

УДК 556.3.013;556.3.072

А.А. Болатова¹
Т.А. Тілләкәрім¹
М.Н. Раимжанова¹
Н.Т. Серікбай¹
Б.Е. Багитова¹
К.М. Болатов¹

РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ HBV ДЛЯ ГОРНЫХ РЕК КАЗАХСТАНА

Ключевые слова: параметры модели, ГИС, цифровая модель рельефа, сток весеннего половодья, моделирование

В статье приводится краткое описание модели HBV-light и её основных параметров. Даны этапы предварительной работы с цифровой моделью рельефа и результаты автоматического калибрования для 15 горных водосборов Казахстана.

В настоящее время в гидрологии наиболее важной задачей является оценка режима паводков и наводнений. Овладение методологическим аппаратом новейшего направления и технологиями, позволяют использовать гидрологические модели во всех речных бассейнах, в том числе в неизученных. Также одной из важнейших задач является перспективный прогноз изменений гидрологического режима при ожидаемых изменениях климата и ландшафтов. Математическое моделирование процессов формирования речного стока есть базовый исследовательский и инженерный инструмент современной гидрологии. Количество различных моделей стока исчисляется многими десятками – от простейших до самых сложных [1, 3, 7].

Объекты исследования. В данной работе исследуются горные реки южного, юго-восточного и восточного Казахстана, последние из которых по геологическому строению относятся к молодым рекам, проходящим раннюю стадию своего развития. Горные районы Казахстана отличаются густотой речной сети, так как в горах Алтая, Жетысуйского Алатау и Тянь-Шаня выпадают обильные осадки.

Рассматриваемым рекам характерны весенние и весенне-летние половодья, продолжительность которых зависит от средней высоты, пло-

¹ КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

щади водосбора, рельефа, а также от климатических и различных гидро-геологических условий.

Река Шарын – крупнейший приток р. Или. В верхнем течении носит название Чалкудысу, а в среднем Кегень. Площадь бассейна реки (F) 7720 км², длина (L) 427 км.

Река Шелек – второй по величине приток р. Или. Она образуется от слияния рек Жангырык, юго-восточный Талгар и Южный Иссук, берущих начало на высотах 3300...3500 м от ледников Жангырык, Богатырь, Корженевского на хребтах Заилийского и Кунгей-Алатау. Длина реки 245 км, площадь бассейна 4980 км².

Река Осек ($F = 1970$ км², $L = 164$ км) образуется при слияния рек Малого и Большого Осека и после слияния выходит на предгорную равнину, где образует обширное болото Омба. Выйдя из болота, река течет в западном направлении и впадает в р. Иле.

Река Коксу – приток р. Каратал – берет начало у основания ледниковых морен на высоте около 3500 м. По площади водосбора (4670 км²) и протяженности (205 км) она больше р. Каратал.

Река Лепсы в бассейне оз. Балхаш занимает по водности третье место. Её длина 417 км, площадь водосбора 8110 км². Истоки р. Лепсы находятся на высоте более 3000 м – в области ледников северного склона хребта Жетысуйского Алатау. С северных склонов Жетысуйского Алатау в сторону оз. Балхаш текут реки Сарканд, Баскан, Биен, Кызылагаш и ряд более мелких водотоков. *Река Баскан* – горный водоток с истоками в ледниках и снежинках. *Река Емель* берет начало на высотах около 3000 м, на склонах хребтов Тарбагатай и Уркашар, за пределами Казахстана. Площадь ее водосбора 21 800 км². На территории Казахстана река пересекает песчаную равнину и впадает в оз. Алаколь [6].

Реки Восточного Казахстана относятся к бассейну Карского моря. Гидрографическое строение речной сети Верхнего Иртыша обусловлено сложным рельефом и разнообразными климатическими условиями. Основной фазой этих бассейнов является половодье, в период которого осуществляется большая часть годового стока, наблюдаются максимальные расходы и наибольшие уровни воды [4].

Река Улькен Бокен – одна из крупных левобережных притоков Иртыша, впадающая в Бухтарминское водохранилище. Истоки реки располагаются на южных склонах хр. Калба, северо-восточнее гор Байбура, на

высотах 1400...1500 м. Длина реки 161 км, площадь водосбора 3390 км². Средний многолетний расход воды составляет 7,82 м³/с.

Река Буктырма берет начало из небольшого озера на склоне Южного Алтая и до впадения в Бухтарминское водохранилище принимает ряд притоков – Ак Берель, Черновая, Сарымсакты, Белая, Черемошка, Хамир, Березовка. Длина реки 336 км, площадь водосбора 12 660 км². Средний многолетний расход воды составляет 218 м³/с.

Река Ульби образуется слиянием рек Тихая ($F = 681$ км², $L = 25$ км) и Громотуха ($F = 451$ км², $L = 34$ км), которые берут начало в Ивановском и Убинском хребтах (Рудный Алтай). В районе г. Усть-Каменогорска Ульби впадает в р. Иртыш (Ертыс), являясь ее правым притоком. Длина реки 100 км, площадь водосбора 4990 км². Среднемноголетний расход воды составляет 96,8 м³/с.

Река Оба – одна из самых полноводных правобережных притоков р. Ертыс, образуется от слияния рек Белая Оба ($F = 806$ км², $L = 58$ км,) и Черная Оба ($F = 691$ км², $L = 70$ км), берущих начало с Корганских Белков в зоне вечных снегов. Верховья реки с северо-востока и запада сжаты Тигирецким, Коксуйским и Убинским хребтами. Длина реки 278 км, площадь водосбора 9 850 км². Среднемноголетний расход – 173 м³/с [2].

Реки Арысь и Келес по гидрологическому районированию территории бассейна Сырдарьи относятся к северо-западному району, где объединена вся низкоргорная область северо-западной части бассейна Сырдарьи, т.е. западная периферия отрогов Таласского Алатау и юго-западные склоны хр. Каратау. По классификации В.Л. Шульца, реки относятся к типу снего-дождевого питания. Гребень волны половодья, рек этого района проходит большей частью в апреле-мае. *Река Арысь* образуется на стыке хребтов Таласского и Каратау. Общая длина составляет 378 км, а площадь водосбора 14 200 км². Особенностью бассейна является то, что заборы воды на орошение производятся на всем протяжении рек, начиная с верховьев. *Река Келес* правый приток реки Сырдарьи, берет начало на горном хребте Каржантау. Длина реки 241 км, площадь водосбора 3260 км² [5].

Описание модели HBV. Модель HBV, разработанная Бергстрёмом в Шведском метеорологическом и гидрологическом институте, представляет собой концептуальную модель водосбора, которая преобразует осадки, температуру воздуха и потенциальное суммарное испарение либо в снеготаяние, либо в сток или приток в водохранилище [8]. Модель была неоднократно модифицирована, и ее различные версии существуют во

многих странах. В данном исследовании применялась версия HBV light 2.0. Модель описывает общий баланс реки следующим образом:

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

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.

Модель HBV можно рассматривать как модель с полураспределёнными параметрами; водосбор разбивается на частные водосборы, также применяется метод высотного районирования. Модель включает следующие подпрограммы для интерполяции: расчет накопления снега и снеготаяние, суммарного испарения, влажности почвы, обобщения стока для расчета трансформации движения воды по рекам и через озера. Для водосборов определенного высотного положения осуществляется дополнительное деление на высотные зоны. Каждую высотную зону можно разделить на подзоны по типу растительности, например лесные и не лесные территории.

Модель HBV применяется для заполнения пропусков в рядах данных стока, для контроля качества данных, для изучения водного баланса, для расчета проектных паводков, для обеспечения безопасности плотин, для исследования последствий изменения стока в водосборном бассейне, а также для прогнозирования стока [10].

Для высотного анализа бассейнов использовались трехмерные снимки SRTM (Shuttle radar topography mission). Последующая обработка трехмерного снимка производится в модулях ESRI ArcGIS Desktop. На основе данных SRTM подготовлены 15 цифровых моделей рельефа (ЦМР) бассейнов горных рек с расширением пикселя 30×30 м. Проведен анализ рельефа каждого бассейна (направление потока, локальное понижение, заполнение, общий суммарный сток, идентификация, порядок водотоков, привязка точек устьев), классификация площади бассейнов по высотным зонам и выделены склоны различных экспозиций – северной, южной, западной, восточной. Также использовались данные ледниковых составляющих, при их наличии. В качестве примера на рис. 1 представлена карта ЦМР бассейна р. Ульби – с. Ульби Перевалочная. Аналогичные карты построены в ГИС для всех исследуемых водосборов.

Результаты.

Калибровка параметров модели. Надежность результатов гидрологических моделей водосбора напрямую зависит от процедуры калиб-

рования, которая обычно является поиском одного оптимального набора параметров для исследуемой территории.

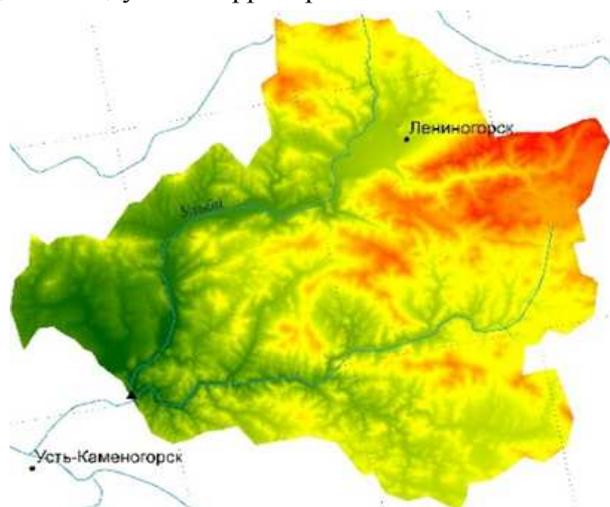


Рис. 1. Цифровая модель рельефа р. Ульби – с. Ульби Перевалочная.

Метод автоматической калибровки для модели HBV позволяет использовать различные критерии. Значения параметров выбираются случайным образом в пределах заданного диапазона, и модель запускается с использованием этих параметров. В табл. 1 представлены допустимые для модели HBV диапазоны параметров [11].

Обычно для калибрования требуются синхронные ряды стока и метеорологических данных за 3...5 или 5...10 лет. Период калибровки должен включать различные гидрологические годы, как многоводный так и маловодный.

Таблица 1

Допустимые диапазоны параметров модели

Параметр	Пояснение	СИ	Нижний предел	Верхний предел
Режим снега				
TT	Пороговая температура	°С	-1,5	2,5
CFMA	Фактор градус-день	mm °C ⁻¹ d ⁻¹	1	10
SFCF	Поправка к снегу	-	0,5	1,2
CWH	Влагоемкость	-	0	0,2
CFR	Коэффициент повторно-го замораживания	-	0	0,1
Режим почв				
FC	Максимум SM (накопленные влаги в почве)	mm	50	500

Параметр	Пояснение	СИ	Нижний предел	Верхний предел
LP	Порог для уменьшения испарения (SM/FC)	-	0,3	1
BETA	Shape коэффициент	-	1	6
Генерация стока				
K ₀	Коэффициент рецессии	d ⁻¹	0,1	0,5
K ₁	Коэффициент рецессии	d ⁻¹	0,05	0,3
K ₂	Коэффициент рецессии (lower storage)	d ⁻¹	0,001	0,1
UZL	Порог для K ₀ -outflow	mm	0	50
PERC	Максимальный сток проходящий от верхнего к нижнему слою почвы	mm d ⁻¹	0	4
MAXBAS	Трансформация стока, длина весовой функции	d	1	7

В данной работе калибрование модели выполнено по 15 горным рекам Туркестанской, Восточно-Казахстанской, Алматинской областей и г. Алматы с использованием алгоритма оптимизации GAP optimization. В результате автоматического калибрования модели HBV для каждого водного объекта определены наилучшие наборы параметров, в зависимости от климатических, гидрологических и геологических условий (табл. 2).

Таблица 2

Параметры модели HBV, сгенерированные при автокалибровании модели

Режим снега			Режим почвы и испарения				Режим подземных вод и чувствительности модели			
ТТ, °C	CFMAX, mm °C ⁻¹ d ⁻¹	SFCF	FC, mm	LP	BETA	Alpha	K1, d ⁻¹	K2, d ⁻¹	PERC, mm d ⁻¹	MAXBAS, d
<i>р. Арысь – жд. ст. Арысь</i>										
-0,3	7,6	0,5	292	0,7	2,9	0,3	0,2	9,9	1,6	6,7
<i>р. Келес – устье</i>										
-1,5	4,4	0,7	496	0,6	2,2	0,2	0,2	0,1	0,5	4,3
<i>р. Лепсы – г. Лепсы</i>										
-0,8	8,0	0,6	371	0,4	1,4	5,7	5,0	6,3	3,0	1,0
<i>р. Осек – п. Талды</i>										
1,1	3,6	1,1	198	0,3	5,7	0,0	0,1	4,6	3,9	3,8
<i>р. Баска – с. Екиаши</i>										
-1,0	3,3	0,9	293	0,6	6,0	3,0	8,7	0,0	4,9	6,2

Режим снега			Режим почвы и испарения				Режим подземных вод и чувствительности модели				
ТТ, °С	CFMAX, mm °C ⁻¹ d ⁻¹	SFCF	FC, mm	LP	BETA	Alpha	K1, d ⁻¹	K2, d ⁻¹	PERC, mm d ⁻¹	MAXBAS, d	
-1,5	8,8	0,5	400	0,6	1,5	0,4	0,3	7,6	1,8	7,0	
<i>р. Емель – Кзылту</i>											
-1,4	9,0	0,8	114	0,7	0,5	0,2	6,2	1,4	0,6	1,8	
<i>Приток в Бестюбинское вдхр.</i>											
-1,3	10,0	0,8	290	0,5	2,0	0,4	0,1	5,7	3,7	1,2	
<i>р. Шары – п. Сарытогай</i>											
-0,1	10,0	0,6	500	0,3	3,6	0,2	0,1	5,4	2,7	2,0	
<i>р. Шелек – п. Бартогай</i>											
1,6	9,0	1,2	231	0,3	1,1	7,0	6,9	1,5	1,8	2,6	
<i>р. Оба – г. Шемонаиха</i>											
0,9	3,1	1,5	150	0,9	1,1	0,9	7,1	0,1	2,4	1,2	
<i>р. Ульби – Перевалочная</i>											
1,7	5,0	0,9	232	0,6	3,6	7,9	0,1	6,7	0,2	2,1	
<i>р. Бухтарма – с. Лесная пристань</i>											
1,1	5,2	1,2	50	1,0	1,0	5,4	8,7	0,1	1,3	2,3	
<i>р. Коксу – с. Коксу</i>											
2,1	4,5	1,2	170	1,0	2,5	5,2	0,1	3,8	2,7	3,4	
<i>р. Улькен Бокен – с. Джумба</i>											
2,1	9,5	1,2	50	1,0	1,0	0,1	6,1	9,9	0,3	5,4	

Калибрование модели производилось автоматическим методом, основанным на большом количестве ручных калибровок (10 000 генераций случайных чисел). В ходе калибровок соответствующие значения параметров изменяются до тех пор, пока не будет получена наилучшая связь с наблюдаемыми данными.

HBV моделирует ежедневные значения стока в половодье с использованием суммы осадков, температуры воздуха и потенциального испарения. В зависимости от значения пороговой температуры ТТ [°С], выпавшие осадки классифицируются либо в твердые осадки (фактическая температура воздуха ниже порогового значения), либо в жидкие осадки (фактическая температура воздуха выше порогового значения). Все осадки, формирующие снег умножаются на поправочный коэффициент снегопада, SFCF. Таяние снега рассчитывается по методу градусо-дня.

Талая вода и осадки сохраняются в снежном покрове до тех пор, пока они не превысят определенную долю, CWH , водного эквивалента снега. Дождевые осадки и снеготаяние распределяются на влагу, наполняющую слой почвы и на подпитку грунтовых вод, в зависимости от соотношения между содержанием воды в почвенном слое (SM [mm]) и его максимальным значением (FC [mm]) [10].

К параметрам снежного покрова («snow routine»), которые рассчитываются в модели HBV-light, относятся пороговая температура (TT), фактор градус-дня ($CFMAX$) и поправочный коэффициент снегопада ($SFCF$).

Фактор градус-дня ($CFMAX$) основан на предполагаемой взаимосвязи между абляцией и температурой воздуха, обычно этот параметр выражается в виде суммы положительных температур воздуха, т.е. количества растаявшего льда или снега (мм), в определенный Δt интервал времени в дни с положительными температурами. По результатам расчета модели (табл. 2) количество растаявшего льда или снега в исследуемых бассейнах изменяются в пределах 3,1...10,0 мм. Максимальное количество растаявшего снега или льда наблюдается на р. Шелек – п. Бартогай и р. Шарын – п. Сарытогай. Поправочный коэффициент снегопада ($SFCF$) изменяется в пределах от 0,51 до 1,50.

Процедура учета влажности почвы является основной частью контроля образования стока. Эта процедура основана на трех параметрах: максимальном хранении влаги в почве (FC), индексе распределения влажности почвы ($BETA$), значении влажности почвы, выше которого эвапотранспирация достигает своего потенциального значения (LP). Вклад в сток от дождя или таяния снега является небольшим, когда почва сухая и велик при увлажненной почве. Соответственно, коэффициент стока зависит от влажности почвы [9]. Максимальное количество увлажненности почвы, рассчитанной по модели на реках Туркестанской области варьируются в пределах от 292 до 496 мм, на реках г. Алматы – от 114 до 500 мм, на реках Алматинской области – от 170 до 371 мм, а на реках Восточно-Казахстанской области изменяется от 50 до 400 мм (табл. 2). Значение влажности почвы, выше которого эвапотранспирация достигает своего потенциального значения на рассматриваемой территории варьирует от минимального до максимального значения, т.е. от 0,3 до 1,0. Индекс распределения влажности почвы изменяется от 1,00 до 5,97.

Следующая подпрограмма «генерация стока» («response routine») представляет собой функцию «ответа», которая преобразует избыток вла-

ги из зоны увлажненной почвы в сток. Избыток влаги из зоны увлажненной почвы накапливается в так называемом «верхнем резервуаре» (верхний почвенный слой). Пока в верхнем резервуаре есть влага, она постепенно просачивается в «нижний резервуар» в соответствии с параметром PERC. Таким образом, верхний почвенный слой представляет собой дренаж, через который влага поступает в нижний почвенный слой. В свою очередь, нижний почвенный слой является резервуаром хранения подземных вод водосбора, вносящий вклад в формирование стока.

Коэффициент K_1 , представляющий накопленный сток в верхней зоне накопления (SUZ) влаги изменяется в пределах от 0,05 до 8,73, а коэффициент K_2 – накопленный сток в нижней зоне хранения (SLZ) влаги варьирует от 0,03 до 9,97. Максимальная скорость просачивание воды изменяется от 0,24 до 4,91 мм/сут.

Генерируемый сток, проходит процедуру преобразования, с целью придания гидрографу правильной формы на выходе из суббассейна. Функция преобразования является простой технологией фильтрации с треугольным распределением весов. Временная база треугольного распределения равна значению заданной параметром MAXBAS. Параметр MAXBAS представляет собой общее количество суточного стока, $i = \{1, 2, \dots \max bas\}$ [13].

Функция MAXBAS перераспределяет общий сток на несколько дней, при этом определенное количество осадков, попадая на поверхность бассейна, оказывает влияние на водосбор не более чем на одни сутки. Рассматриваемый параметр на реках Туркестанской области варьирует от 4 до 7 сут, на реках Алматинской области – 1...6 сут, на реках г. Алматы 1...2 сут и на реках ВКО от 1 до 7 суток.

Для оценки соответствия моделированного стока наблюдаемому стоку используются различные критерии, такие как визуальная оценка или статистические критерии. В модели HBV связь между наблюдаемым и смоделированным стоком оценивается по формуле эффективности Нэша-Сатклиффа NSE [12], обозначаемой в модели R_{eff} [11].

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

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

При $R_{eff} > 0,5$ модель хорошо воспроизводит динамику моделируемой величины, при $R_{eff} = 1$ модельный расчет признается полностью адекватным, а при $R_{eff} < 0$ модель считается несостоятельной.

Характеристики водосбора и результаты эффективности модели приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика бассейнов и результаты эффективности модели

F, км ²	Метеостанция (М)	Средняя высота М, м н.у.м.	Период калибровки, гг.	R_{eff}
	р. Арысь – жд. ст. Арысь			
11500	Аул Турара Рыскулова	809	2004...2006	0,920
	р. Келес – устье			
3261	Казыгурт, Тасарык, аул Турара Рыскулова, Жетысай	697	1983...1986	0,788
	р. Лепсы – г. Лепсы			
1218	Лепсы	1012	2008...2012	0,919
	р. Шелек – с. Малыбай			
4262	Ассы	2215	1978...1980	0,922
	р. Осек – п. Талды			
1211	Мынжылкы	3017	1989...1991	0,950
	р. Баскан – с. Екиаша			
808	Сарканд	758	2012...2016	0,907
	р. Коксу – с. Коксу			
758	Когалы	1405	1995...2000	0,856
	Приток в Бестюбинское водохранилище			
6163	Жаланаш, Кеген, Нарынкол, Кыргызсай	1656	1978...1981	0,885
	р. Шарын – уроч. Сарытогай			
7766	Кеген, Жаланаш	1771	1986...1991	0,745
	р. Шелек – выше вдхр. Бартогай			
4908	Мынжылкы	3017	2010...2015	0,862
	р. Бухтарма – с. Лесная Пристань			
12423	Улкен Нарын, Катон-Карагай, Лениногорск, Теректы	764	1985...1987	0,921

$F, \text{ км}^2$	Метеостанция (М)	Средняя высота М, м н.у.м.	Период калибровки, гг.	R_{eff}
р. Емель – п. Кзылту				
21314	Алаколь, Жаланашколь, Урджар, Бакты	417	2009...2011	0,838
р. Оба – г. Шемонаиха				
8152	Лениногорск, Шемонаиха	559	2002...2005	0,908
р. Улькен Бокен – с. Джумба				
758	Кокпекты	510	1995...2000	0,895
р. Ульби – с. Ульби Перевалочная				
4931	Лениногорск, Усть-Каменогорск	547	1986...1990	0,922

Площадь исследованных рек варьирует в пределах 758...21314 км². Среди рассматриваемых рек есть реки с естественным режимом, реки, которые регулируются гидротехническими сооружениями (р. Шелек – с. Малыбай, р. Шарын – уроч. Сарытогай). К рекам, имеющим интенсивную хозяйственную деятельность относятся реки Туркестанской области: р. Арысь – жд. ст. Арысь, р. Келес – устье. Рассмотрена трансграничная река Емель – п. Кзылту, 80 % площади которой формируется на территории Китая. На рис. 2-5 представлены результаты калибрования некоторых рек.

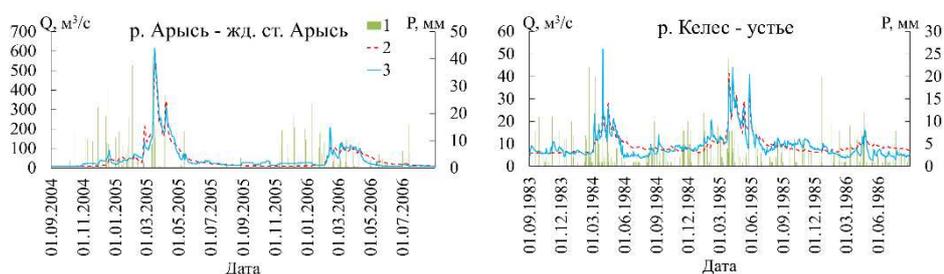
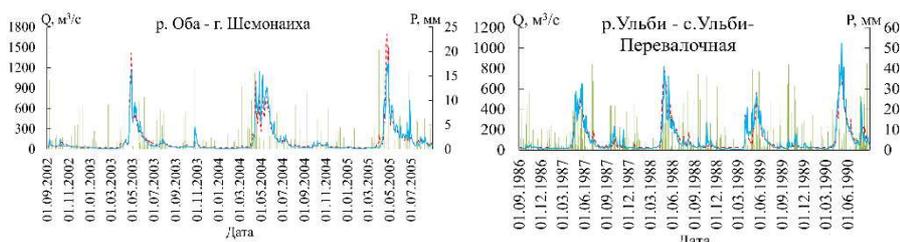


Рис. 2. Результаты калибрования рек Туркестанской области.



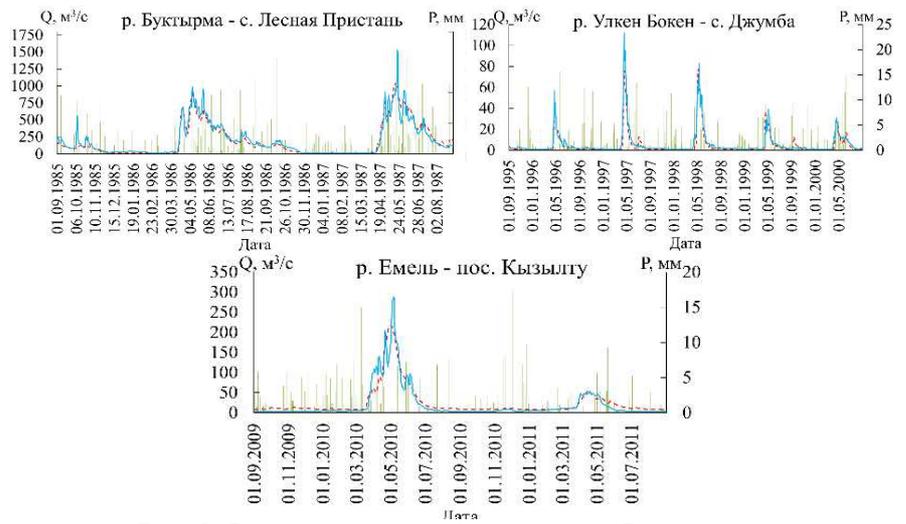


Рис. 3. Результаты калибровки рек Восточно-Казахстанской области.

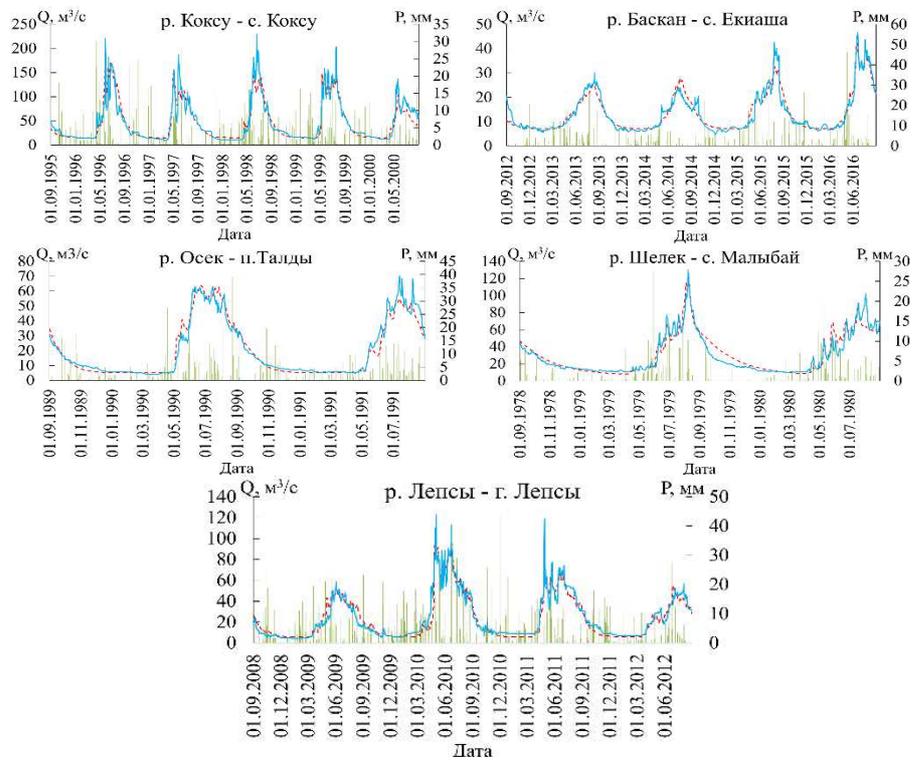


Рис. 4. Результаты калибровки рек Алматинской области.

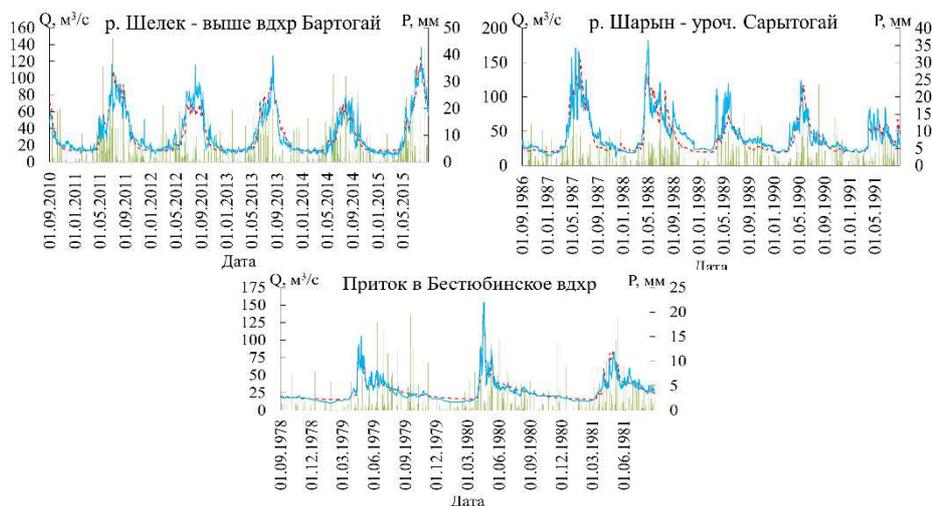


Рис. 5. Результаты калибрования рек г. Алматы. 1 – сумма атмосферных осадков, мм; 2 – смоделированный сток, м³/с; 3 – наблюдаемый сток, м³/с.

Для калибровки модели были выбраны в основном исторические периоды, от 2 до 5 лет. При калибровании параметров рек эффективность модели, рассчитанная уравнением NSE, в целом составила 0,745...0,950. Модель хорошо воспроизводит динамику моделируемого стока.

Наименьшую эффективность модель рассчитала для р. Келес – устье и р. Шарын – уроч. Сарытогай (0,788 и 0,745 соответственно). Эти реки имеют интенсивную хозяйственную деятельность и регулируются ГТС.

Эффективность модели для трансграничной реки Емель – п. Кзылту составила 0,838. Для других исследуемых рек с естественным режимом эффективность Нэша-Сатклифа варьирует в диапазоне 0,856...0,950. Коэффициенты корреляции наблюдаемых и смоделированных расходов воды колеблются в пределах от 0,863 до 0,977, что говорит о тесной связи между наблюдаемыми и смоделированными расходами воды.

Заключение. Авторами были исследованы 15 горных рек территории Казахстана. Для исследуемых водных объектов адаптирована гидрологическая модель HBV. Проведена работа по калиброванию параметров модели для каждой реки в отдельности. Использование модели HBV для горных рек Казахстана показало, что модель хорошо воспроизводит динамику моделируемого стока, критерии Нэша-Сатклифа составили 0,745...0,950. Откалиброванные параметры модели рекомендуется применять при моделировании стока для составления краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов расхода воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 311 с.
2. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление, Т. 21./ Водообеспеченность республики Казахстан: состояние и перспективы – Алматы: ТОО «Арко», 2012. – 237 с.
3. Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. Чувствительность гидрологических систем: влияние антропогенных изменений бассейнов и климата на гидрологический цикл. – М.: Наука, 1990. – 142 с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР, Алтай и Западная Сибирь. Том 15, Вып. 1 – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – С. 31-32, 59.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР, Средняя Азия. Том 14, Вып. 1. Бассейн р. Сыр-Дарьи – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – С. 53, 69, 88.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР, Центральный и Южный Казахстан. Том 13, Вып. 2. Бассейн оз. Балхаш – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – С. 34-40.
7. Федоровский А.С. Региональная адаптация моделей круговорота воды: Автореф. дис. ... доктора геогр. наук. – Владивосток, 1999. – 24 с.
8. Bergström, S. The HBV model – its structure and applications // SMHI Reports RH, Norrköping, Sweden, 1992. – №4
9. Gitte Berglöv, Jonas German, Hanna Gustavsson, Ulrika Harbman and Barbro Johansson Improvement HBV model Rhine in FEWS Final report // Hydrology – 2009. – № 112. – С. 10
10. Jan Seibert HBV light version 2. User's manual. Stockholm University, Department of Physical Geography and Quaternary Geology. – 2005. – С. 32
11. Jan Seibert, Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm // Hydrology and Earth System Sciences. – 2000. – № 4(2). – С. 215-217.
12. Nash J.E. and Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models, part 1-a discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10. – С. 282-290.
13. Valent P., Szolgay O., Rivero C. Assessment of the uncertainties of a conceptual hydrologic model by using artificially generated flows // Slovak journal of civil engineering. – 2012. – Vol. XX, №4. – С. 35-43.
14. Wilk J, Andersson L. and Plermkamon V. Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in a large river basin in northeast Thailand, hydrological processes // Hydrol. Process. – 2001. – № 15. – С. 2729-2748.

Поступила 28.09.2018

А.А. Болатова
Т.А. Тілләкәрім
М.Н. Раимжанова
Н.Т. Серікбай
Б.Е. Багітова
К.М. Болатов

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ТАУЛЫ ӨЗЕНДЕРІН HBV ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ МОДЕЛІМЕН КАЛИБРЛЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ

Түйінді сөздер: модель параметрлері, ГАЖ, жер бедерінің сандық үлгісі, көктемгі су тасудың ағындысы, үлгілеу

Жұмыста HBV-light моделінің қысқаша сипаттамасы, модельдің негізгі параметрлерінің сипаттамасы, жер бедерінің сандық үлгісінің жұмыс кезеңдері және Қазақстанның 15 таулы су жинау алаптарының автоматтық калибрлеу нәтижелері көрсетілген.

Bolatova A.A., Tillakarim T.T., Raymzhanova M.N., Serikbay N.T.,
Bagitova B.E., Bolatov K.M.

RESULTS OF CALIBRATION OF HBV HYDROLOGICAL MODEL FOR THE KAZAKHSTAN MOUNTAIN RIVERS

Key words: parameters of model, GIS, digital elevation model, spring flood runoff, modelling

The work presents a short description of model HBV-light, description of main parameters of model, pre-work stages with digital elevation model and results of automatic calibration for 15 mountain watersheds of Kazakhstan.