



Моделирование стока горных рек Илейского Алатау с применением модели HBV-light

Тиллакарим Т.^{а,б*}, Серикбай Н.^{а,б}, Сатмурзаев А.^а,
Саиров С.^а

^а РГП «Казгидромет», Научно-исследовательский центр, пр-т Мангилик Ел, 11/1, Астана, 010000, Республика Казахстан

^б Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. Аль-Фараби, 71, Алматы, 050040, Республика Казахстан

АННОТАЦИЯ

В статье проведена оценка возможности применения модели HBV для горных рек Илейского Алатау. На северном склоне Илейского Алатау формируется основная часть водных ресурсов, следовательно, она является одним из значимых объектов в водном балансе и водообеспечении крупных городов - Алматы, Каскелена, Талгара, Есика. Приведено краткое описание модели HBV, указаны входные гидрометеорологические, топографические данные. В работе было выполнено моделирование стока горных рек Илейского Алатау, площадь водосбора которых варьируется в пределах 71-601 км². За периоды с 2000 по 2016 г. была произведена калибровка параметров моделей с использованием алгоритма 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 0,80-0,93, PBIAS колеблется в пределах от -0,78 до -15,33 %, RSR 0,27-0,80. Рассчитанная эффективность модели определила, 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 S/σ , в результате чего выявлено, что модель для рек Каскелен, Талгар, Улькен Алматы, Киши Алматы могут быть применены для прогноза стока. За периоды 2017-2020 гг. была произведена валидация параметров модели HBV всех исследуемых рек, кроме реки Талгар, так как данные наблюдений имеются только за 2020 г. В результате калибровки и валидации модели откалиброванные параметры модели горных рек Илейского Алатау 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 Турген, Проходная и Узын Каргалы.

Подана в редакцию:
15 марта 2023

Принята к публикации:
29 ноября 2023

Доступ онлайн:
17 января 2024

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

гидрологическое моделирование, эффективность модели, калибровка, валидация модели, Илейский Алатау

Для корреспонденции: Тиллакарим Т.А. ✉ tillakarim_t@meteo.kz РГП «Казгидромет», Научно-исследовательский центр, пр-т Мангилик Ел, 11/1, Астана, 010000, Республика Казахстан

1. Введение

Одной из главных задач гидрологии отмечают оценку стока в период весеннего половодья. Прогнозирование речного стока является одной из мер, используемых в управлении водными ресурсами для решения проблем неопределенности климата, а также в управлении водопользованием, в том числе гидроэнергетики, водоснабжения, орошения, судоходства, борьба с наводнениями и охрана окружающей среды, зависящих от количества воды в речных системах (WMO, Carlos E.M. Tucci, 2002).

Сложной областью оперативной гидрологии является прогнозирование стока в период половодья по причине таяния снежного покрова и льда в реках весной; паводков, вызванных сильными осадками и волновыми явлениями в районах вдоль устьев рек (Mercuryeva et al., 2015). Прогнозирование может быть произведено как в краткосрочном (от нескольких часов до нескольких дней), так и в долгосрочном (от нескольких недель до нескольких месяцев) периодах.

Основной целью гидрологического прогнозирования является обеспечение максимально заблаговременного прогноза с достаточной точностью. В таком случае пользователи смогут принять необходимые меры оптимизации для предотвращения либо уменьшения ущерба (Руководство по гидрологической практике, 2012).

Базовым исследовательским и инженерным инструментом современной гидрологии является математическое моделирование процессов формирования речного стока. В широком смысле под термином «математическое моделирование гидрологических систем» можно понимать использование математики для описания характерных особенностей гидрологических систем или процессов. Следовательно, любое использование математического уравнения для определения связей между гидрологическими переменными или для представления временной или пространственной структуры одной переменной можно назвать математическим моделированием (Руководство по гидрологической практике, 2012).

Основной принцип моделирования обусловлен возможностью воспроизводить и прогнозировать поведение сложного объекта или системы с помощью более простой и/или более гибкой модели (Руководство по гидрологической практике, 2012).

Имеется огромное количество моделей стока: от самых простейших до самых сложных (Виноградов, 1988; Кучмент и др., 1990; Федоровский, 1999; Руководство по гидрологической практике, 2012).

В данной работе авторами для моделирования стока использована концептуальная модель HBV-light. Такие концептуальные модели включают

решение систем уравнений, в основу которых положены различные концепции описания физических процессов формирования стока.

Большинство концептуальных моделей используется в оперативном гидрологическом прогнозировании. Модель HBV включена в Гидрологическую оперативную многоцелевую систему (ГОМС) Всемирной метеорологической организации (Руководство по гидрологической практике, 2012).

Целями использования модели HBV являются: заполнение пропусков в рядах данных стока, контроль качества данных, изучение водного баланса, расчет проектных паводков, обеспечение безопасности плотин, исследование последствий изменения стока в водосборном бассейне, а также прогнозирование стока (Seibert, 2005; Belay et al., 2021; Wang et al., 2023).

Модель HBV широко применяется во многих сферах (Руководство по гидрологической практике, 2012): при проектировании водосливов, оценке водных ресурсов, оценке запасов питательных веществ и изучении изменений климата (Wang et al., 2017; Huang et al., 2019), также в оценке изменения стока в сценариях изменения климата (Pervin et al., 2021; Kalashnikova и др., 2023).

На территории Республики Казахстан модель нашла применение в работах отечественных исследователей (Галаева, 2013; Кишкимбаева, Болатова, 2015; Болатова и др., 2018; Болатова и др., 2019) для моделирования и прогнозирования стока горных рек.

Основной целью данной работы является моделирование стока горных рек Илейского Алатау с применением модели HBV-light для дальнейшего использования при прогнозированиях стока рек.

2. Объекты исследования

В данной работе объектами исследования являются семь горных рек северного склона Илейского Алатау (рис. 1, табл. I). Важность данных водных объектов Илейского Алатау заключается в использовании ресурсов речных вод для водообеспечения крупных городов региона (Алматы, Талгара, Каскелена), а также для орошения.

Важную роль в формировании стока рек Илейского Алатау играют как осадки, таяние снега, так и ледники: ярко выраженные времена года, жаркое лето и таяние ледников или весеннее таяние снега постоянно подпитывают реки рассматриваемого региона. Продолжительность весеннего и весенне-летнего половодья зависит от средней высоты, площади, рельефа и особенностей климатических и гидрогеологических условий.

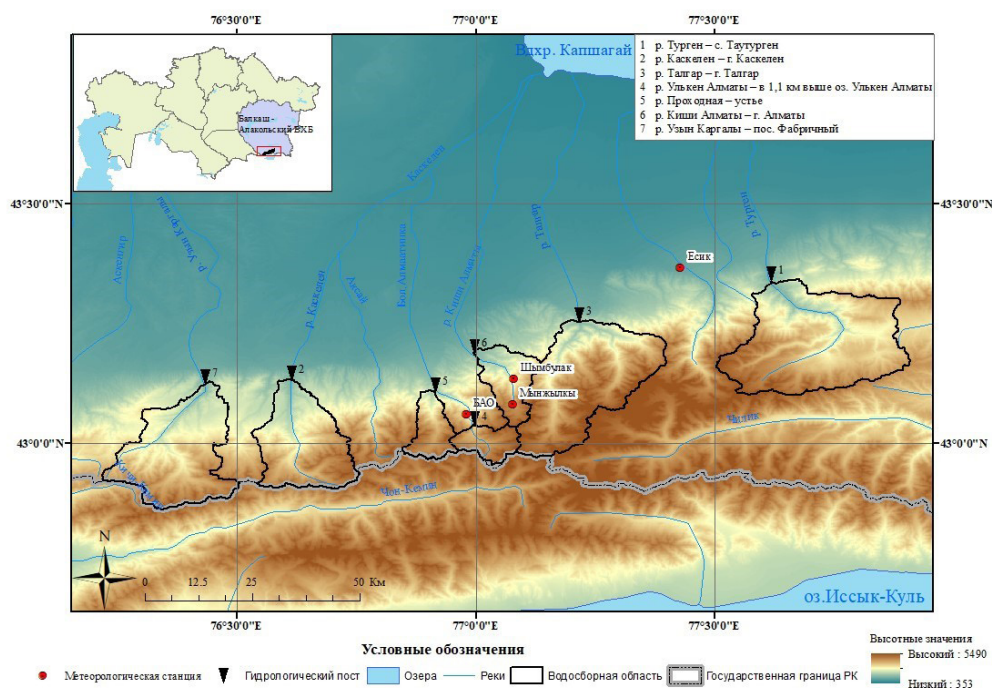


Рис. 1. Местоположение исследуемых речных бассейнов на территории Илейского Алатау

Таблица I. Общие сведения водосборов рек

№	Река-пункт	Площадь F, км ²	Диапазон высот H, м	Расход воды, Q _{ср} , м ³ /с
1	р. Турген - с. Таутурген	601	1228-4150	6,84
2	р. Каскелен - г. Каскелен	294	1219-4010	4,15
3	р. Талгар - г. Талгар	444	1324-4630	10,1
4	р. Улькен Алматы - в 1,1 км выше оз. Улькен Алматы	71.3	1324-4630	2,30
5	р. Проходная - устье	84	1324-4630	1,59
6	р. Киши Алматы - г. Алматы	121	1254-4132	1,86
7	р. Узын Каргалы - пос. Фабричный	386	1266-3951	3,56

Площадь рассматриваемых горных рек варьируется в пределах от 71 км² (р. Улькен Алматы) до 601 км² (р. Турген) (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1970). Диапазон высот горных рек составляет 1219-4630 м. Среднегодовые расходы воды рассматриваемых рек варьируются в пределах 1,59-10,1 м³/с.

3. Материалы и методы исследования

3.1. Описание модели HBV

Концептуальная модель HBV была разработана в Шведском институте гидрологии и метеорологии. Она представляет собой концептуальную модель водосбора, преобразующую осадки, температуру воздуха и потенциальное суммарное испарение либо в снеготаяние, либо в сток или приток в водохранилище (Bergström, 1992).

Во многих странах существуют различные модифицированные версии модели. В данном исследовании применялась версия HBV light 2.0. Модель описывает общий баланс реки следующим образом (1):

$$P - E - Q = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + VL], \quad (1)$$

где P - осадки; E - суммарное испарение; Q - сток; SP - снежный покров; SM - влажность почвы; UZ - верхняя зона подземных вод; LZ - нижняя зона подземных вод и VL - объем озер.

На рис. 2 представлена схематическая структура модели HBV.

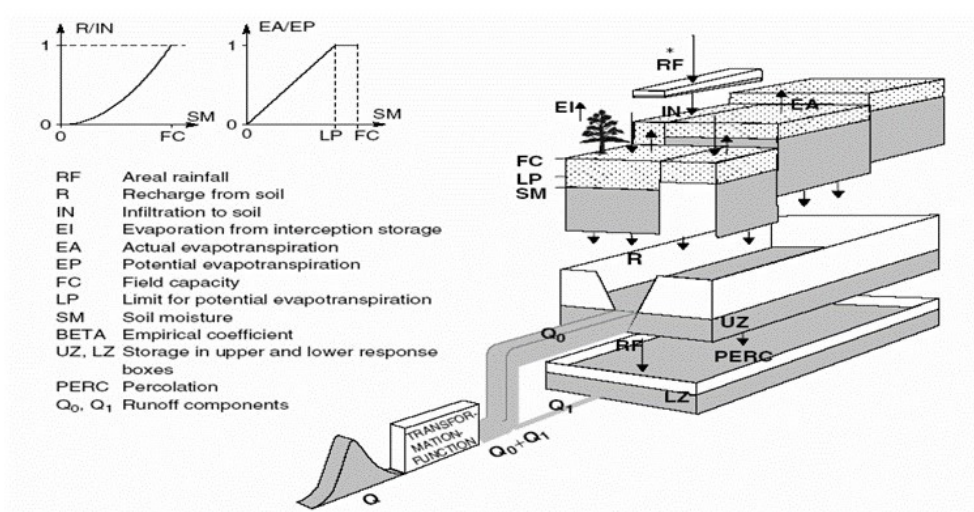


Рис. 2. Схематическая структура модели HBV (Wilk et al., 2001)

Бассейн водосбора разбивается на частные водосборы с высотным районированием. За счет этого модель HBV может быть рассмотрена как модель с полураспределенными параметрами.

3.2. Материалы исследования

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 (Lindström, Bergström, 1992). Но в данной работе для расчета испарения применена формула Н.И. Иванова (2), так как входные данные для расчета испарения по формуле Пенмана отсутствовали.

$$E_o = 0.0018 \cdot (T + 25)^2 \cdot (100 - r), \quad (2)$$

где T - среднемесячная температура; r - среднемесячная относительная влажность воздуха.

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 измерения ледяного покрова суши из космоса (Официальный ресурс базы данных Глобального измерения сухопутного Льда из космоса, 2023).

Для каждого водосбора реки подобраны метеорологические станции, расположенные в районе водосбора реки, а также имеющие хорошую связь между осадками и стоком реки.

3.3. Методики оценки эффективности модели

Модель HBV при оценке соответствия моделированного стока к наблюдаемому использует общепринятый критерий эффективности Нэша-Сатклиффа (NSE) (3) (Nash, Sutcliffe, 1970), называемой в модели Reff (Seibert, 2000):

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \underline{Q_{sim}})^2}, \quad (3)$$

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

Для интерпретации полученных данных используются следующие критерии. Если $R_{eff} > 0,5$, то модель хорошо воспроизводит динамику моделируемой величины.

Когда величина $R_{eff} = 1$, то модельный расчет признается полностью адекватным, в то время как $R_{eff} < 0$ означает, что модель считается несостоятельной.

В данной работе в качестве альтернативной оценки эффективности воспроизведения модели наблюдаемых данных рассчитаны следующие статистические оценки: коэффициент корреляции, процентное системное отклонение (4), стандартный коэффициент отклонения (5) (Morgias et al., 2007):

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right], \quad (4)$$

и стандартный коэффициент отклонения

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]}, \quad (5)$$

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, измеренное на гидрологическом посту.

Процентное систематическое отклонение (PBIAS,%) рассчитывает среднюю тенденцию к увеличению или уменьшению объема смоделированных данных по сравнению с наблюдаемыми данными. Стандартный коэффициент отклонения (RSR) является одним из наиболее часто используемых индексов ошибок, рассчитывается как отношение среднеквадратической ошибки (RMSE) и стандартного отклонения наблюдаемых данных. Оценка эффективности производится по критериям, приведенным в табл. II.

Таблица II. Общие оценки эффективности рекомендуемых статистических данных за месячный период (Morgias et al., 2007; Наставление по службе прогнозов, 1962)

Рейтинг производительности	RSR	NSE	PBIAS, %	\bar{S}/σ
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	

В работе Борщ и др. (2020) произведен анализ различных показателей эффективности моделей формирования речного стока и методик прогнозирования его характеристик. Согласно результатам выявлено, что показатель эффективности моделей Нэша-Сатклиффа не в полной мере учитывает специфику последующего использования моделей в целях оперативного гидрологического прогнозирования.

В связи с этим возникла необходимость оценки применимости выбранных параметров модели в качестве методики прогнозирования стока рассматриваемых рек. Для оценки применимости методики для прогнозирования рассчитан критерий качества методики согласно Наставлению по службе прогнозов (1962). За критерий применимости и качества прогнозов принято отношение \bar{S}/σ (6):

$$\bar{S}/\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Y - Y_i)^2}{n-m}} / \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Методика прогноза считается применимой для выпуска оперативных прогнозов при следующих отношениях (7):

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

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

3.4. 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 (WMO, 2012).

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 (Seibert, 2005), 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 работе использован метод автоматической калибровки, разработанный Лингстрёмом (Lindström, 1997), который позволяет использовать различные критерии; при необходимости выбранные параметры изменялись вручную.

4. Результаты

В данной работе выполнено моделирование стока 7 рек Илейского Алатау за периоды 2000-2016 гг., так как в последние два десятилетия изменения климата в регионе Центральной Азии проявляются отчетливо (Chen et al., 2017).

Процедура поиска оптимального набора параметров в этом исследовании выполнялась с помощью методов автоматической оптимизации GAP optimization, применяемых к наилучшей целевой функции, которая генерирует случайные значения параметров в пределах заранее определенного диапазона параметров модели для идентификации чувствительных параметров.

Для каждого бассейна в определенный период калибровки выполнены 10 000 генераций подбора калибровочных величин. Максимальные и минимальные значения параметров модели заданы согласно рекомендациям (Seibert, 2005). По этим же рекомендациям при моделировании стока рек период калибровки составлял от 4 до 6 лет (табл. III).

Таблица III. Основные сведения о калибровке, валидации модели

№	Река - пункт	Период калибровки, гг.	Период валидации, гг.	Метеостанции (МС)	Средняя высота МС, м н.у.м.
1	р. Турген - с. Таутурген	2008-2013	2017-2020	Ассы, Есик	1581
2	р. Каскелен - г. Каскелен	2012-2016	2017-2020	Мынжылкы, Шымбулак	2605
3	р. Талгар - г. Талгар	2008-2013	2020	Мынжылкы	3017
4	р. Улькен Алматы - в 1,1 км выше оз. Улькен Алматы	2008-2012	2017-2020	Мынжылкы, озеро Улькен Алматы	2767
5	р. Проходная - устье	2002-2007	2017-2020	Мынжылкы	3017
6	р. Киши Алматы - г. Алматы	2010-2014	2017-2020	Мынжылкы, Шымбулак	2605
7	р. Узын Каргалы - пос. Фабричный	2013-2016	2017-2020	Мынжылкы	3017

В связи с ограниченным количеством метеорологических станций на рассматриваемой высокогорной территории для моделирования стока рек в

основном использовались данные следующих станций: Ассы, Есик, Мынжылкы, Шымбулак и оз. Улькен Алматы. Лишь в бассейне р. Киши Алматы расположены метеостанции Шымбулак и Мынжылкы. В связи с этим калибровка модели для остальных рассматриваемых рек производилась с использованием имеющихся метеорологических станций на территории северного склона Илейского Алатау. Таким образом, были подобраны наилучшие параметры для каждого речного бассейна за период 2000-2016 гг. (табл. IV).

В ходе калибровки параметров модели соответствующие значения параметров подбирались до тех пор, пока не были получены наилучшие связи смоделированных данных с наблюдаемыми.

Модель включает в себя подпрограммы метеорологической интерполяции, расчета накопления снега и снеготаяния, суммарного испарения, влажности почвы, обобщения стока для расчета трансформации движения воды по рекам.

Режим снеготаяния в модели основан на концепции градусо-дня, основанной на температуре воздуха. К параметрам снежного покрова относятся пороговая температура (ТТ), фактор градусо-дня (CFMAX) и поправочный коэффициент (SFCF).

Для рек, стекающих с северных склонов Илейского Алатау, наиболее существенную роль играет ледниковая составляющая в годовом стоке водотоков (на р. Талгар более 40 % годового). Наибольшей снежностью характеризуются бассейны рр. Киши Алматы, Талгар и Улькен Алматы (Амиргалиева, 2021).

В связи с этим калибровка режима снеготаяния в весенний период и таяния ледников в летний период играет важную роль в формировании стока (рис. 3).

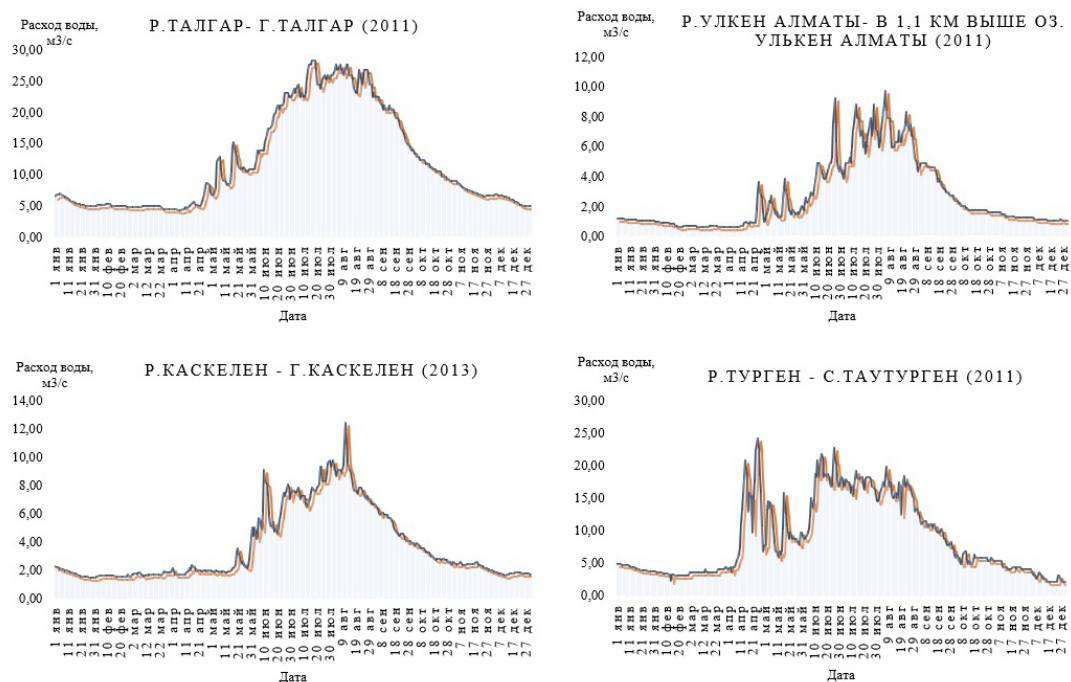


Рис. 3. Гидрограф стока рек Илейского Алатау

Пороговая температура, в зависимости от которой осадки преобразуются либо в твердые осадки (фактическая температура ниже порогового значения), либо в жидкие осадки, в рассматриваемых бассейнах колеблется в пределах от -1,3 до +2,4 °С.

Таблица IV. Параметры модели, сгенерированные в результате калибровки

Водный объект	Снег					Почва и испарение			Грунтовые воды			
	TT	CFMAX	SFCF	CWH	CFR	FC	LP	Beta	K1	K2	PERC	MAXBAS
р. Турген - с. Таутурген	0,4	9,2	0,6	7,1	2,0	84,3	0,4	5,4	0,1	0,0	3,2	1,1
р. Каскелен - г. Каскелен	2,4	3,3	0,7	2,3	0,2	450,4	0,6	3,7	0,1	3,2	4,0	1,0
р. Талгар - г. Талгар	-0,2	7,6	0,5	9,9	5,5	313,0	0,3	5,6	0,1	5,9	3,6	1,0
р. Улькен Алматы - в 1,1 км выше оз. Улькен Алматы	1,9	7,1	0,6	7,8	1,2	496,4	0,4	1,3	5,6	2,7	2,2	1,1
р. Проходная - устье	1,6	10,0	0,7	0,1	8,5	354,2	0,6	2,0	5,7	2,2	2,2	1,1
р. Киши Алматы - г. Алматы	0,2	6,9	0,5	5,3	9,8	500,0	0,3	3,5	0,3	5,6	3,9	1,2
р. Узун Каргалы - пос. Фабричный	-1,3	9,5	0,7	6,0	0,1	321,3	0,4	2,8	8,4	2,5	2,6	1,1

Все осадки, формирующие снег, умножаются на поправочный коэффициент снегопада SFCF, который составил 0,50-0,74. Талая вода и осадки сохраняются в снежном покрове до превышения доли водного эквивалента снега (CWH). Затем при переходе фактической температуры от пороговой температуры (TT) в положительную сторону начинается процесс снеготаяния. В рассматриваемых бассейнах рек в результате расчета модели ежедневное количество растаявшего снежного покрова или льда CFMAX составляет 6,9-10,0 мм, за исключением бассейна р. Каскелен, где по расчетам модели ежедневно стаивает 3,3 мм.

Основной частью контроля образования стока является процедура учета влажности почвы. Максимальная влагоемкость почвы (FC), рассчитанная по модели, колеблется в пределах 313-500 мм, за исключением бассейна р. Турген, где FC составляет 84,3 мм.

После распределения влаги на различные зоны накопления через просачивание стока начинается процесс преобразования стока, который осуществляется функцией параметра MAXBAS. Данная функция перераспределяет сток на поверхность бассейна в заданном интервале времени. Согласно расчетам модели, трансформация стока в рассматриваемых бассейнах происходит в течение 1,0-1,2 суток.

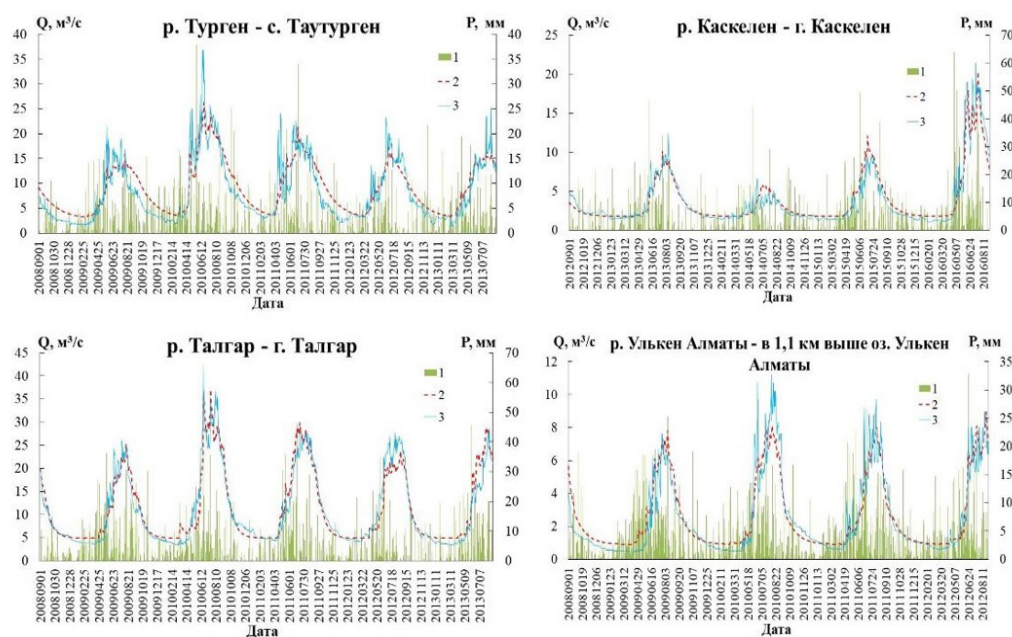
В период калибровки эффективность модели, рассчитанная по критерию NSE, для рассматриваемых рек составила 0,80-0,93, что указывает на хорошую воспроизводимость моделью наблюдаемый расход воды. Стандартный коэффициент отклонения варьируется в пределах 0,27-0,80. Для р. Проходная расчеты стандартного коэффициента отклонения (0,80) показали «неудовлетворительный» результат оценки эффективности модели. Процентное системное отклонение (PBIAS) по результатам расчетов варьируется от -0,78 до -9,27 %, что также соответствует «очень хорошему» результату, однако для р. Проходная (-15,33 %) данный показатель указывает на «удовлетворительный» результат, что связано с завышением смоделированного стока в зимний период межени (рис. 4). Также модель указывает на точное моделирование стока р. Киши Алматы, согласно результатам PBIAS = -0,78 %, который очень близок к оптимальному значению. Результаты процентного системного отклонения (PBIAS) указывают на погрешность переоценки модели наблюдаемого стока для всех рассматриваемых речных бассейнов. В основном переоценка стока происходит в осенне-зимний период межени (см. рис. 4).

Если анализировать основные характеристики стока весеннего половодья рек исследуемых бассейнов, то можно сделать вывод, что характерные даты весеннего половодья: дата начала половодья, дата пика половодья, дата окончания половодья и продолжительность хорошо согласуются с датами фактических наблюдений.

При оценке применимости и качества методики прогнозов выявлено, что калибровочные параметры не соответствуют критериям качества для рр. Турген и Проходная, где отношения \bar{S}/σ больше 0,80 (табл. V). Следует полагать, что для остальных рек модель HBV с подобранными калибровочными параметрами можно применять при прогнозировании стока в период весеннего половодья.

Таблица V. Сведения о результатах эффективности модели за периоды калибровки и валидации горных рек Илейского Алатау

№	Река-пункт	Эффективность модели						
		Период калибровки				Период валидации		
		NSE	RSR	PBIAS	\bar{S}/σ	NSE	RSR	PBIAS
1	р. Турген - с. Таутурген	0,82	0,42	-9,27	1,11	-0,70	1,44	-98,62
2	р. Каскелен - г. Каскелен	0,93	0,27	-3,52	0,26	0,71	0,54	20,78
3	р. Талгар - г. Талгар	0,92	0,28	-1,58	0,62	0,71	0,54	24,92
4	р. Улькен Алматы - в 1,1 км выше оз. Улькен Алматы	0,89	0,33	-4,68	0,26	0,82	0,43	-18,02
5	р. Проходная - устье	0,89	0,80	-15,33	0,82	0,54	0,68	-19,78
6	р. Киши Алматы - г. Алматы	0,88	0,34	-0,78	0,12	0,58	0,65	5,39
7	р. Узун Каргалы - пос. Фабричный	0,80	0,45	-4,40	0,47	-0,66	1,04	-48,21



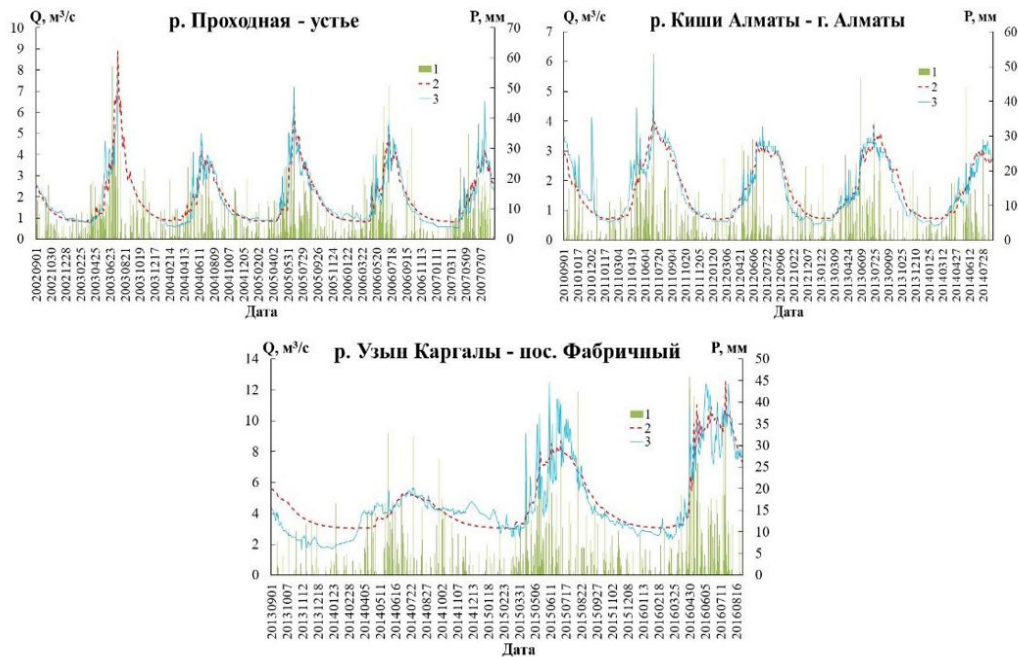
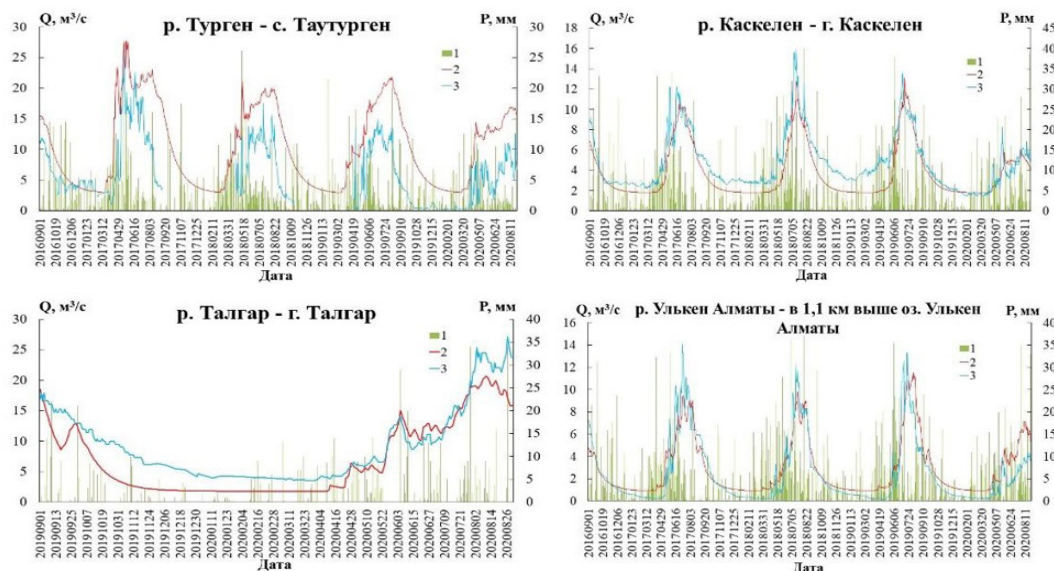


Рис. 4. Результаты калибровки горных рек Илейского Алатау.

1 - сумма атмосферных осадков, мм; 2 - смоделированный сток, м³/с; 3 - наблюдаемый сток, м³/с.

Проанализировав результаты расчетов показателей эффективности модели, мы выявили, что для рр. Турген и Узын Каргалы все показатели соответствуют «неудовлетворительному» критерию оценки (табл. 5).

В целях проверки воспроизводимости наблюдаемых расходов воды модели НВУ по выбранным параметрам проведен процесс валидации на независимом периоде 2017-2020 гг. (рис. 5), за исключением гидропоста р. Талгар - г. Талгар, так как данные наблюдений имеются только за 2020 г.



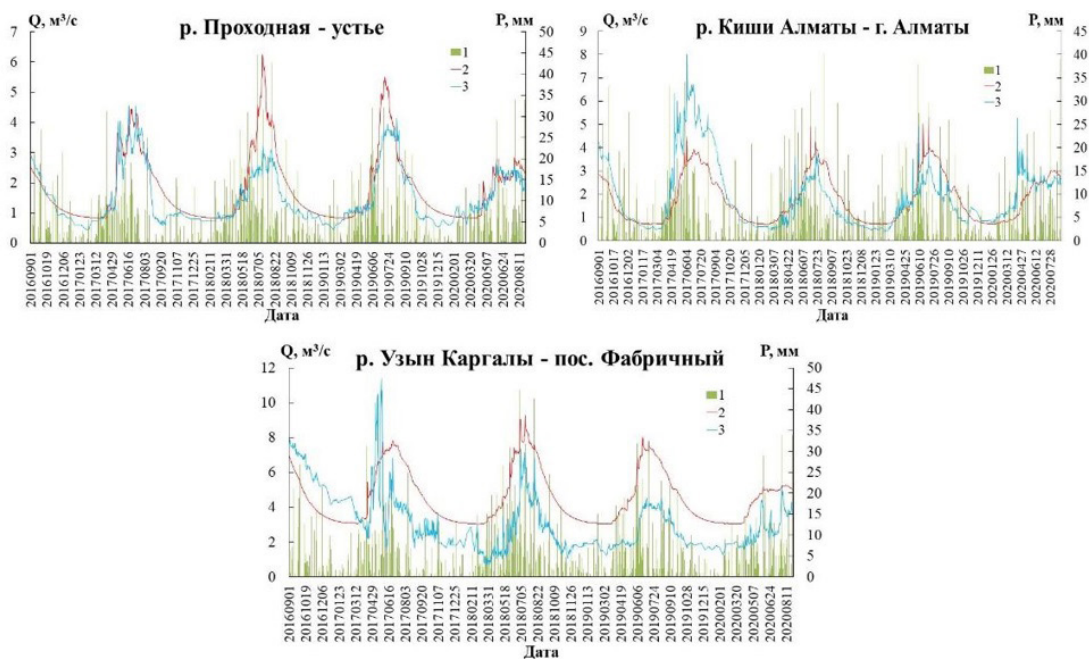


Рис. 5. Результаты валидации горных рек Илейского Алатау. 1 - сумма атмосферных осадков, мм; 2 - смоделированный сток, м³/с; 3 - наблюдаемый сток, м³/с.

Для рр. Проходная и Киши Алматы критерий NSE (0,54/0,58), RSR (0,68/0,65) соответствуют «удовлетворительной» оценке эффективности. В данном случае «неудовлетворительный» результат воспроизведения стока может быть результатом хозяйственной деятельности выше гидрологических постов. Для остальных рр. Каскелен, Талгар и Улькен Алматы полученные результаты соответствуют «хорошей» и «удовлетворительной» критериям оценки.

Закключение

Авторами проведена работа по адаптации гидрологической модели HBV для 7 горных рек Илейского Алатау. Для каждой из исследуемых горных рек проведен процесс калибровки параметров за период 2000-2016 гг. Результаты эффективности модели HBV для горных рек Илейского Алатау показали, что модель хорошо воспроизводит динамику моделируемого стока, рассчитанную по критерию NSE, который варьируется в пределах (0,80-0,93). Результаты показали, что критерий NSE вполне подходит для оценки качества модели, однако не совсем подходит для оценки эффективности применения данной модели в качестве методики прогнозирования. Расчеты критерия применимости и качества методики прогнозирования (\bar{S}/σ) продемонстрировали, что модель

НВУ может быть использована для прогнозирования стока рр. Каскелен, Талгар, Улькен Алматы.

За период 2017-2020 гг. проведена валидация параметров модели. Исключением можно считать гидропост р. Талгар - г. Талгар, поскольку данные о расходах воды имеются только за 2020 г. и проводилась валидация параметров модели за этот год. По результатам валидации хорошую эффективность модель показывает на рр. Каскелен, Талгар, Улькен Алматы.

Таким образом, можно сделать вывод, что концептуальная модель HBV-light применима для моделирования стока горных рек Илейского Алатау, и откалиброванные параметры модели могут быть рекомендованы к применению при прогнозировании, а именно при составлении краткосрочных, среднесрочных прогнозов расхода воды, за исключением бассейнов рек Турген, Проходная и Узын Каргалы.

Список литературы

- Амиргалиева, А.С. (2021). *Оценка изменения водных ресурсов и перспективы прогноза водности основных рек Иле-Балкашского бассейна в условиях современного потепления климата* [диссертация на соискание ученой степени доктора философии (PhD)]. Алматы, 140.
- Болатова, А.А., Тиллакарим, Т.А., Раимжанова, М.Н., Серикбай, Н.Т., Багитова, Б.Е., Болатов, К.М. (2018). Результаты калибрования гидрологической модели HBV для горных рек Казахстана. *Гидрометеорология и экология*, 3 (90), 110-124.
- Болатова, А.А., Тиллакарим, Т.А., Раимжанова, М.Н. (2019). Применение гидрологической модели HBV для прогнозирования стока рек на примере бокового притока воды в Шульбинское водохранилище. *Гидрометеорология и экология*, 3 (94), 26-43.
- Борщ, С.В., Симонов, Ю.А., Христофоров, А.В. (2020). Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 1 (375), 176-189.
- Виноградов, Ю.Б. (1988). Математическое моделирование процессов формирования стока. Ленинград: Гидрометеоиздат.
- Галаева, А.В. (2013). О возможности применения модели HBV для моделирования стока рек Или и Иртыш. *Гидрометеорология и экология*, 2(69), 108-114.
- Кишкимбаева, А.А., Болатова, А.А. (2015). Применение модели HBV-light для моделирования стока реки Шарын. *Гидрометеорология и экология*, 4 (79), 141-144.
- Кучмент, Л.С., Мотовилов, Ю.Г., Назаров, Н.А. (1990). Чувствительность гидрологических систем: влияние антропогенных изменений речных бассейнов и климата на гидрологический цикл. Москва: Наука.
- Наставление по службе прогнозов (1962). Раздел 3. Служба гидрологических прогнозов. Часть 1. *Прогнозы режима вод суши*. Л.: Гидрометеоиздат.
- Официальный сайт GLIMS: глобальные измерения ледяного покрова суши из космоса. <https://www.glims.org/>
- Ресурсы поверхностных вод СССР. *Центральный и Южный Казахстан* (1970). Том 13, Выпуск 2. Бассейн оз. Балхаш. Ленинград: Гидрометеоиздат, 35-40.
- Руководство по гидрологической практике (2012). *Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов* (ВМО-№ 168, 6 изд.), Т. 2. Женева: Всемирная метеорологическая организация.

- Федоровский, А.С. (1999). Региональная адаптация моделей круговорота воды [автореф. ... дисс. д-ра геогр. наук]. Владивосток, 36 с.
- Belay, B., Bizuneh, Mamaru, A., Moges, Berhanu, G., Sinshaw, Mulu, S., Kerebih. (2021). SWAT and HBV models' response to streamflow estimation in the upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Water-Energy Nexus*, 4, 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.03.001>
- Bergström, S. (1992). The HBV-Model - Its Structure and Applications. *SMHI Reports Hydrology*, 4, 36.
- Chen, Y., Li, W., Fang, G., and Li, Z. (2017). Hydrological modeling in glacierized catchments of central Asia - status and challenges. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 669-684. <https://doi.org/10.5194/hess-21-669-2017>
- Huang, S., Eisner, S., Magnusson, J.O., Lussana, Ch., Yang, X., Beldring, S. (2019). Improvements of the spatially distributed hydrological modelling using the HBV model at 1 km resolution for Norway. *Journal of Hydrology*, 577, 123585. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.051>
- Kalashnikova, O., Niyazov, J., Nurbatsina, A., Kodirov, S., Radchenko, Yu., Kretova, Z. (2023). Kyrgyz transboundary rivers' runoff assessment (Syr-darya and Amu-darya river basins) in climate change scenarios. *Central Asian Journal of Water Research*, 9(1), 59-88. <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2023-R1.v9-1/59-88.eng>
- Lindström, G., Bergström, S. (1992). Improving the HBV and PULSE-models by use of temperature anomalies. *Vannet i Norden*, 25 (1), 16-23.
- Merkuryeva, G., Merkuryev, Y., Boris V. Sokolov, Potryasaev, S., Viacheslav A. Zelentsov, Lektauers, A. (2015). Advanced river flood monitoring, modelling and forecasting. *Journal of Computational Sciences*, 10, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2014.10.004>
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. DOI:<https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Pervin, L., Gan, T.Y., Scheepers, H., Islam, S. (2021). Application of the HBV model for the future projections of water levels using dynamically downscaled global climate model data. *Journal of Water and Climate Change*. 12 (6), 2364-2377. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.302>
- Seibert, J. (2005). HBV light version 2. User`s manual. Stockholm University, Department of Physical Geography and Quaternary Geology. P. 32.
- Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2), 215-217. <https://doi.org/10.5194/hess-4-215-2000>
- Wang, G., Zhang, J., He, R., Liu, C., Ma, T., Bao, Z. & Liu, Y. (2017). Runoff sensitivity to climate change for hydro-climatically different catchments in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31 (4), 1011-1021.
- Wang, Yueyang, Wang, Yanjun, Wang, Yan, Li, Ch., Ju, Q., Jin, J., Deng, X., Sun, G., Bao, Z. (2023). Applicability of the HBV model to a human-influenced catchment in northern China. *Hydrology Research*. 54 (2), 208-219. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2023.092>
- Wilk, J., Andersson, L. and Plermkamon, V. (2001). Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in a large river basin in northeast Thailand. *Hydrological Processes*, 15, 2729-2748.
- WMO, Carlos E.M. Tucci (2002). Flood flow forecasting. Institute of Hydraulic Research, Federal University of Rio Grande do Sul, 35 p.

HBV-MODELING OF THE ILE ALATAU MOUNTAIN RIVER FLOW

Tillakarim T.^{a,b*} , Serikbay N.^{a,b} , Satmurzayev A.^a ,
Sairov S.^a 

^a RSE «Kazhydromet», Research center, 11/1 Mangilik El avenue, Astana, 020000, Republic of Kazakhstan

^b Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi avenue, Almaty, 050040, Republic of Kazakhstan

Corresponding author: tillakarim_t@meteo.kz

<https://doi.org/10.29258/CAJWR/2024-R1.v10-1/1-20.rus>

ABSTRACT

The research aimed to evaluate the possibility of applying the HBV model for assessing the flow of the Ile Alatau Mountain Range rivers. The main part of the corresponding water resources forms on the northern slopes of the Ile Alatau making them a significant water balance and water supply factor for the major cities of Almaty, Kaskelen, Talgar, and Yesik. The article includes a brief description of the HBV model, as well as hydrometeorological and topographical inputs, and continues with the description of the flow simulation outputs for the rivers with the catchment area varying between 71-601 km². For the periods of 2000-2016, the model parameters were calibrated using the GAP optimization algorithm. The model's performance was evaluated based on several criteria: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Percent bias (PBIAS), and Root Mean Standard Deviation Ratio (RSR). The selection of optimal parameters allowed obtaining the following model efficiency values: 0.80-0.93 (as per NSE), -0.78 to -15.33% (as per PBIAS), and 0.27-0.80 (as per RSR). The calculated model efficiencies point to the sufficient correlation between the dynamics of the observed and simulated runoffs during the calibration period. The study likewise included the assessment of the HBV model applicability as a forecasting technique based on the S/σ ratio. The outcomes of that exercise confirmed the facility of using the model for predicting the runoff of the Kaskelen, Talgar, Ulken Almaty, and Kishi Almaty Rivers. Due to the fact that the observation data were available only for 2020, the HBV model parameters of all the studied rivers, except the Talgar River, underwent validation for the periods of 2017-2020. The calibrated and validated parameters of the obtained Ile Alatau Mountain River Model can be recommended for runoff modeling based on the HBV-light model as well as for runoff forecasting, namely for short- and medium-term water flow forecasts, with the exception of the Turgen, Prokhodnaya and Uzyn Kargaly River Basins.

ARTICLE HISTORY

Received: March 15, 2023

Accepted: November 29, 2023

Published: January 17, 2024

KEYWORDS

hydrological modeling,
efficiency of model,
calibration, validation, Ile
Alatau

References

- Amirgalieva, A.S. (2021). Otsenka izmeneniia vodnykh resursov i perspektivy prognoza vodnosti osnovnykh rek Ile-Balkashskogo basseina v usloviakh sovremennogo potepleniia klimata [Assessment of changes in water resources and prospects for water forecasts of the main rivers of the Ile-Balkash basin in the context of modern warming]. Dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni doktora filosofii (PhD), Almaty, 140 (In Russian).
- Bolatova, A.A., Tillakarim, T.A., Raimzhanova, M.N. i dr. (2018). Rezul'taty kalibrovaniia gidrologicheskoi modeli HBV dlja gornyh rek Kazahstana [Results of calibration of HBV hydrological model for the Kazakhstan mountain rivers]. *Gidrometeorologija i jekologija*, 3 (90), 110-124 (In Russian).
- Bolatova, A.A., Tillakarim, T.A., Raimzhanova, M.N. (2019). Primenenie gidrologicheskoi modeli HBV dlja prognozirovaniia stoka rek na primere bokovogo pritoka vody v Shul'binskoe vodohranilishhe [Using hydrological model HBV for forecasting river discharge on the example of the lateral water flow to the Shulbi reservoir]. *Gidrometeorologija i jekologija*, 3 (94), 26-43 (In Russian).
- Borshch, S.V., Simonov, YU.A., Hristoforov, A.V. (2020). Effektivnost' modelirovaniia i prognozirovaniia rechnogo stoka [Efficiency of river flow modelling and forecasting]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniia i prognozy*. № 1 (375). 176-189 (In Russian).
- Vinogradov, Ju. B. (1988). Matematicheskoe modelirovanie processov formirovaniia stoka [Mathematical modeling of runoff formation processes]. Leningrad: Gidrometeoizdat (In Russian).
- Galaeva, A.V. (2013). O vozmozhnosti primeneniia modeli HBV dlja modelirovaniia stoka rek ili i Irtysh [About the possibility of using the HBV model for modeling the flow of the Ili and Irtysh rivers]. *Gidrometeorologija i jekologija*, 2 (69), 108-114 (In Russian).
- Kishkimbaeva, A.A., Bolatova, A.A. (2015). Primenenie modeli HBV-light dlja modelirovaniia stoka reki Sharyn [Application of the HBV-light model for modeling the flow of the Sharyn River]. *Gidrometeorologija i jekologija*, 4(79), 141-144 (In Russian).
- Kuchment, L.S., Motovilov, Ju.G., Nazarov, N.A. (1990). Chuvstvitel'nost' gidrologicheskikh sistem: vliianie antropogennykh izmenenij bassejnov i klimata na gidrologicheskij cikel [Sensitivity of hydrological systems: the impact of anthropogenic changes in basins and climate on the hydrological cycle]. Moskva: Nauka (In Russian).
- Nastavlenie po sluzhbe prognozov (1962). [Forecast Service Manual]. Razdel 3 Sluzhba gidrologicheskikh prognozov. CHast' 1 *Prognozy rezhima vod sushi*, L.: Gidrometeoizdat, 1962, 193 s. (In Russian).
- Resursy poverhnostnykh vod SSSR. Central'nyj i Juzhnyj Kazahstan. (1970) [USSR surface water resources. Central and Southern Kazakhstan]. Tom 13, Vypusk 2. *Bassejn oz. Balhash*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970, 35-40 s (In Russian).
- Fedorovskij A.S. (1999). Regional'naja adaptacija modelej krugovorota vody [Regional adaptation of water cycle models]. Dissertacija, Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj universitet. 24 s (In Russian).
- Belay, B. Bizuneh, Mamaru, A. Moges, Berhanu, G. Sinshaw, Mulu, S. Kerebih. (2021). SWAT and HBV models' response to streamflow estimation in the upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Water-Energy Nexus*, Volume 4, 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.03.001>
- Bergström, S. (1992). The HBV model - its structure and applications. *SMHI Reports Hydrology*, 4, 36.
- Chen, Y., Li, W., Fang, G., and Li, Z. (2017). Hydrological modeling in glacierized catchments of central Asia - status and challenges. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 669-684. <https://doi.org/10.5194/hess-21-669-2017>
- Huang S., Eisner S., Magnusson J.O., Lussana Ch., Yang X., Beldring S. (2019). Improvements of the spatially distributed hydrological modelling using the HBV model at 1 km resolution. *Norway Journal of Hydrology*, Volume 577, 123585, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.051>
- Kalashnikova, O., Niyazov, J., Nurbatsina, A., Kodirov, S., Radchenko, Yu., Kretova, Z., (2023). Kyrgyz transboundary rivers' runoff assessment (Syr-darya and Amu-darya river basins) in climate change scenarios. *Central Asian Journal of Water Research*, 9 (1), 59-88. <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2023-R1.v9-1/59-88.eng>

- Lindström, G., Bergström, S. (1992). Improving the HBV and PULSE-models by use of temperature anomalies. *Vannet i Norden*, 25(1), 16-23.
- Merkuryeva, G., Merkuryev, Y., Boris V. Sokolov, Potryasaev, S., Viacheslav A. Zelentsov, Lektavers, A. (2015). Advanced river flood monitoring, modelling and forecasting. *Journal of Computational Sciences*, 10, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2014.10.004>
- Moriasi, M., D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Pervin, L., Gan, T.Y., Scheepers, H., Islam, S. (2021). Application of the HBV model for the future projections of water levels using dynamically downscaled global climate model data. *Journal of Water and Climate Change*. 12 (6): 2364-2377. doi: <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.302>
- Seibert, J. (2005). HBV light version 2. User`s manual. Stockholm University, Department of Physical Geography and Quaternary Geology. P.32.
- Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2), 215-217. <https://doi.org/10.5194/hess-4-215-2000>
- Wang, G., Zhang, J., He, R., Liu, C., Ma, T., Bao, Z. & Liu, Y. (2017). Runoff sensitivity to climate change for hydro-climatically different catchments in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31 (4), 1011-1021.
- Wang, Yueyang, Wang, Yanjun, Wang, Yan, Li, Ch., Ju, Q., Jin, J., Deng, X., Sun, Zhenxin Bao Gaoxia. (2023). Applicability of the HBV model to a human-influenced catchment in northern China. *Hydrology Research*, 54 (2): 208-219. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2023.092>
- Wilk, J., Andersson, L. and Plermkamon, V. (2001). Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in a large river basin in northeast Thailand. *Hydrological Processes*, 15, 2729-2748.
- WMO, Carlos E.M. Tucci (2002). Flood flow forecasting. Institute of Hydraulic Research, *Federal University of Rio Grande do Sul*, 35 p.
- WMO. (2012). Rukovodstvo po gidrologicheskoj praktike [Hydrological Practice Guide]. Tom 2. Upravlenie vodnymi resursami i praktika primenenija gidrologicheskikh metodov (VMO-№ 168, Shestoe izdanie). *Zheneva: Vsemirnaja meteorologicheskaja organizacija*, 320 s (In Russian).
- Ofitsialnyi resurs bazy dannykh Globalnogo izmereniia sukhoputnogo lda iz kosmosa [Official resource of the Global Land Ice Measurement Database from Space], <https://www.glims.org/>