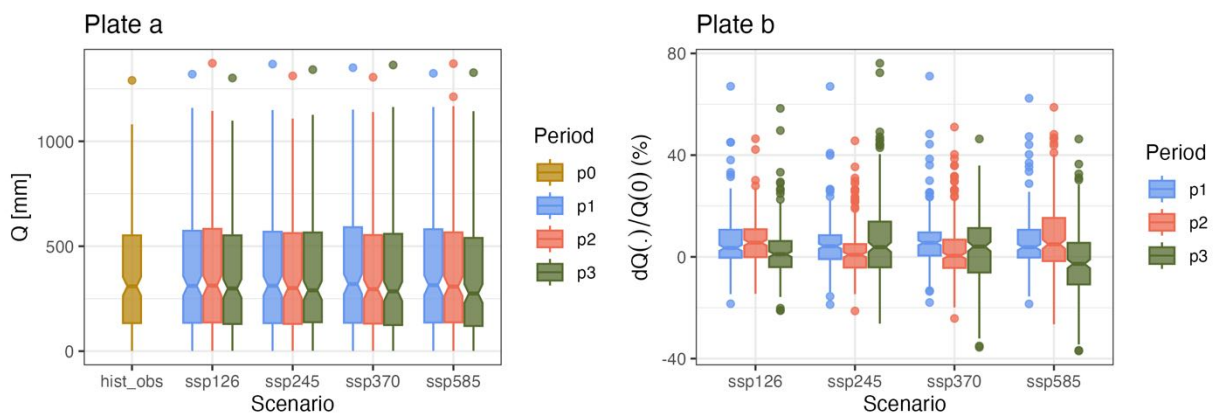
436

437

Эффект абляции дисбаланса ледников на увеличение будущих расходов воды заметен. Относительные медианные изменения удельного расхода воды, чистый вклад ледников, меньше со следующими значениями: Период 1 ( SSP1-26: +1,9%, SSP2-45: +0,6%, SSP3-70: +3,2%, SSP5-85: +1,5%), период 2 ( SSP1-26: +3,7%, SSP2-45: -1,2%, SSP3-70: -2,1%, SSP5-85: +2,2%) и период 3 ( SSP1-26: +1,4%, SSP2-45: +3,7%, SSP3-70: +3,3%, SSP5-85: -4,7%).

441

442



443

**Рис. 5** Статистика Значения нормы расхода в зависимости от периода и сценария показаны на Таблице а. На табличке б показаны соответствующие изменения дельты относительно базовых значений. Смоделированный расход в течение базового периода принимается за эталон (р0 на табличке а), а не наблюдаемый расход. Это сделано для того, чтобы не загрязнять дельта-изменения ошибками модели.

448

449

В таблице 2 суммированы медианные изменения в зависимости от периода и сценария относительно базового уровня. Из таблицы видно, что увеличение температуры воздуха и количества осадков приводит к большей засушливости, более высокому фактическому испарению и более низким коэффициентам стока.  $dT$  – дельта изменения температур воздуха,  $dP(.)/P(0)$  – относительное изменение количества осадков,  $d\Phi(.)/\Phi(0)$  – относительное изменение индекса засушливости (рис. S47 – S51, ESM),  $d\gamma(.)/\gamma(0)$  – относительное изменение индекса водоемкости бассейна (рис. S52 – S56, ESM),  $d\rho(.)/\rho(0)$  – относительное изменение коэффициента стока (рис. S57 – S61, ESM),  $dE(.)/E(0)$  – относительное изменение фактического испарения (рис. S62 – S66), ESM), а  $dQ(.)/Q(0)$  — относительное изменение расхода воды, включающее вклад ледников.

457

458

**Таблица 2.** GCM-агрегат изменения медианных значений в зависимости от периода и сценария. Изменения измеряются относительно базового периода.

сценарий	период	$dT$ (°C)	$dP(.)/P(0)$	$d\Phi(.)/\Phi(0)$	$d\gamma(.)/\gamma(0)$	$d\rho(.)/\rho(0)$	$dE(.)/E(0)$	$dQ(.)/Q(0)$
SSP1-26	п1	1.3	4,2%	-1,7%	30,9%	-2,0%	5,4%	3,5%
SSP1-26	п2	1,9	6,7%	-1,8%	37,3%	-1,8%	7,5%	5,6%
SSP1-26	п3	1,9	5,5%	-0,5%	39,2%	-3,4%	7,3%	1,1%
SSP2-45	п1	1.3	4,1%	-1,2%	29,8%	-2,4%	5,2%	4,2%
SSP2-45	п2	2.3	4,6%	1,8%	47,6%	-5,6%	7,6%	0,8%
SSP2-45	п3	3.1	8,2%	-0,5%	57,2%	-4,0%	11,9%	3,8%
ССП3-70	п1	1.3	4,9%	-1,4%	28,7%	-1,3%	5,3%	5,5%
ССП3-70	п2	2,7	5,5%	1,5%	54,4%	-6,4%	8,8%	0,4%
ССП3-70	п3	4.6	11,4%	1,8%	71,9%	-7,2%	15,5%	4,1%

SSP5-85	n1	1,4	4,3%	-0,7%	31,5%	-2,1%	5,6%	3,8%
SSP5-85	n2	3,1	8,0%	-0,3%	57,2%	-5,3%	11,4%	5,0%
SSP5-85	n3	5,6	10,1%	6,7%	86,1%	-12,8%	17,4%	-2,7%

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480

481

482

483

484

485

486

487

488

489

490

491

492

493

494

495

496

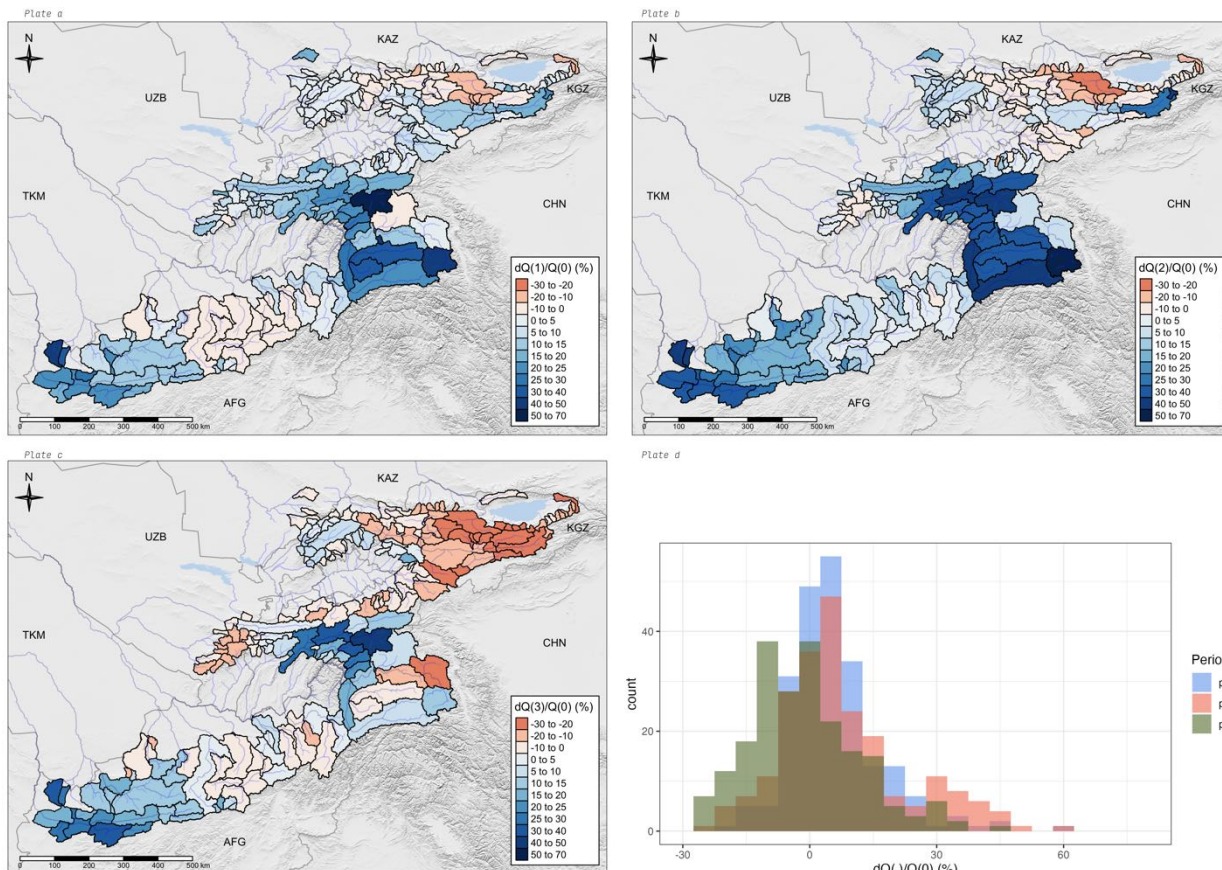
Региональные медианные значения, представленные в таблице 2, скрывают более тонкую картину географического распределения относительных изменений. На рис. 6 показаны относительные изменения удельных норм расходов воды по сценарию SSP5-8.5. Общая статистика остается относительно стабильной на протяжении всего XXI века, как показано в панели d, рис. 6. Однако результаты моделирования выявляют интригующие географические закономерности в воздействии климата (панели a–c, рис. 6), которые усложняют упрощенные объяснения. Различные механизмы в подбассейнах и в разных высотных зонах приводят к географически различным климатическим воздействиям в XXI веке.

С одной стороны, степень засушливости зоны формирования стока в горах Тянь-Шаня становится очевидным по мере ускорения там сокращения ледников и истощения материкового льда в течение XXI века (см. северные и северо-восточные бассейны на картах рис. 6). Это затрагивает Сырдарью и особенно ее главный приток, т.е. бассейны рек Нарын и Чу. и Талас. С другой стороны, на большей части высокогорных районов Гиссар-Алая и Памира в течение всего XXI века будет наблюдаться увеличение стока. В основном это связано с усилением абляции дисбаланса ледников (сравните с рис. S41, ESM) и тем фактом, что пик половодья здесь наступает позже (см. таблицу S2, ESM). Во всех районах значительного оледенения, наблюдаемое усиление таяния ледников. (рис. S38 – S41, ESM) стабилизирует расходы воды во всех трех будущих климатических периодах до тех пор, до пика талого стока ледников.

Стабилизирующее влияние на талые сток ледников зависит от климатического сценария и высоты бассейна и ледника. Пик половодья наступает позже во всех бассейнах при менее экстремальных климатических сценариях, чем при сценарии с высоким уровнем выбросов (сравните, например, панель c на рис. S41 с панелью d на рис. 6). В Нарыне, например, спад расходов воды в конце столетия в период r3 менее выражен, чем в сценарии SSP5-8.5.

В таблице 3 приведены значения по бассейнам. Ожидается, что в течение 21 века в Амударье произойдет увеличение норм расходов воды по сравнению с исходными значениями. Точное значение зависит от времени прохождения пика талого стока и, следовательно, от скорости повышения температуры воздуха в высокогорной части Центральной Азии. Основываясь на этой статистике изменений, ожидается, что водообеспеченность в бассейне Сырдарьи существенно не изменится. Как в бассейнах Чу-Талас, так и в бассейнах Иссык-Куля ожидается снижение норм расходов воды относительно исходных значений.

Прогнозируемое увеличение количества осадков приведет к увеличению расходов воды в бассейне Мургаб-Харируд по сравнению с базовым периодом. Однако следует помнить, что относительные ошибки модели в этой области высоки (левая панель на рис. 3) и что удельный расход воды изначально очень низок (рис. 1). В этих условиях даже медианное увеличение соответствующего удельного расхода воды на +50% по сравнению с базовым уровнем не приведет к резкому увеличению доступности воды в регионе в будущем.



498 **Рис. 6.** На панелях а – с показано географическое распределение дельта-изменений норм расходов воды по ансамблю GCM  
 499 для периодов 1 – 3 в рамках SSP5-8.5 по отношению к базовому периоду. Данные указаны в процентах. Обратите внимание на  
 500 нелинейные ячейки для раскраски. На панели d показаны гистограммы изменений дельты за конкретный период.  
 501 Смоделированные расходы воды за базовый период принимаются в качестве эталона. Это сделано для того, чтобы не  
 502 загрязнять дельта-изменения ошибками модели. Рис. S43 – S45 (ESM) показывают карты и гистограммы для других сценариев.  
 503  
 504  
 505

506 **Таблица 3** Медианные за период и сценарий относительные изменения удельных значений расходов воды в процентах  
 507 показаны для каждого крупного бассейна. Цифры в скобках — это значения, соответствующие конкретным сценариям, т.е.  
 508 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5).

Бассейн	Период p1	Период p2	Период p3
Амударья	(+8%, +6%, +7%, +7%)	(+7%, +1%, +5%, +9%)	(+3%, +12%, +8%, +0%)
Чу Талас	(-5%, -5%, -4%, -4%)	(-4%, -4%, -9%, -6%)	(-7%, -10%, -9%, -10%)
Иссык-Куль	(-1%, +4%, +3%, +1%)	(+0%, -3%, -4%, -5%)	(-10%, -9%, -17%, -15%)
Мургаб Харируд	(+19%, +15%, +10%, +14%)	(+15%, +5%, +10%, +27%)	(+17%, +42%, +19%, +16%)
Сырдарья	(+2%, +3%, +6%, +3%)	(+6%, +1%, -1%, +2%)	(+1%, +0%, +1%, -6%)

509

#### 510 4. Выводы

511 Для изучения климатических воздействий в регионе НМСА мы применили простую и экономную  
 512 концептуальную модель динамики влажности почвы для учета основных компонентов водного баланса почвы  
 513 на уровне водосбора. Модель учитывает запасы воды в почве, пороговый сток, глубокую инфильтрацию и  
 514 испарение, зависящее от запаса воды. Переменные состояния и потоки обусловлены периодическими  
 515 стохастическими дождями, изменчивость которых в зависимости от местоположения характеризуется частотой  
 516 и слоем осадков. Модель дает правдоподобные результаты в отношении гидрологических климатических  
 517 прогнозов, и впервые появляется подробная картина последствий на очень детальном и тонком уровне для

518 высокогорной части Центральной Азии.. Результаты моделирования подтверждают, что простое  
519 парадигматическое мышление «влажное становится все влажнее, а сухое становится суше» неадекватно в  
520 сложных гидроклиматологических областях. Результаты подтверждают, что изученные бассейны будут  
521 подвергаться локальному воздействию в зависимости от характеристик бассейна, климатических воздействий  
522 и уровней оледенения.

523  
524 Существуют многочисленные ограничения модели. Например, предполагается, что суточное  
525 распределение осадков представляет собой «пуассоновский» процесс, который не может быть подтвержден из-  
526 за отсутствия доступных данных натуральных наблюдений в отдаленном регионе (Verma et al., 2011 г.) . Что  
527 касается криосферы, вклад таяния материкового льда можно легко добавить к результатам моделирования при  
528 соответствующих климатических сценариях. Таким образом, рассмотрение динамики истощения запасов воды  
529 в результате таяния ледников может дать хорошее представление о соответствующих последствиях для  
530 гидрологии в течение двадцать первого века. Однако в модели не учитывается ни сезонное, ни постоянное  
531 накопление снега (см., например, Feng et al. 2015) . Исследования показали, что разброс реальных данных  
532 вокруг кривой Будыко также зависит от коэффициентов снегозадержания (Zhang et al., 2015) , помимо других  
533 элементов управления, таких как растительность, сезонные характеристики осадков, свойства почвы (как это  
534 реализовано в модель PSM) и топографические факторы (Greve et al. 2016). Например, Berghuijs et al. (2014)  
535 использовали данные из Соединенных Штатов, чтобы показать, что уменьшение доли снега в осадках связано  
536 с меньшим стоком рек в годовом и многолетнем масштабах времени. Этот эффект невозможно отразить с  
537 помощью модели PSM, как показано здесь. Наконец, в формулировке нашей модели мы лишь косвенно  
538 учитываем будущую динамику многолетней мерзлоты через эмпирические  $w_0$  зависимости и  
539 подразумеваемую динамику в рамках сценария потепления. Оттаивание многолетней мерзлоты и  
540 дополнительный вклад в расход воды здесь явно не рассматриваются.

541  
542 Несмотря на чрезвычайную вычислительную эффективность, аналитическое решение модели PSM  
543 ограничено стационарными условиями. Модель помогает нам понять общую доступность воды и ее  
544 межпериодные изменения. Однако он предполагает мгновенные смены климатических периодов и единые  
545 годовые нормы расходов воды, что препятствует изучению сезонности расходов воды. Например, с усилением  
546 потепления и перехода типа питания от снегово-ледникового к дождево-снеговому, расходы воды холодного  
547 сезона в период с октября по март увеличатся и, вместе с этим, увеличится потенциал производства  
548 гидроэлектроэнергии, когда спрос на электроэнергию для отопления высок. Siegfried et al.. (2012) показали,  
549 что основное внимание уделяется бассейну реки Сырдарья, несоответствие между наличием воды в теплый  
550 сезон и потребностью сельскохозяйственных культур в воде будет увеличиваться. С изменением соотношения  
551 расходов воды в холодный и теплый сезоны в сторону более высоких значений в ранние месяцы года, и резким  
552 ростом потребности в испаряющейся воде ниже по течению в орошаемом сельском хозяйстве (как для  
553 орошения, так и для охлаждения сельскохозяйственных культур) будет увеличиваться дефицит воды, который  
554 можно будет контролировать только в отдельных бассейнах с помощью водохранилищ достаточного объема..

555  
556 При условии, что сельскохозяйственное производство в странах, расположенных ниже по течению рек,  
557 останется жизнеспособным с точки зрения физиологии растений и что оно по-прежнему будет иметь важное  
558 значение для продовольственной самообеспеченности и производства товарных культур, а также для  
559 обеспечения средств к существованию, скорее всего, произойдет бум строительства водохранилищ. Эти  
560 водохранилища не только могут компенсировать потерю запасов ледниковой воды, но будучи оснащенными  
561 гидроэлектростанциями, могут одновременно способствовать переходу к экологически чистой энергетике в  
562 регионе. Однако при таком сценарии увеличения инвестиций в инфраструктуру необходимо позаботиться о  
563 том, чтобы фрагментация среды обитания в горных реках не привела к неблагоприятным экологическим  
564 последствиям.

565  
566 Климатические прогнозы предполагают, что Центральная Азия испытает более влажное будущее с  
567 увеличением осадков. Ожидается, что интенсивность и частота осадков возрастут в некоторых частях хрупкого  
568 горного региона. Это потенциально может критически изменить картину рисков и требует более глубоких  
569 исследований с акцентом на будущее развитие экстремальных гидрометеорологических явлений. Будущие

570 исследования в этом направлении должны быть сосредоточены на наводнениях и изучении возможности  
571 длительных засушливых периодов, которые могут привести к широкомасштабным лишениям в регионе.  
572 Наконец, местные заинтересованные стороны должны быть осведомлены о том, что будущие осадки в регионе  
573 не обязательно приведут к увеличению доступности воды для экономических целей. Вместо этого проблемы  
574 управления будут возрастать по мере продолжающегося старения инфраструктуры, потери хранилищ воды  
575 (потеря материкового льда и объема водохранилищ из-за заиления), увеличения численности населения и  
576 более неустойчивого гидроклимата.

577 **Дополнительная информация:** см. прилагаемый файл  
578 202405\_springer\_climatic\_change\_future\_water\_pulse\_central\_asia\_esm\_R1.pdf

579 **Благодарности :** Мы благодарим анонимных рецензентов за их полезные предложения и комментарии.

580 **Вклад автора:** TS разработал исследование и реализовал модель. AM поддержал реализацию модели и  
581 реализовал модель испарения. VM провел анализ ледников. PM предоставил критически важную обратную  
582 связь по всему исследованию. DK предоставил климатические данные высокого разрешения CHELSA. AY  
583 участвовал в критических обсуждениях отдельных результатов в крупных речных бассейнах и предоставил  
584 ценную обратную связь по методологии и результатам.

585 **Финансирование:** Этот проект получил финансирование в рамках программы исследований и инноваций  
586 Европейского Союза Horizon 2020 в рамках грантового соглашения № 101022905 (Проект Hydro4U, см.  
587 [www.hydro4u.eu](http://www.hydro4u.eu)).

588 **Доступность данных :** Наборы данных, созданные и/или проанализированные в ходе текущего  
589 исследования, доступны в PANGEA. Ссылка будет предоставлена, когда архив данных будет доступен  
590 онлайн.

## 591 **Декларации**

592 **Этическое одобрение и согласие на участие.** Эта статья не содержит исследований с участием людей  
593 или животных.

595 **Согласие на публикацию:** Все авторы согласились с содержанием и дали явное согласие на отправку  
596 рукописи.

598 **Конкурирующие интересы:** у авторов нет соответствующих финансовых или нефинансовых интересов,  
599 которые необходимо раскрывать.