






Научная статья

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ НВУ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОКА РЕК АРАЛО-СЫРДАРЬИНСКОГО БАССЕЙНА

Тұрсын А.Тілләкәрім<sup>1\*</sup>  PhD, Серик Б. Саиров<sup>2</sup>  к.г.н, ассоциированный профессор,  
Назира С. Алимжанова<sup>1</sup>, Мариям Қ. Нұрхан<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>РГП «Казгидромет», г. Астана, Казахстан; tillakarim\_t@meteo.kz (TAT), [nazalimzhanova@gmail.com](mailto:nazalimzhanova@gmail.com) (HCA), nurkhan\_m@meteo.kz (MKH)

<sup>2</sup> Казахский научно-исследовательский институт водного хозяйства, Тараз, Казахстан; [seriksairov@yandex.kz](mailto:seriksairov@yandex.kz)

\* Автор корреспонденции: Тұрсын А.Тілләкәрім, tillakarim\_t@meteo.kz (TAT)

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

гидрологическое моделирование, эффективность модели, калибровка, валидация модели, Казахстан

### АБСТРАКТ

В статье проведена оценка возможности применения модели HBV для горных рек Арало-Сырдарьинского бассейна. В работе было выполнено моделирование стока горных рек, площадь водосбора которых варьируется в пределах 88...1481 км<sup>2</sup>. За периоды 2000...2016 годы была произведена калибровка параметров моделей, используя алгоритм GAP optimization. Эффективность модели оценена несколькими критериями: Нэша-Сатклиффа (NSE), процентным системным отклонением (PBIAS), стандартным коэффициентом отклонения (RSR). По результатам подбора оптимальных параметров была получена эффективность моделей: по NSE составила 0,56...0,94, PBIAS колеблется в пределах от -8,1 до 28,9 %, RSR 0,02...0,13. Рассчитанные эффективности модели определили, что динамика моделируемого стока в период калибровки хорошо коррелируют с наблюдаемыми данными. Наряду с вышеуказанными критериями выполнена оценка на применимость модели в качестве методики прогнозирования с помощью отношения  $\bar{S}/\sigma$ , в результате которого выявлено что, модель для рек Аксу, Сайрам, Шаян, Болдыбек, Каттабугунь могут быть применены для прогноза стока. За периоды 2019...2022 гг. была произведена валидация параметров модели HBV всех исследуемых рек. В результате калибровки и валидации модели откалиброванные параметры модели горных рек Арало-Сырдарьинского бассейна могут быть рекомендованы к применению при моделировании стока с помощью модели HBV и для прогнозирования стока, а именно для составления краткосрочных, среднесрочных прогнозов расхода воды, за исключением бассейнов рек Жабаглысу и Карашик.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях усиливающихся климатических изменений и увеличения водопотребления проблема эффективного и устойчивого управления водными ресурсами становится одной из ключевых, особенно для территорий Центральной Азии. К числу наиболее уязвимых водохозяйственных систем относится Арало-Сырдарьинский бассейн, где формирование речного стока происходит главным образом в горных районах и имеет определяющее значение для водоснабжения населения, развития сельского хозяйства и поддержания экосистем в нижнем течении.

В настоящее время в Южном Казахстане, в частности в Арало-Сырдарьинском регионе, ситуация с водой чрезвычайно напряженная. Более 70 % забираемой из поверхностных источников воды используется здесь для орошаемого земледелия. Усугубляет также трансграничное положение рассматриваемого бассейна, т. к. в перспективе ожидается сокращение ресурсов трансграничного стока, в связи с ростом хозяйственной деятельности в соседних государствах [1, 2].

**По статье:**

Получено: 10.02.2026

Пересмотрено: 16.03.2026

Принято: 19.03.2026

Опубликовано: 01.07.2026

Горные реки рассматриваемого бассейна отличаются сложным режимом стока, формирование которого определяется взаимодействием атмосферных осадков, процессов снеготаяния, а также физико-географических особенностей водосборных территорий. Характер весеннего и весенне-летнего половодья во многом зависит от высотной поясности, экспозиции склонов, размеров водосборов и совокупности климатических и гидрогеологических условий. В условиях наблюдаемых изменений сроков наступления и интенсивности половодий учет указанных факторов при планировании водохозяйственной деятельности приобретает особую значимость и требует применения современных методов гидрологического моделирования, позволяющих повысить точность оценки водных ресурсов и адаптировать управление ими к меняющимся природным условиям.

**Для цитирования:**

Тіллекерім Т., Саиров С.,  
Алимжанова Н., Нұрхан М.  
Результаты применения  
модели HBV для  
моделирования стока рек  
Арало-Сырдарьинского  
бассейна//

Гидрометеорология и  
экология, 122 (2), 2026, 46-  
59.

К настоящему времени накоплен большой опыт в области моделирования гидрологических систем, однако остается до конца не выясненным то, как функционирует водосбор в целом. Выбор гидрологической модели в качестве инструмента исследования обычно проводится в условиях значительной неопределенности и недостатка объективных критериев этого выбора [3].

Использование математических моделей стока является одним из наиболее эффективных инструментов для анализа и прогнозирования гидрологического режима рек, особенно в условиях ограниченности наблюдательных данных. Среди концептуальных гидрологических моделей широкое распространение получила модель HBV, которая успешно применяется для моделирования стока рек различного генезиса, включая снеговые и горные бассейны, благодаря относительно простой структуре, умеренным требованиям к входным данным и доказанной устойчивости результатов [4, 6].

Ранее авторами настоящего исследования были проделаны работы, направленные на калибровку модели HBV для условий горных рек Казахстана. В рамках этих работ модель была откалибрована для 15 водосборов горных рек Туркестанской, Восточно-Казахстанской, Алматинской областей и территории г. Алматы с использованием алгоритма оптимизации GAO optimization. В результате автоматического калибрования для каждого водного объекта были определены оптимальные наборы параметров модели с учетом климатических, гидрологических и геолого-геоморфологических условий водосборов. Полученные результаты показали, что модель HBV удовлетворительно и в ряде случаев с высокой точностью воспроизводит динамику речного стока горных рек Казахстана: значения критерия Нэша–Сатклиффа находились в диапазоне 0,745...0,950, что свидетельствует о высокой воспроизводимости наблюдаемого гидрологического режима и перспективности применения модели для дальнейших исследований [5, 7].

Целью настоящей работы является оценка результатов применения модели HBV для моделирования стока горных рек Арало-Сырдарьинского бассейна на основе калибровки и валидации модели с использованием комплекса статистических критериев.

**Объект исследования.** В данной работе объектами исследования являются 8 горных рек Арало-Сырдарьинского бассейна (табл.1., рис.1). Важность данных водных объектов заключается в использованиях ресурсов речных вод для водообеспечения региона Туркестанской области, а также для орошения, которое развито на южной части республики.

Важную роль в формировании стока рассматриваемых рек играют атмосферные осадки и таяние снега. Продолжительность весеннего и весенне-летнего половодья

зависит от средней высоты, площади, рельефа и особенностей климатических и гидрогеологических условий.



**Рисунок 1.** Карта расположения водосборных областей рек Арало-Сырдаринского бассейна

Площадь водосборной области рассматриваемых рек варьируется в диапазоне от 87,5 км<sup>2</sup> (р. Болдыбрек) до 1481 км<sup>2</sup> (р. Боралдай). Диапазон высот водосборов достигает до 4187 м н.у.м.

**Таблица 1**

*Общие сведения водосборов рек*

№	Список постов	F, км <sup>2</sup>	H, м	Метеостанции	Нмс, м н.у.м.
1	р. Аксу – с. Саркырама	452	775...3969	Аул Турара Рыскулова, Шуылдак, Тасарык	1292
2	р. Сайрам – с. Тасарык	434	1065...4187	Аул Турара Рыскулова, Тасарык	965
3	р. Боралдай – с. Боралдай	1481	431...1688	Аул Турара Рыскулова, Шаян, Нурлыкент	709
4	р. Шаян – в 3,3 км ниже устья р. Акбет	479	434...1241	Шаян, Саудакент	352
5	р. Болдыбрек – у кордона Госзаповедника	87.5	1734...4077	Аул Турара Рыскулова, Шуылдак	1377
6	р. Каттабугунь – с. Жарыкбас	267	580...1288	Аул Турара Рыскулова, Нурлыкент	880
7	р. Жабаглысу – с. Жабаглы	167	1304...3987	Шуылдак, аул Турара Рыскулова	1377
8	р. Карашик – с. Хантаги	340	451...2091	Шолаккорган, Ащысай, Туркестан	501

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для моделирования стока горных рек в данной работе использована концептуальная гидрологическая модель HBV, версия HBV-light. Модель разработана в Шведском метеорологическом и гидрологическом институте и представляет собой

концептуальную модель водосбора, преобразующая осадки, температуру воздуха и потенциальное суммарное испарение либо в снеготаяние, либо в сток или приток в водохранилище [4].

Необходимой входной информацией для модели являются количество осадков (суточные суммы), температура воздуха (среднесуточные значения), испарение (среднемесячные многолетние данные), расход воды (среднесуточные значения), цифровая модель рельефа и информация о ледниковых покрытиях. Стандартная модель действует на основе месячных данных об усредненном по большому промежутку времени потенциальном суммарном испарении, обычно основанном на формуле Пенмана, скорректированной для температурных аномалий [8]. Но в данной работе для расчета испарения применена формула Н.И. Иванова, так как входные данные для расчета испарения по формуле Пенмана отсутствовали.

Для высотного анализа бассейнов использованы трехмерные снимки SRTM (Shuttle radar topography mission). На основе данных SRTM с расширением в 30x30 м подготовлены цифровые модели рельефа (ЦМР). Полученная информация помогла в проведении анализа рельефа каждого бассейна, классификации площади бассейнов по высотным зонам и выделении склонов различных экспозиций. При наличии ледникового покрова данная информация также учитывалась. Данные ледникового покрова взяты из базы данных GLIMS Глобального космического измерения сухопутного льда [9].

Для каждого водосбора реки подобраны метеорологические станции (табл. 1), расположенные в районе водосбора реки, а также которые имели хорошую связь между осадками и стоком реки.

**Методики оценки эффективности модели.** Модель HBV при оценке соответствия моделированного стока к наблюдаемому использует общепринятый критерий эффективности Нэша-Сатклифа (NSE) (1) [10], называемой в модели Reff [11]:

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \underline{Q}_{sim})^2}, \quad (1)$$

где  $Q_{obs}$  – расход воды, измеренный на гидрологическом посту;  $Q_{sim}$  – расход воды, рассчитанный с помощью модели.

В данной работе в качестве альтернативной оценки эффективности воспроизведения модели наблюдаемых данных рассчитаны следующие статистические оценки: коэффициент корреляции, процентное системное отклонение (2), стандартный коэффициент отклонения (3) [12]:

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs})} \right] \quad (2)$$

и стандартным коэффициентом отклонения

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2} \right]}{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y^{mean})^2} \right]} \quad (3)$$

где,  $Y_i^{obs}$  – расход воды, измеренный на гидрологическом посту,  $Y_i^{sim}$  – расход воды, рассчитанный с помощью модели,  $Y^{mean}$  – среднее значение расходов воды, измеренный на гидрологическом посту.

Для оценки последующего использования моделей в целях оперативного гидрологического прогнозирования рассчитан критерий качества методики согласно Наставлению по службе прогнозов [13]. За критерий применимости и качества прогнозов принято отношение  $\bar{S}/\sigma$  (4):

$$\bar{S}/\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y - \bar{y})^2}{n-m}} / \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Методика прогноза считается применимой для выпуска оперативных прогнозов при следующих отношениях (5):

$$\begin{aligned} &\text{при } n \leq 15, \bar{S}/\sigma \leq 0,7; \\ &\text{при } 15 < n < 25, \bar{S}/\sigma \leq 0,75; \\ &\text{при } n \geq 25, \bar{S}/\sigma \leq 0,80. \end{aligned} \quad (5)$$

где,  $\bar{S}$  – средняя квадратичная погрешность проверочных прогнозов,  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение от нормы,  $n$  – число членов ряда. Категория качества применимой методики и соответствующее значение  $\bar{S}/\sigma$  даны в таблице 2.

Оценка эффективности производится по критериям приведенных в таблице 2.

**Таблица 2**

*Общие оценки эффективности рекомендуемых статистических данных за месячный период [12,13]*

Рейтинг производительности	RSR	NSE	PBIAS, %	$\bar{S}/\sigma$
Очень хорошо	0,00 <RSR <0,50	0,75 <NSE <1,00	PBIAS <±10	
Хорошо	0,50 <RSR <0,60	0,65 <NSE <0,75	±10 <PBIAS <±15	0,50
Удовлетворительно	0,60 <RSR <0,70	0,50 <NSE <0,65	±15 <PBIAS <±25	0,51 ... 0,80
Не удовлетворительно	RSR > 0,70	NSE <0,50	PBIAS > ±25	

**Калибровка параметров модели.** Одним из наиболее трудных аспектов применения концептуальных моделей является калибровка выбранной модели применительно к конкретному водосбору. Большинство параметров модели определяются итерационным способом, вручную или автоматически, на основе исторических рядов входных и выходных данных [14].

Процедура калибровки параметров модели заключается в поиске одного оптимального набора параметров для исследуемой территории. От этой процедуры напрямую зависит надежность результатов гидрологических моделей водосбора. При автоматической калибровке на модели HBV выбираются наилучшие параметры в пределах заданного диапазона [15], после чего модель запускается с использованием заданных параметров.

Для калибровки используется период, включающий в себя как многоводные, так и маловодные гидрологические годы, также необходимы синхронные ряды стока и метеорологических данных.

В данной работе использован метод автоматической калибровки, разработанный Лингстрёмом [16], который позволяет использовать различные критерии, при необходимости выбранные параметры изменялись вручную.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основной задачей в данной работе было моделирование данных стока с 2000 года с целью учета изменений климатических условий в речных бассейнах. Эта задача представила определенные трудности, поскольку большинство речных бассейнов в Арало-Сырдаринском регионе подвержены интенсивной хозяйственной деятельности. В рассматриваемом районе очень развито сельское хозяйство, что значительно влияет на гидрологический режим рек.

Необходимо отметить, что в зоне формирования стока, а также в водосборных областях всех рек, наблюдается редкая сеть метеорологических станций. В связи с этим для моделирования стока используются данные с близлежащих станций (рис. 1),

расположенных в значительном удалении от замыкающего створа, зачастую до 95 км. Такое расположение метеостанций может влиять на точность гидрологических моделей, поскольку данные не всегда корректно отражают локальные климатические условия водосборного бассейна.

Согласно рекомендациям для моделирования стока рек по модели HBV-light, водосборная область моделируемых рек должен составлять не менее 1000 км<sup>2</sup>. Однако, в рассматриваемом водохозяйственном бассейне водосборные области большинства рек, за исключением крупных как Сырдария, Арысь, Келес, Бадам, не достигают 1000 км<sup>2</sup>. Из выбранных рек лишь водосборная область реки Боралдай превышает данный порог, а водосборная область остальных рек варьируется от 87,5 км<sup>2</sup> (р. Болдыбрек – у кордона Госзаповедника) до 479 км<sup>2</sup> (р. Шаян – в 3,3 км ниже устья р. Акбет).

Все вышеуказанные обстоятельство могут создать определенные трудности при применении модели HBV-light, требуя дополнительного внимания к адаптации модели для малых водосборных бассейнов и учёта специфики локальных гидрологических процессов.

Бассейн р. Сырдарьи относится к зонам древнего орошения и в советский период являлся ключевым хлопководческим регионом. С конца 1930-х гг. проведена масштабная реконструкция водохозяйственной системы бассейна, обеспечившая расширение площадей орошаемых земель и повышение их водообеспеченности. В последующие годы развивалась сеть магистральных каналов, водохранилищ и гидротехнических сооружений, осуществлялось регулирование стока и межбассейновые переброски воды между притоками реки. Для повышения степени ирригационного использования водных ресурсов отдельных притоков р. Сырдарьи, с одновременным увеличением площади орошаемых земель и повышением водообеспеченности оросительных систем, при помощи магистральных каналов проведены многочисленные межбассейновые переброски стока: между реками Арысь и Боген – Арысь-Туркестанский канал с Богенским водохранилищем; между реками Шыршык и Келес – Большой Келесский магистральный канал; магистральный канал Ханым; магистральный канал Зах [1].

В бассейне реки Арысь активная водохозяйственная деятельность началась с 1930-х годов и имеется ряд водозаборных каналов для орошения земель. Именно в этот период большинство оросительных каналов введено в эксплуатацию. До настоящего времени они не имеют современного инженерного оборудования. В бассейне реки Арысь насчитывается до 300 магистральных и внутрихозяйственных каналов. Забор воды осуществляется на всем протяжении реки, начиная с верховьев.

Река Аксу является левобережным притоком р. Арысь. На реке Аксу выше поста с. Подгорное находятся головные сооружения двух каналов, построенные в 1935 и 1938 годах. Остальные 11 каналов берут начало ниже гидропоста.

*Река Боралдай* имеет 14 водозаборных каналов для орошения земель и несколько притоков (Белбулак, Кенсай, Жансай, Камлысай, Кольтогансай, Асылбексай, Кошкарата (Киши-Боралдай)).

Наибольшее антропогенное уменьшение стока по сравнению с естественными условиями произошло в бассейнах рек Арысь, Бадам, Боген; после ввода Арысского канала это изменение составило в среднем 55 %, в маловодные годы – до 80 %, в многоводные годы – до 35 % [2].

Влияние антропогенной деятельности на сток воды в горной области формирования стока отсутствует или не имеет существенного значения. Однако этот фактор приобретает весьма большое значение в области рассеивания стока, где забор воды на орошение изменяет картину. В числе рассматриваемых рек можно выделить реки Болдыбрек и Жабалгысу, находящиеся на среднегорной части бассейна, они испытывают минимальное антропогенное воздействие. Это обеспечивает относительно естественное состояние гидрологических процессов, что делает их важными объектами для исследований естественного водного режима. В отличие от них, пункты наблюдений за

другими реками, расположенные в равнинной части бассейна реки Сырдария, подвержены значительному антропогенному воздействию. В равнинных областях, более плотно заселенных и активно используемых для сельского хозяйства и промышленности, реки испытывают существенное влияние человеческой деятельности. Это приводит к изменениям в гидрологическом режиме.

Подбор наилучших параметров модели (калибровка), проведенный с учетом факторов зарегулированности большинства рек и активного использования вод на орошение, продемонстрировал хорошую степень точности. Результаты моделирования соответствуют оценкам «очень хорошей» и «хорошей» воспроизводимости (табл. 2). Это свидетельствует о том, что модель адекватно отражает гидрологические процессы в регионе.

В целом, для остальных семи рассматриваемых рек результаты оценки эффективности модели были следующими. Согласно критерию NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), рейтинг производительности соответствует «хорошей» оценке, варьируясь в пределах 0,79...0,94. Процентная ошибка модели находится в диапазоне от -8,1% до +3,5%. Коэффициент RSR (Root Mean Square Error to Standard Deviation Ratio) для всех рек составляет менее 0,13 (табл.3). Эти показатели свидетельствуют о высокой точности модели в воспроизведении наблюдаемых гидрологических процессов.

Таблица 3

Результаты калибровок рек

№	Река-пункт	Период калибровки, г.г.	Эффективность модели				Период валидации, г.г.	Эффективность модели		
			Calibration					Validation		
			NSE	PBIAS	RSR	S/σ		NSE	PBIAS	RSR
1	р. Аксу – с. Саркырама	2001...2005	0,92	+0,2	0,10	0,96	2019...2022	0,72	-37,29	0,57
2	р. Сайрам – с. Тасарык	2000...2004	0,94	+0,9	0,06	0,57	2019...2022	0,61	-40,67	0,73
3	р. Боралдай – с. Боралдай	2004...2009	0,91	-5,6	0,13	1,54	2019...2022	0,72	-23,79	0,53
4	р. Шаян – в 3,3 км ниже устья	1982...1987	0,88	+3,5	0,03	0,44	2019...2022	0,29	-21,50	0,85
5	р. Акбет – у кордона Госзаповедника	2013...2018	0,92	+1,7	0,02	0,21	2019...2022	0,77	-22,73	0,50
6	р. Каттабугунь – с.Жарыкбас	2007...2012	0,80	-8,1	0,04	0,88	2019...2022	0,70	-6,44	0,55
7	р. Жабаглысу – с.Жабаглы	2001...2006	0,79	-7,8	0,02	0,51	2019...2022	0,44	-372,95	5,81
8	р. Карашик – с.Хантаги	2001...2004	0,56	+28,9	0,09	2,7	2019...2022	-0,04	-141,2	1,01

Условные обозначения: темно зеленым – «очень хорошо», «хорошо», зеленым – «удовлетворительно», желтым – «не удовлетворительно»

Следует отметить, что калибровка гидрологической модели для бассейна реки Карашик за период 2001...2004 гг. продемонстрировала «удовлетворительный» уровень оценки эффективности модели. По критерию NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency),

эффективность модели составила 0,56, вместе с самой большой процентной ошибкой модели, равной +28,9 %. Лишь результаты калибровки модели для бассейна реки Карашик за 2001...2004 гг. показали «удовлетворительный» результат оценки эффективности модели, которая составила по критерию NSE 0,56, которая также имеет самую большую процентную ошибку модели в +28,9 %. В период калибровки модели было отмечено, что смоделированный сток недооценивает наблюдаемые значения стока.

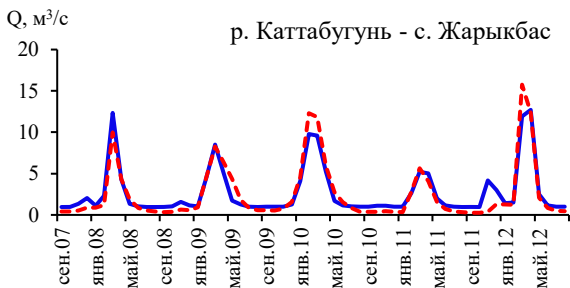
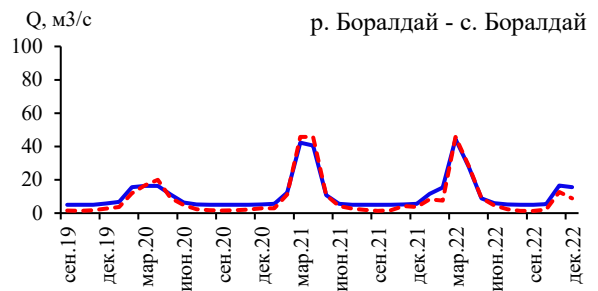
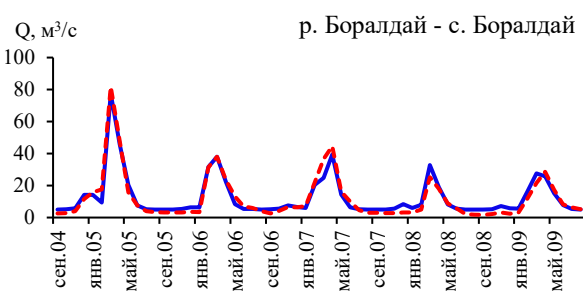
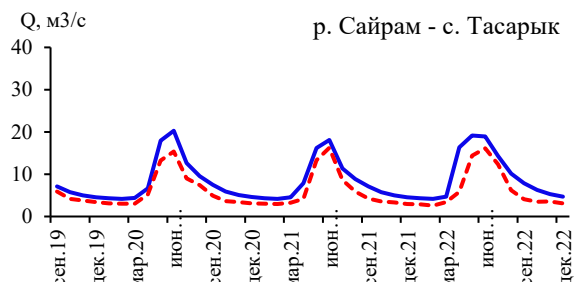
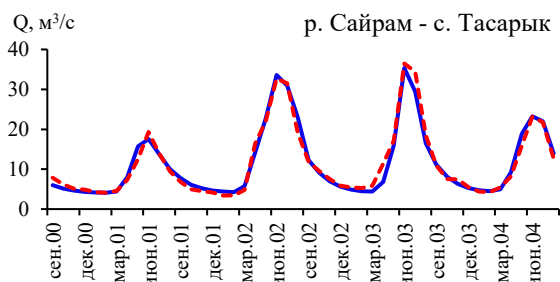
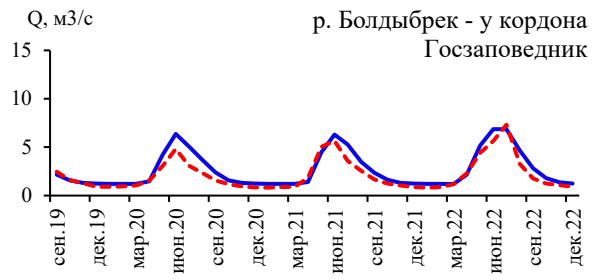
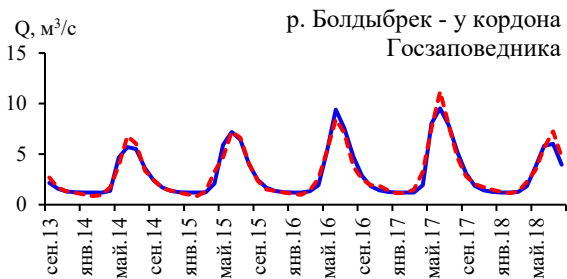
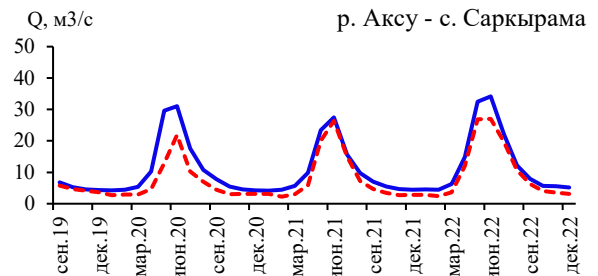
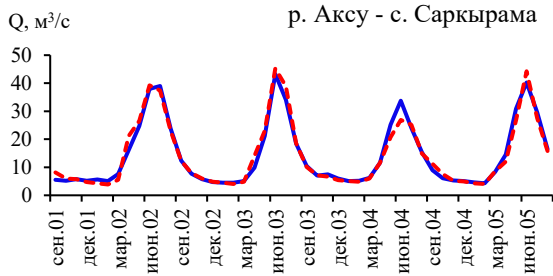
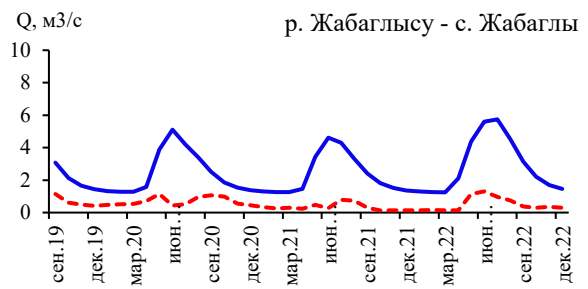
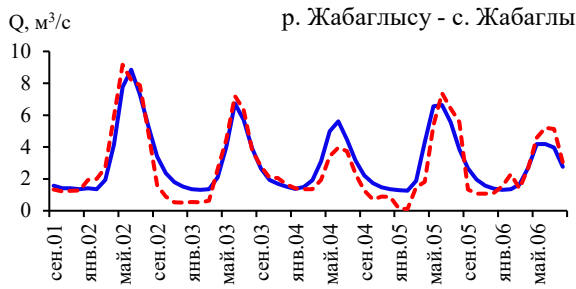
Низкая воспроизводимость модели для бассейна р. Карашик может быть обусловлена совокупным влиянием антропогенных и природных факторов. Одной из ключевых причин является зарегулированность стока Коскорганским водохранилищем, введенным в эксплуатацию в 1956 г. Регулирование стока водохранилищем, изменяет естественный гидрологический режим реки, что приводит к расхождениям между моделируемыми и наблюдаемыми значениями расхода воды. Согласно результатам исследования [17], Коскорганское водохранилище также подвергается неблагоприятным экологическим воздействиям, включая снижение притока воды, связанное как с климатическими изменениями, так и с антропогенной нагрузкой на водосборе. Эти факторы могут приводить к дополнительным изменениям водного баланса бассейна и, соответственно, снижать точность гидрологического моделирования.

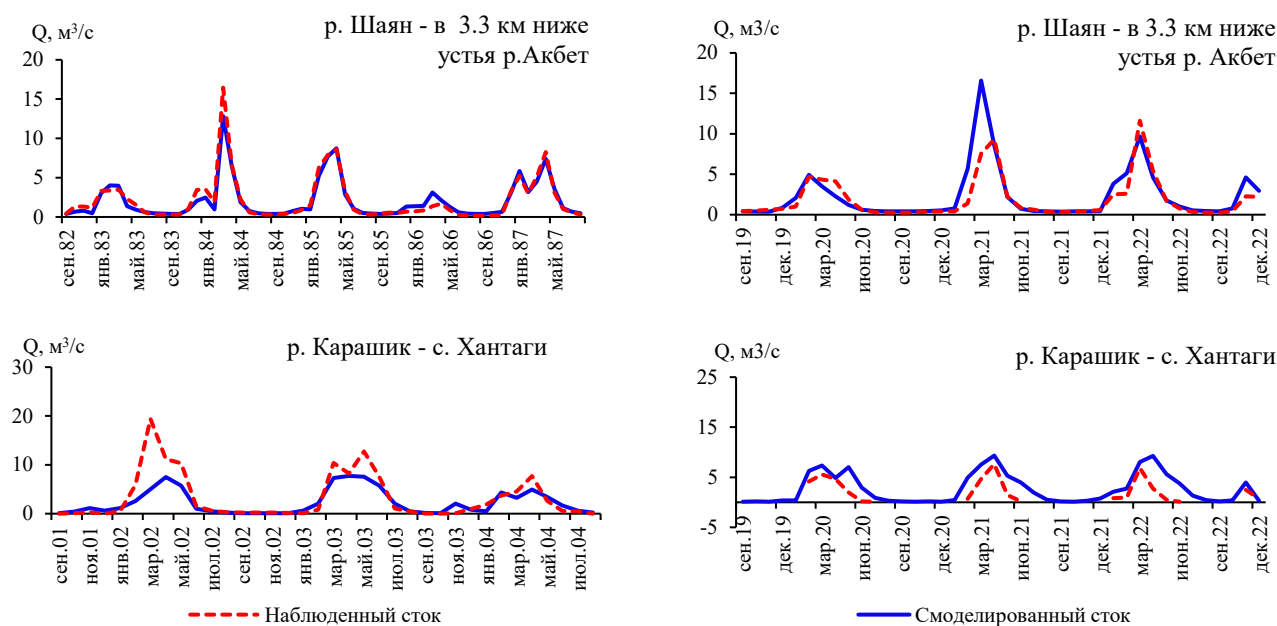
Дополнительной причиной низкой эффективности модели может являться нерепрезентативность используемых метеорологических данных. Высота водосборной области бассейна достигает 2091 м н.у.м., что обуславливает значительную пространственную неоднородность климатических условий, в частности распределения осадков, формирования снежного покрова и режима его таяния. При ограниченном количестве метеорологических станций высокогорные участки бассейна могут быть недостаточно представлены в исходных данных, что приводит к возможной недооценке снеготаяния и искажению процессов снеготаяния в модели. В результате это может вызывать ошибки в оценке объемов и сезонной динамики стока.

Для оценки последующего использования моделей в целях оперативного гидрологического прогнозирования было рассчитано отношение  $S/\sigma$ , принятое как критерий определения качества методики (табл. 2). По результатам оценки, к критерию «хорошо» соответствовали результаты моделей бассейнов рек Шаян и Болдыбрек. «Удовлетворительной» оценке соответствовали реки Сайрам и Жабалгысу. Однако для рек Аксу, Боралдай, Каттабугунь и Карашик оценка была «неудовлетворительной». Таким образом, для обеспечения надежности модели HBV при использовании для этих рек необходимо введение поправок к результатам моделирования.

После процесса калибровки модели проведена проверка калибровочных параметров на независимом периоде за последние годы (2019...2022 гг.) – валидация модели. Результаты валидации модели в совокупности трех критериев оценок эффективности модели показали, что, для бассейнов рек Каттабугунь, Болдыбрек и Боралдай модель хорошо воспроизводит наблюдаемый сток. А для остальных рек, валидация модели показала не удовлетворительные результаты. Особенно для рек Жабалгысу и Карашик процентная ошибка воспроизводимости наблюдаемого стока была очень велика, колеблясь в диапазоне 140...373 % (табл 3).

Для рек Сайрам и Аксу модель показала завышение стока в среднем на 2,5...3,8 м<sup>3</sup>/с и на 2,9...5,5 м<sup>3</sup>/с, соответственно. Это указывает на необходимость корректировки результатов модели, чтобы учесть возможные неточности в расчетах и улучшить точность прогноза гидрологических процессов для этих рек. Результаты калибровки и валидации модели по наблюдаемому и смоделированному стоку для рек Арало-Сырдарьинского бассейна, полученные с использованием модели HBV-light, представлены на рис. 2.





**Рисунок 2.** Результаты калибровки и валидации модели HBV-light для рек Арало-Сырдарьинского бассейна

После проведения валидации модели была выполнена оценка оправдываемости объёмов стока (млн м<sup>3</sup>) (табл. 4). Полученные результаты показали, что в среднем оправдываемость варьируется в пределах 74...94 %, что свидетельствует о хорошем качестве воспроизведения наблюдаемых значений моделью HBV-light. В то же время для бассейнов рек Жабаглысу и Карашик выявлены существенно более низкие значения оправдываемости, соответственно 18 и 52 %, что указывает на необходимость дополнительной калибровки модели или уточнения входных гидрометеорологических данных для данных водосборов.

**Таблица 4**

Результаты оценки оправдываемости объёмов стока (млн. м<sup>3</sup>)

№	Река-пункт	Ysim	Yobs	Ysim	Yobs	Ysim	Yobs	оправдываемость			
		2020		2021		2022		2020	2021	2022	Среднее
1	р. Аксу – с. Саркырама	231	135	198	178	240	200	59	90	83	77
2	р. Сайрам – с. Тасарык	174	130	162	125	205	142	75	77	70	74
3	р. Боралдай – с. Боралдай	171	162	289	304	266	247	95	95	93	94
4	р. Шаян – в 3,3 км ниже устья р. Акбет	31	39	86	53	52	49	79	62	95	79
5	р. Болдыбрек – у кордона Госзаповедника	50	34	51	44	53	48	69	86	89	81
6	р. Каттабугунь – с. Жарыкбас	46	61	81	87	72	73	75	93	98	89

7	р. Жабаглысу – с. Жабаглы	43	8	41	6	52	11	18	14	21	18
8	р. Карашик – с. Хантаги	74	43	80	38	72	37	58	47	51	52

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая редкую сеть метеорологических станций и значительную зарегулированность большинства рек, применение модели HBV-light продемонстрировало хорошие результаты при моделировании стока горных рек в Арало-Сырдарьинском бассейне. Об этом можно свидетельствует критерии эффективности NSE, RSR и PBIAS, соответствующие "хорошей" оценке производительности.

Откалиброванные параметры модели для бассейна р. Болдыбек могут быть рекомендованы для применения в задачах прогнозирования без введения дополнительных поправок к смоделированному стоку. В то же время для бассейнов рек Аксу, Сайрам и Каттабугунь использование откалиброванных параметров модели при прогнозировании, в том числе при составлении краткосрочных и среднесрочных прогнозов расхода воды, целесообразно осуществлять с учётом корректирующих поправок к смоделированному стоку на основе результатов валидации модели.

Однако для рек Жабаглысу и Карашик получены неудовлетворительные статистические показатели. В частности, для отдельных рек значение коэффициента эффективности Нэша–Сатклиффа (NSE) достигает  $-0,44$ , а величина PBIAS составляет более 100 %, что свидетельствует о существенных расхождениях между моделируемыми и наблюдаемыми значениями стока. При таких показателях модель не может считаться надежной для дальнейшего использования в целях прогнозирования или оценки водных ресурсов.

В связи с этим результаты моделирования для рек Жабаглысу и Карашик следует интерпретировать с осторожностью. Учитывая полученные значения NSE и PBIAS, использование построенных моделей для прогнозирования стока в данных бассейнах на текущем этапе не рекомендуется.

Несмотря на то, что модель изначально предназначена для незарегулированных рек, результаты калибровки модели для некоторых рек данного региона, где наблюдается значительная антропогенная нагрузка на водный режим, считаем что модель показала хорошие результаты моделирования стока рек Арало-Сырдарьинского бассейна. Это подчеркивает адаптивность модели и ее потенциал в условиях измененных гидрологических характеристик.

**ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ:** Данные, использованные в данном исследовании, были получены авторами из РГП «Казгидромет».

**ВКЛАД АВТОРОВ:** Концептуализация – ТАТ, СБС ; управление данными – МҚН, НСА; формальный анализ – НСА, МҚН; методология – ТАТ, СБС; руководство – ТАТ; визуализация – МҚН, НСА; написание исходной статьи– ТАТ, МҚН; написание и редак-тирование статьи – ТАТ, СБС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлибаев М. Ж., Достай Ж. Д., Турсунов А. А. Арало-Сырдарьинский бассейн (гидроэкологические проблемы, вопросы вододелиения). — Алматы : Дәуір, 2001. — 180 с.
2. Достай Ж. Д., Алимкулов С. К., Сапарова А. А. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. Ресурсы речного стока. Возобновляемые ресурсы поверхностных вод юга и юго-востока Казахстана. — Т. VII, кн. 2. — Алматы, 2012. — 360 с.

3. Лупакова С. Ю., Бугаец А. Н., Шамова В. В. Применение различных структур модели HBV для исследования процессов формирования стока на примере экспериментальных водосборов // Водные ресурсы. — 2021. — Т. 48, № 4. — С. 417–426. <https://doi.org/10.31857/S032105962104012X>
4. Bergström S. The HBV model – its structure and applications // SMHI Reports RH. — Norrköping (Sweden), 1992. — No. 4.
5. Болатова А., Тілләкәрім Т., Серікбай Н., Болатов К. Результаты калибрования гидрологической модели HBV для горных рек Казахстана // Гидрометеорология и экология. — 2018. — № 3. — С. 110–124.
6. Seibert, J. and Vis, M. J. P.: Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package, Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 3315–3325, <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>, 2012.
7. Болатова А., Тілләкәрім Т., Раимжанова М. Применение гидрологической модели HBV для прогнозирования стока рек на примере бокового притока воды в Шульбинское водохранилище // Гидрометеорология и экология. — 2019. — № 3. — С. 26–43.
8. Lindström G., Bergström S. Improving the HBV and PULSE models by use of temperature anomalies // Vannet i Nord. — 1992. — No. 1. — P. 16–23.
9. GLIMS: Global Land Ice Measurements from Space [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.glims.org/>.
10. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles // Journal of Hydrology. — 1970. — Vol. 10, No. 3. — P. 282–290. — DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
11. Seibert J. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm // Hydrology and Earth System Sciences. — 2000. — Vol. 4, No. 2. — P. 215–224. — DOI: 10.5194/hess-4-215-2000.
12. Moriasi D., Arnold J., Van Liew M., Bingner R., Harmel R., Veith T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // Transactions of the ASABE. — 2007. — Vol. 50, No. 3. — P. 885–900. — DOI: 10.13031/2013.23153.
13. Наставление по службе прогнозов. Разд. 3: Служба гидрологических прогнозов. Ч. 1: Прогнозы режима вод суши. — 2-е изд. — Л.: Гидрометеоиздат, 1962. — 193 с.
14. World Meteorological Organization. Guide to Hydrological Practices. Vol. I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. — 6th ed. — Geneva: WMO, 2012. — (WMO-No. 168).
15. Seibert J. HBV Light Version 2. User's Manual. — Stockholm: Department of Physical Geography and Quaternary Geology, Stockholm University, 2005.
16. Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M., Bergström S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model // Journal of Hydrology. — 1997. — Vol. 201, No. 1–4. — P. 272–288. — DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00041-3.
17. Әбдімүтәліп Н., Тойчибекова Г., Әділбай А., Койшиева Г., Сарбаева К. Антропогендік климаттық және әсерлер жағдайында Қосқорған су қоймасының гидрологиялық және геоқұрылымдық өзгерістері // Гидрометеорология и экология, 120 (5), 2025, 20–33.

## REFERENCES

1. Burlibaev, M. Zh., Dostai, Zh. D., Tursunov, A. A. (2001). Aralo-Syrdar'inskii bassein (gidroekologicheskie problemy, voprosy vododeleniya) [Aral-Syrdarya Basin (Hydroecological Problems, Watershed Issues)]. Almaty: Dәuir, 180 p. [in Russian].
2. Dostai, Zh. D., Alimkulov, S. K., Saparova, A. A. (2012). Vodnye resursy Kazakhstana: otsenka, prognoz, upravlenie. Resursy rechnogo stoka. Vozobnovlyaemye resursy poverkhnostnykh vod yuga i yugo-vostoka Kazakhstana [Water Resources of Kazakhstan: Assessment, Forecast, Management. River Runoff Resources. Renewable Surface Water Resources of Southern and Southeastern Kazakhstan]. Vol. VII, Book 2. Almaty, 360 p. [in Russian].
3. Lupakova, S. Yu., Bugaets, A. N., Shamova, V. V. (2021). Primenenie razlichnykh struktur modeli HBV dlya issledovaniya protsessov formirovaniya stoka na primere eksperimental'nykh vodosborov [Application of Different HBV Model Structures to Study Runoff Formation Processes Using Experimental Catchments]. Vodnye resursy, vol. 48, no. 4, pp. 417–426 [in Russian].
4. Bergström, S. (1992). The HBV model – its structure and applications. SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping (Sweden).
5. Bolatova, A., Tillәkәrim, T., Serikbai, N., Bolatov, K. (2018). Rezul'taty kalibrovaniya gidrologicheskoi modeli HBV dlya gornykh rek Kazakhstana [Results of Calibration of the HBV Hydrological Model for Mountain Rivers of Kazakhstan]. Gidrometeorologiya i ekologiya, no. 3, pp. 110–124 [in Russian].
6. Seibert, J., Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. Hydrol. Earth Syst. Sci., vol. 16, pp. 3315–3325. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>
7. Bolatova, A., Tillәkәrim, T., Raimzhanova, M. (2019). Primenenie gidrologicheskoi modeli HBV dlya prognozirovaniya stoka rek na primere bokovogo pritoka vody v Shul'binskoe vodokhranilishche [Application of the HBV hydrological model for river runoff forecasting using the example of a lateral inflow to the Shulbinskoye reservoir]. Gidrometeorologiya i ekologiya, no. 3, pp. 26–43 [in Russian].

8. Lindström, G., Bergström, S. (1992). Improving the HBV and PULSE models by use of temperature anomalies. *Vannet i Nord*, no. 1, pp. 16–23.
9. GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) [Electronic Resource]. Available at: <https://www.glims.org/>
10. Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, vol. 10, no. 3, pp. 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
11. Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 215–224. <https://doi.org/10.5194/hess-4-215-2000>
12. Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
13. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razd. 3: Sluzhba gidrologicheskikh prognozov. Ch. 1: Prognozy rezhima vod sushi (1962) [Guidelines for Forecasting Service. Section 3: Hydrological Forecasting Service. Part 1: Forecasts of Water Regime of Land]. 2nd ed., Leningrad: Gidrometeoizdat, 193 p. [in Russian].
14. World Meteorological Organization (2012). Guide to Hydrological Practices. Vol. I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. 6th ed., Geneva: WMO, No. 168.
15. Seibert, J. (2005). HBV Light Version 2. User's Manual. Stockholm: Department of Physical Geography and Quaternary Geology, Stockholm University.
16. Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, vol. 201, no. 1–4, pp. 272–288. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00041-3)
17. Abdimalip N., Tojhibekova G., Adilbaj A., Kojshieva G., Sarbaeva K. (2025) Antropogendik klimattyk zhәне aserler zhagdajynda Koskorған su қожmасынын gidrologiyalyk zhane геокurylymдыk озgeristeri // *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 120 (5), 20-33.

## АРАЛ-СЫРДАРИЯ АЛАБЫ ӨЗЕНДЕРІНІҢ АҒЫСЫН МОДЕЛЬДЕУГЕ АРНАЛҒАН HBV МОДЕЛІН ҚОЛДАНУ НӘТИЖЕЛЕРІ

Тұрсын А.Тілләкәрім<sup>1\*</sup> PhD, Серик Б. Саиров<sup>2</sup> г.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Назира Алимжанова<sup>1</sup>,  
Мариям Қ. Нұрхан<sup>1</sup>

<sup>1</sup>РМК «Қазгидромет», Астана қ., Қазақстан; tillakarim\_t@meteo.kz (TAT), [nazalimzhanova@gmail.com](mailto:nazalimzhanova@gmail.com) (HA), [nurkhan\\_m@meteo.kz](mailto:nurkhan_m@meteo.kz) (MҚH)

<sup>2</sup>Қазақ су шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты, Тараз қ., Қазақстан; [seriksairov@yandex.kz](mailto:seriksairov@yandex.kz)

\* Автор корреспондент: Тұрсын А.Тілләкәрім, tillakarim\_t@meteo.kz (TAT)

### ТҮЙІН СӨЗДЕР

гидрологиялық модельдеу,  
модель тиімділігі, калибрлеу,  
модельді валидациялау,  
Қазақстан

#### Мақала жайында:

Алынды: 10.02.2026

Қайта қаралды: 16.03.2026

Қабылданды: 19.03.2026

Жарияланды: 01.07.2026

### АБСТРАКТ

Мақалада Арал-Сырдария алабының таулы өзендеріне HBV моделін қолдану мүмкіндігі бағаланған. Жұмыста су алабындағы ауданы 88-ден 1481 км<sup>2</sup>-ге дейінгі тау өзендерінің ағысын модельдеу жүзеге асырылған. 2000...2016 жылдар аралығында модель параметрлері GAP optimization алгоритмі арқылы калибрленген. Модельдің тиімділігі бірнеше критерийлер бойынша бағаланған: Нэш-Сатклифф коэффициенті (NSE), пайыздық жүйелік ауытқу (PBIAS), стандартты ауытқу коэффициенті (RSR). Оптималды параметрлерді таңдау нәтижесінде модельдің тиімділігі былай анықталды: NSE – 0,56...0,94, PBIAS – -8,1-ден 28,9 %-ке дейін, RSR – 0,02...0,13. Есептелген модель тиімділігі калибрлеу кезеңіндегі модельделген ағын динамикасының бақылау деректерімен жақсы корреляцияланғанын көрсетті. Жоғарыда аталған критерийлермен қатар, модельдің болжау әдістемесі ретінде қолданылу мүмкіндігі  $\bar{S}/\sigma$  қатынасы арқылы бағаланған; нәтижесінде Ақсу, Сайрам, Шаян, Болдыбек, Каттабугунь өзендері үшін модель ағынды болжауға жарамды екені анықталды. 2019...2022 жылдар аралығында барлық зерттелген өзендердің HBV

модель параметрлерінің валидациясы жүргізілген. Калибрлеу және валидация нәтижесінде Арал-Сырдария алабының тау өзендері үшін HBV моделін қолдана отырып ағынды модельдеуге және қысқа мерзімді, орта мерзімді су шығынын болжауға арналған параметрлер ұсынылды, Жабағлысу мен Карашик өзендерінің алаптарын қоспағанда.

## RESULTS OF APPLYING THE HBV MODEL FOR STREAMFLOW MODELING OF RIVERS IN THE ARAL-SYRDARYA BASIN

Tursyn Tillakarim<sup>1</sup>\*PhD, Serik Sairov<sup>2</sup> Candidate of Geographical Sciences, associate professor, Nazira Alimzhanova<sup>1</sup>, Mariyam Nurkhan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>RSE «Kazhydromet», Astana, Kazakhstan; tillakarim\_t@meteo.kz, [nazalimzhanova@gmail.com](mailto:nazalimzhanova@gmail.com), nurkhan\_m@meteo.kz

<sup>2</sup> Kazakh Research Institute of Water Economy, Taraz, Kazakhstan; [seriksairov@yandex.kz](mailto:seriksairov@yandex.kz)

\* Corresponding author: Tursyn Tillakarim, tillakarim\_t@meteo.kz

### KEY WORDS

hydrological modeling, model performance, calibration, model validation, Kazakhstan

### About article:

Received: 10.02.2026

Revised: 16.03.2026

Accepted: 19.03.2026

Published: 01.07.2026

### ABSTRACT

This study evaluates the applicability of the HBV model for mountainous rivers in the Aral-Syrdarya Basin. The runoff of mountain rivers with catchment areas ranging from 88 to 1,481 km<sup>2</sup> was simulated. For the period 2000...2016, model parameters were calibrated using the GAP optimization algorithm. Model performance was assessed using several criteria: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Percent Bias (PBIAS), and the ratio of the root mean square error to the standard deviation of observations (RSR). Based on the selection of optimal parameters, model performance was obtained as follows: NSE ranged from 0.56 to 0.94, PBIAS varied between -8.1 and -28.9%, and RSR ranged from 0.02 to 0.13. The calculated model performance indicated that the dynamics of the simulated runoff during the calibration period were well correlated with observed data. In addition to these criteria, the model's applicability as a forecasting tool was assessed using the  $\bar{S}/\sigma$  ratio, which indicated that the model could be used for streamflow prediction in the Aksu, Sairam, Shayan, Boldybrek, and Kattabugun rivers. For the period 2019...2022, HBV model parameters for all studied rivers were validated. As a result of calibration and validation, the calibrated parameters of the HBV model for the mountainous rivers of the Aral-Syrdarya Basin are recommended for use in runoff simulation and prediction, particularly for short- and medium-term water flow forecasts, except for the Zhabaglysu and Karashik river basins.

**Примечание издателя:** заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).