

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.4:571.6

DOI: 10.15372/GIPR20220317

С.Ю. ЛУПАКОВ, А.Н. БУГАЕЦ, В.В. ШАМОВ

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио, 7, Россия, rbir@mail.ru, andreybugaets@yandex.ru, vlshamov@yandex.ru

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ HBV ПО ДАННЫМ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВОДОСБОРАХ (ЮГ ПРИМОРСКОГО КРАЯ)

Проведен анализ значений параметров гидрологической модели HBV и выполнено сравнение оценок эффективности моделирования применительно к малым горным экспериментальным водосборам, расположенным в верхнем течении р. Усури (Приморский край, Россия). Для каждого водосбора модель калибровалась для отдельных лет, затем для всего периода наблюдений. Полученные наборы параметров были применены для расчетов на независимых данных, полученных за периоды, не входившие в интервал оптимизации параметров. Калибровка модели показала, что оптимальный набор значений параметров для одного года может существенно отличаться от параметров для другого года в пределах одного водосбора. Адекватные оценки качества моделирования для полного периода наблюдений обеспечиваются применением наборов параметров, откалиброванных для сезонов с высокими паводками, вызванными ливневыми осадками. Периоды низкой и средней водности характеризуются относительно высокими погрешностями расчета стока, что снижает общую эффективность и надежность результатов при моделировании полного периода наличия данных. Показано, что для описания высокого стока моделью HBV достаточно 2–3 лет инструментальных наблюдений, включающих измерения как минимум одного-двух значимых паводковых событий. Формальный перенос параметров модели с одного малого водосбора на расположенные рядом подобные объекты возможен только для оценок экстремальных значений дождевых паводков. В остальных случаях данный подход чреват неадекватной структурой модельных компонентов водного баланса и грубыми ошибками в расчетах стока.

Ключевые слова: модель HBV, калибровка, устойчивость параметров, экспериментальные водосборы.

S.YU. LUPAKOV, A.N. BUGAETS, V.V. SHAMOV

Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 690041, Vladivostok, ul. Radio, 7, Russia, rbir@mail.ru, andreybugaets@yandex.ru, vlshamov@yandex.ru

ASSESSING THE PARAMETERS OF THE HYDROLOGICAL HBV MODEL USING FIELD OBSERVATION DATA ON EXPERIMENTAL CATCHMENTS (SOUTH OF PRIMORSKII KRAI)

An analysis of the HBV hydrological model parameters values and a comparison of the modelling efficiency have been made for small experimental mountain catchments located in the upper reaches of the Ussuri river (Primorskii krai, Russia). For each catchment the model was calibrated for individual years and, after that, for the entire observing period. The sets of parameters obtained were used in calculations based on independent data for periods not included in the interval of parameters optimization. A calibration of the model showed that an optimal set of the parameters values for one year can differ greatly from the parameters for another year within a single catchment. Appropriate values of the modeling efficiency for the entire observations period are provided with using sets of parameters calibrated for seasons with high floods caused by heavy rainfall. The periods of low and medium water flow are characterized by relatively high errors in calculating the water runoff, which decreases the overall efficiency and reliability of results in modeling the entire period of data availability. It is shown that for the simulation of a high runoff by the HBV model, it is sufficient to have two or three years of instrumental observations including measurements of one or two

significant flood events. A formal transfer of model parameters from one small catchment to nearby similar objects is only possible for assessments of rainfall floods characteristics. In other cases, such an approach leads to an inappropriate structure of the model water balance components and causes errors in runoff calculations.

Key words: HBV model, calibration, parameter robustness, experimental catchments.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка устойчивости параметров моделей стока в условиях, отличных от наблюдавшихся в периоды, для которых полученные данные использовались при их разработке, калибровке и верификации, — одна из наиболее актуальных задач современной гидрологии [1]. Изменение базовых факторов формирования стока на реальных водосборах может привести к снижению работоспособности моделей, так как их структура перестанет отвечать требованию адекватности описываемых процессов. При этом значения параметров модели могут не отражать особенности гидрологического режима рек за рамками периода их калибровки.

В целом считается, что при калибровке и верификации моделей одним из требований к исходным данным является использование максимально возможного диапазона гидрометеорологических условий [2, 3]. На практике условие наличия длительных рядов наблюдений не всегда выполняется, и определение нижней границы необходимого количества измерений имеет актуальное значение. Например, согласно [4], в 40-летнем ряду измерений полезными для калибровки модели являются только восемь лет, при этом в [5] на основе тех же данных, но с использованием более детальной статистической обработки показано, что для калибровки модели по стоку достаточно всего нескольких лет наблюдений, если они захватывают разные условия увлажнения, в том числе экстремальные. Для калибровки простой концептуальной модели может хватить 100–350 суток измерений [6], а для эффективного моделирования отдельных паводковых событий достаточно информации о нескольких подъемах уровня воды [7, 8].

В ряде исследований [9–12] показано, что применение параметров моделей, полученных на одних водосборах, к другим, как правило, вызывает снижение эффективности модельных расчетов. Подобные исследования особенно актуальны для бассейнов с ярко выраженными изменениями водного режима и являются основой для решения задач, связанных с поиском адекватного масштаба расчетных элементов в распределенных и полураспределенных моделях формирования стока. В соответствии с ландшафтно-гидрологическим подходом к изучению геосистем [13, 14], проблема регионализации параметров моделей может быть решена путем тестирования их переноса с одних водосборов на другие, в том числе при отсутствии данных наблюдений [15]. В этом контексте использование результатов экспериментальных наблюдений на малых речных водосборах может обеспечить дальнейшее развитие моделей и процедур их параметризации [16].

В работе на основе данных полевых наблюдений, проведенных в теплые периоды 2012–2019 гг. на малых экспериментальных водосборах в верхнем течении р. Уссури, приводится анализ результатов калибровки гидрологической модели HBV (швед. Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning) с целью определения изменчивости значений параметров модели в зависимости от периода калибровки и возможности формального переноса набора параметров между объектами исследования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами моделирования являются малые водосборы II–III порядков (рис. 1), расположенные в верхнем течении р. Уссури: ручьи Берёзовый (площадь водосбора 3,6 км²), Медвежий (7,6 км²) и Еловый (3,5 км²). Рассматриваемая территория находится в пределах Верхнеуссурийского биоценологического стационара Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (44°02' с. ш., 134°11' в. д.).

Рельеф среднегорный, амплитуда высот составляет 500–1100 м над ур. моря. В нижних частях изучаемые объекты покрыты хвойно-широколиственными лесами; здесь распространены буроземы, сформированные на склоновом делювии, и пойменные почвы на аллювиальных отложениях. В верхних частях под темнохвойными лесами на элювиальных и элювиально-делювиальных отложениях вершин и склонов преобладают ржавоземы грубогумусовые иллювиально-гумусированные типичные и оподзоленные. В геологическом отношении изучаемые объекты имеют свои особенности. Бассейн руч. Берёзового расположен на тектоническом контакте юрских и триасовых отложений. Бассейн руч. Елового в основном сложен породами триасовых и меловых вулканитов и субвулканитов, руч. Медвежьего — породами юрского возраста.



Рис. 1. Картосхема исследуемой территории в пределах Верхнеуссурийского стационара (ВУС), объекты моделирования (бассейны ручьев Медвежьего, Берёзового и Елового) и точки расположения метеостанций (показаны пунсонами).

Климат района исследований определяется влиянием восточноазиатского внутритропического муссона. По данным метеонаблюдений, среднегодовая температура воздуха составляет $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, минимальные значения опускаются до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (январь–февраль), максимальные достигают $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (июль–август). Среднегодовое количество атмосферных осадков — $700\text{--}800\text{ мм}$, основная часть (до 80% и более) из которых выпадает с апреля по октябрь (теплый период). Суточные максимумы осадков достигают 100 мм и более, что связано с активностью выходящих к побережью Приморского края тайфунов, обычно во второй половине теплого

сезона. Твердых осадков выпадает меньше, высота снежного покрова редко бывает более 100 см , промерзание почвенного профиля в основном не превышает 125 см .

Водный режим исследуемых водотоков относится к дальневосточному типу с растянутым половодьем и летними дождевыми паводками. Сток теплого сезона достигает 90% годового объема, измеренные максимумы суточного слоя стока — 40 мм . Подземные воды изучаемых объектов получают питание за счет инфильтрации атмосферных осадков на склонах и водоразделах, иногда выходят на поверхность в виде родников в понижениях рельефа. Более подробное описание исследуемых объектов можно найти в [17, 18].

Устьевые участки рек были оборудованы цифровыми регистраторами уровня воды Solinst LT Levelogger Junior. Метеопараметры (температура воздуха, осадки, солнечная радиация, показатели влажности воздуха и ветрового режима) измерялись с помощью трех автоматических метеостанций Delta-T WS-1, в отдельные периоды на водоразделах и в долинах ручьев устанавливались автоматические осадкомеры Delta-ОНМ. Расходы воды измерялись с применением электромагнитного регистратора скорости потока SEBA FlowSens. Ряды среднесуточных расходов воды для каждого ручья получены по кривым связи расхода и уровня воды $Q = f(H)$. Все измерения проводились с 15-минутным разрешением. Для холодных периодов года использовались данные метеостанции Чугуевка Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Методической основой исследования является широко применяемая в мировой практике гидрологического моделирования водно-балансовая концептуальная модель с сосредоточенными параметрами HBV [19]. В модели предусмотрено три основных модуля: блок расчета снега, блок почвенной влажности и эвапотранспирации, блок формирования и трансформации стока. Входными данными являются атмосферные осадки, температура воздуха и потенциальная эвапотранспирация.

Краткое описание блоков модели приводится на рис. 2. Жидкие осадки и стаявший снег пополняют почвенный блок в зависимости от текущего влагосодержания концептуальной почвенной емкости (SM , мм), его максимального значения (FC , мм), а также коэффициента $BETA$: $(SM(t)/FC)^{BETA}$. Испарение из SM определяется соотношением SM/FC , если оно выше калибруемого порогового значения LP в емкости SM , то действительное испарение (E_{act} , мм/сут) равно потенциальному (E_{pot} , мм/сут), в остальных случаях $E_{act} = E_{pot} \min((SM(t)/FC \cdot LP), 1)$.

В настоящей работе применена стандартная версия HBV с двумя стокоформирующими емкостями (см. рис. 2). Отток из каждой модельной емкости Q_n (мм/сут) связан с величиной ее влагозапаса S_n (мм) и соответствующим коэффициентом рецессии K_n линейным уравнением вида $Q_n(t) = K_n S(t)$. Параметр $PERC$ (мм/сут) определяет максимально возможное пополнение нижней емкости S_2 , действительное пополнение рассчитывается с учетом текущего влагосодержания S_1 . Отток Q_1 из верхней емкости S_1

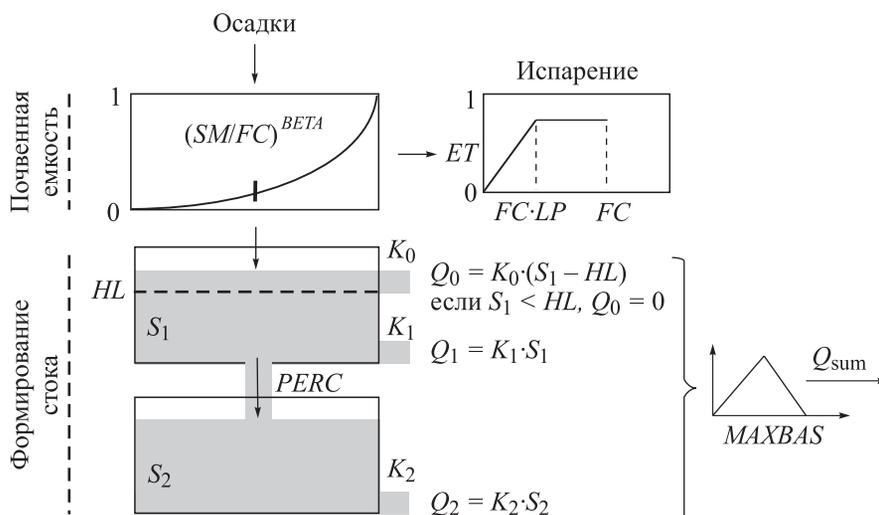


Рис. 2. Общая схема модели HBV.

традиционно принято рассматривать как почвенный сток. При достижении влагозапасом определенного порогового значения (HL) в верхней емкости S_1 , начинает формироваться быстрый (поверхностный) сток Q_0 (мм). Отток из емкости Q_2 может быть интерпретирован как грунтовый сток. Сумма оттоков из всех модельных емкостей является слоем стокообразования на водосборе, который трансформируется с учетом параметра добега $MAXBAS$, имеющего размерность времени (сутки) и определяющего базу треугольной функции трансформации расчетного суточного слоя стока [20]. При $MAXBAS = 1$ весь слой стокообразования попадает в замыкающий створ на тот же расчетный шаг, при $MAXBAS > 1$ происходит перенос части слоя стокообразования на следующий расчетный шаг.

Для калибровки параметров модели HBV были применены рекомендуемые интервалы значений, приведенные в работе [24]. Для оценки эффективности моделирования использованы общепринятые критерии: коэффициент детерминации R^2 , коэффициент Нэша–Сатклифа NSE и относительное смещение BIAS (табл. 1). Согласно [22], результаты расчетов являются очень хорошими при $NSE > 0,75$, хорошими — при $0,65 < NSE < 0,75$, удовлетворительными — при $0,50 < NSE < 0,65$ и неудовлетво-

Таблица 1

Качество моделирования и значения параметров HBV, полученные за разные промежутки времени

Период, годы	Критерий			Параметр								
	R^2	NSE	BIAS, %	FC , мм	LP	$BETA$	$PERC$, мм/сут	HL , мм	K_0	K_1	K_2	$MAXBAS$, сут
Руч. Берёзовый												
2016	0,84	0,83	-27	440	0,5	1,4	4	15	0,999	0,3	0,3	1,2
2017	0,87	0,83	-5	120	0,5	3,2	2	0	0	0,2	0,1	1,5
2018	0,79	0,78	-7	580	0,5	1,15	2,8	13,3	0,999	0,5	0,1	2,0
2019	0,73	0,64	-4	505	0,01	0,67	6,2	3,22	0,93	0,03	0,128	1,8
2016–2019	0,79	0,78	-14	408	0,312	0,869	3,19	16,3	0,999	0,334	0,167	1,5
Руч. Медвежий												
2015	0,91	0,90	0	560	0,2	5,05	0,7	3,5	0,999	0,21	0,19	1,7
2016	0,95	0,93	-30	530	0,1	0,8	1,5	21	0,999	0,3	0,2	1,9
2017	0,80	0,80	1	1415	0,09	5,55	4,3	2	0,1	0,9	0,18	1,7
2019	0,54	0,53	-1	1500	0,39	3,22	2,0	3,1	0,4	0,1	0,051	1,9
2015–2019	0,89	0,89	-10	620	0,3	0,2	1,5	15	0,999	0,2	0,1	1,9
Руч. Еловый												
2012	0,97	0,96	1	145	0,57	2,8	1,56	44	0,155	0,024	0,0001	2,7
2013	0,86	0,85	-2	220	0,01	3,9	3,3	70	0,2	0,028	0,0005	3,2
2014	0,87	0,86	-3	105	0,01	5,1	3,2	69	0,25	0,023	0,0003	1,8
2012–2014	0,86	0,86	1	112	0,57	2,35	1,6	59	0,27	0,023	0,0001	3,7

рительными при $NSE < 0,50$. Результаты моделирования считаются очень хорошими при $|BIAS| \leq 10 \%$, хорошими — при $10 < |BIAS| \leq 15 \%$, удовлетворительными — при $15 < |BIAS| \leq 25 \%$ и неудовлетворительными — при $|BIAS| > 25 \%$.

Моделирование выполнено с суточным шагом по времени. Потенциальное испарение рассчитано отдельно методом Пенмана–Монтейса. Период моделирования для руч. Берёзового — 2016–2019, Медвежьего — 2015–2019 (исключая 2018 г.), Елового — 2012–2014 гг. Для минимизации влияния начальных условий на результаты моделирования во всех случаях использовался один дополнительный год (2015, 2014 и 2011 гг. соответственно). В качестве целевой функции использован критерий NSE. Параметры модели HBV калибровались с помощью интерфейса HBV-light [20], сначала для отдельных лет, затем для всего периода наличия данных наблюдений для каждого исследуемого водосбора. Далее параметры, определенные на основе значений критериев качества как оптимальные для отдельных лет, применялись к остальным годам и для полного периода моделирования каждого водосбора. После этого был произведен взаимный перенос параметров с одного объекта на другие.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В целом, согласно значениям критериев эффективности (см. табл. 1), качество моделирования относится к категории «удовлетворительно и лучше» по всем исследуемым водосборам (рис. 3). По критерию BIAS только 2016 г. является «неудовлетворительным», остальные расчеты попадают в градацию «удовлетворительно и лучше».

При моделировании стока маловодных периодов основные ошибки в расчетах связаны с упрощенным описанием в HBV процессов эвапотранспирации — ведущими при функционировании речных бассейнов в меженные периоды [23]. Модель более эффективна для сезонов с паводковыми событиями.

Для руч. Елового отмечаются стабильные значения всех коэффициентов рецессии при сравнении результатов как для отдельных лет, так и для всего периода. Относительно устойчивы значения *BETA*, *PERC* и *HL*, при моделировании полного периода их значения близки к параметрам для отдельно откалиброванного 2012 г. Неоднородные условия увлажнения этого года, включающие и глубокую и затяжную межень в конце июля (на отдельных участках русла наблюдалось полное пересыхание ручья), и паводок в августе, оказались удачными для выявления значений эффективных параметров.

Для руч. Берёзового при всех указанных выше вариантах калибровки относительная стабильность обнаружена только для коэффициентов рецессии и параметров *PERC* и *MAXBAS*, значения остальных параметров сильно варьируются. Параметры, полученные для сезонов с паводками (2016 и 2018 гг.), более близки между собой по сравнению с «сухими» сезонами (2017 и 2019 гг.), условия увлажнения которых значительно отличаются друг от друга. При моделировании полного ряда значения параметров в данном случае оказались близки к параметрам отдельных сезонов с паводками.

Для руч. Медвежьего характерен большой разброс в значениях параметров, за исключением *MAXBAS* и *LP* (см. табл. 1). Значения *FC* для разных лет существенно различаются, как и значения остальных параметров.

В целом устойчивость значений коэффициентов рецессии модельных емкостей отражает количество полезной информации, содержащейся в данных наблюдений за период оценки параметров. Для получения адекватных значений коэффициентов рецессии модельные емкости должны достичь максимального влагозапаса. При этом верхняя емкость, отвечающая за формирование условно поверхностного и почвенного стока, после наполнения должна быть сработана ниже порогового значения *HL*.

Адекватные значения K_0 получены для ручьев Берёзового и Медвежьего при моделировании гидрографов паводков, вызванных сильными дождями с образованием условно поверхностного стока. Значения K_0 для периодов 2015, 2016 и 2018 гг. совпадают с общим периодом наличия данных по этим водосборам (см. табл. 1). Поскольку значительных паводковых событий на руч. Еловом не было измерено, полученные для всех периодов значения K_0 не отражают действительного характера экстремального стокоформирования. Для оценки K_1 и K_2 достаточно данных измерений, содержащих ежегодно проходившие невысокие паводки, сформированные главным образом почвенными и грунтовыми водами.

Применение параметров, определенных как оптимальные для отдельных лет, к другим периодам внутри каждого водосбора показывает противоречивые результаты (табл. 2–4). При моделировании стока руч. Елового перенос параметров, рассчитанных для 2014 г., на остальные годы показал отрицательный результат, в остальных случаях близость значений позволила эффективно переносить па-

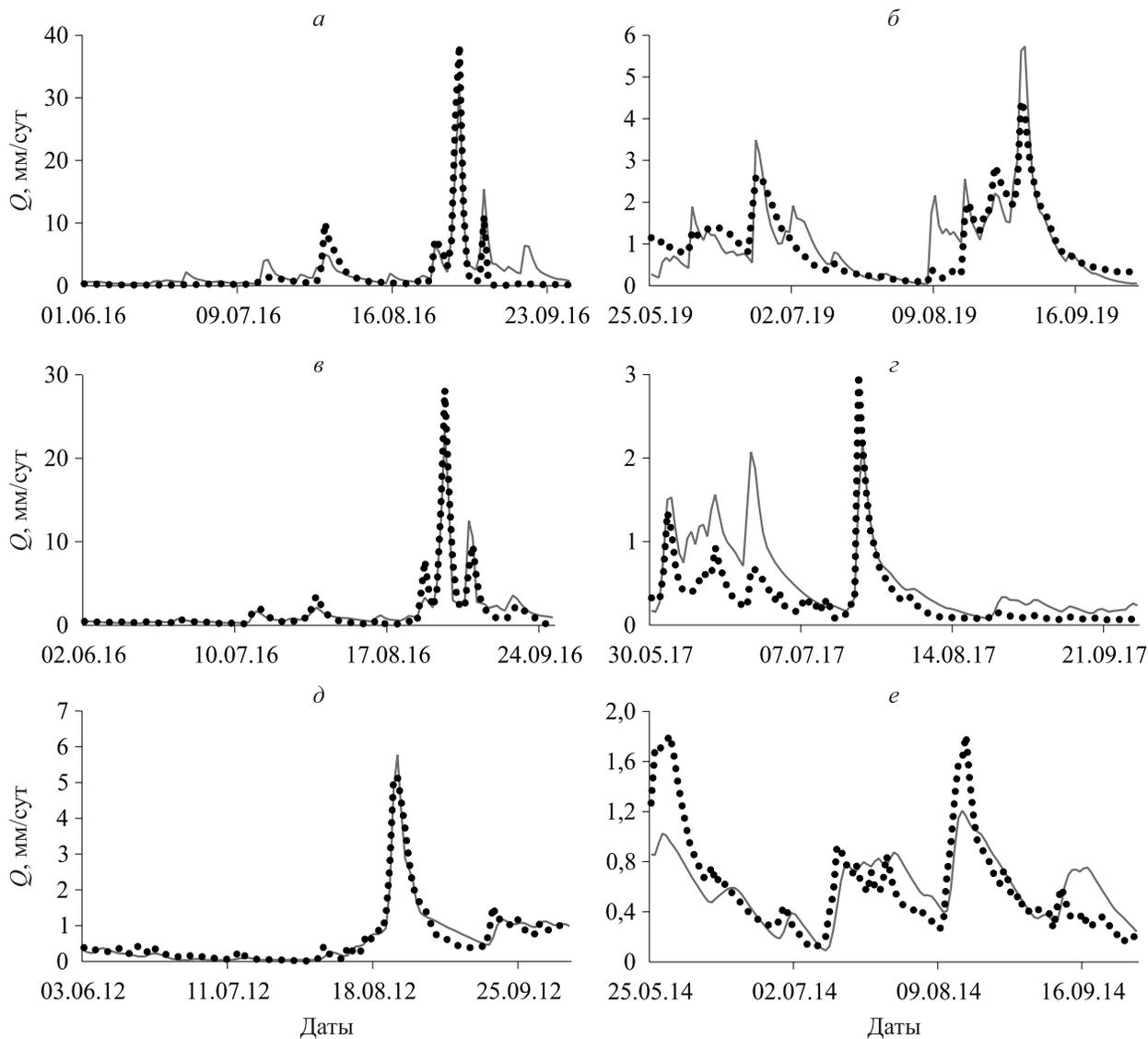


Рис. 3. Примеры измеренного (точки) и рассчитанного (линии) стока Q с помощью параметров, откалиброванных для полного ряда данных.

a, б — руч. Берёзовый; *в, з,* — руч. Медвежий; *д, е* — руч. Еловый. Колонка слева (*a, в, д*) — сезоны с паводками, колонка справа (*б, з, е*) — сезоны с относительно низким стоком.

Таблица 2

Оценки качества моделирования при использовании набора параметров, полученных для различных периодов калибровки, руч. Берёзовый (в числителе NSE, в знаменателе BIAS, %)

Период моделирования, годы	Период оценки параметров				
	2016	2017	2018	2019	2016–2019
2016		<i>0,21/-66</i>	<i>0,71/-38</i>	0,62/-4	0,83/-37
2017	0,68/9		<i>-0,47/-22</i>	<i>0,27/-6</i>	0,70/3
2018	0,65/3	<i>0,30/-30</i>		0,57/16	0,71/-10
2019	0,53/6	<i>0,03/12</i>	<i>0,16/-20</i>		0,64/-4
2016–2019	0,76/-3	<i>0,21/-27</i>	0,64/-21	0,59/4	

Примечание. Здесь и в табл. 3 и 4 курсивом обозначены случаи неудовлетворительного качества моделирования.

Таблица 3

Оценки качества моделирования при использовании набора параметров, полученных для различных периодов калибровки, руч. Медвежий (в числителе NSE, в знаменателе BIAS, %)

Период моделирования, годы	Период оценки параметров				
	2015	2016	2017	2019	2015–2019
2015		$-1,4/-95$	$-1,1/100$	$-0,3/53$	$0,13/11$
2016	$-0,09/-73$		$-0,1/90$	$0,2/62$	$0,90/-4$
2017	$-60/300$	$-3/-131$		$0,6/-46$	$0,18/-66$
2019	$-22/-115$	$-8/-116$	$0/0$		$0,28/-7$
2015–2019	$-1/-100$	$0,79/-66$	$0,01/65$	$0,3/36$	

Таблица 4

Оценки качества моделирования при использовании набора параметров, полученных для различных периодов калибровки, руч. Еловый (в числителе NSE, в знаменателе BIAS, %)

Период моделирования, годы	Период оценки параметров			
	2012	2013	2014	2012–2014
2012		$0,68/33$	$-8/-84$	$0,94/2$
2013	$0,8/7$		$-281/-760$	$0,81/-2$
2014	$0,62/-0,3$	$-0,13/-10$		$0,56/3$
2012–2014	$0,88/3$	$0,64/7$	$-92/300$	

параметры 2012 и 2013 гг. Важным моментом являются оценки качества моделирования, находящиеся в интервале «удовлетворительно и лучше», при применении параметров, откалиброванных для полного ряда. Это говорит об устойчивости параметров и адекватном воспроизведении моделью компонентов водного баланса водосбора.

Перенос подобным образом параметров, рассчитанных для 2016, 2018 и 2019 гг., позволяет удовлетворительно описывать сток руч. Берёзового для полного периода. В свою очередь, параметры модели, откалиброванные с использованием полного периода наблюдений, описывают сток индивидуальных сезонов на удовлетворительном и более высоком уровне. Наборы параметров, полученные по данным лет с сильными паводками (2016 и 2018 гг.), принципиально взаимозаменяемы. Набор параметров для среднего по водности 2019 г. дает результат на границе категорий «неудовлетворительно» и «удовлетворительно». Использование параметров, полученных при калибровке данных самого маловодного года из рассматриваемых (2017 г.), для моделирования гидрографов остальных лет во всех случаях дал неудовлетворительный результат.

Для руч. Медвежьего параметры, полученные при калибровке данных 2016 г. (с выдающимся паводком), при моделировании полного ряда обеспечивают удовлетворительное качество расчетов. В остальных случаях получены неудовлетворительные результаты.

Анализ значений модельных параметров (см. табл. 1) указывает на то, что три малых водосбора, находящихся на расстояниях первых километров друг от друга, различаются по условиям формирования стока. Данный вывод совпадает с полученными ранее результатами полевых исследований, геохимического и гидрологического моделирования [15, 17, 18]. При этом значения параметров модели для водосборов ручьев Берёзового и Медвежьего в большинстве случаев выходят за рамки обобщенных (рекомендуемых) интервалов, в то же время параметры для руч. Елового (за исключением МАХВАС) находятся в области рекомендуемых значений [24]. В целом НВУ хорошо воспроизводит измеренный сток отдельных лет, а при расчете полного ряда происходит снижение качества моделирования, но при этом оценки качества остаются в области удовлетворительных значений.

Формальный перенос параметров, полученных для одного водосбора, на соседние оказался не состоятельным (табл. 5) в условиях низкой и средней водности, паводковые события были рассчитаны в некоторых случаях с удовлетворительным качеством (в табл. 5 приводятся результаты только для руч. Берёзового).

Применение параметров руч. Елового к другим водосборам (и наоборот) не позволило достичь положительного результата ни по одному из оцениваемых периодов. Ошибки при переносе параметров между объектами связаны с низким значением K_2 , в результате чего происходит накопление воды в нижней емкости и устойчивый сильно завышенный сток Q_2 .

Значения NSE, полученные при переносе параметров модели от водосбора руч. Медвежьего на водосбор руч. Берёзового

Период моделирования стока руч. Берёзового, годы	Период оценки параметров для руч. Медвежьего, год				
	2015	2016	2017	2019	2015–2019
2016	–	0,7	–	–	–
2017	–	–	–	–	0,7
2018	0,5	0,6	–	–	–
2019	–	0,6	–	–	0,5
2016–2019	–	0,6	–	–	–

Примечание. Прочерк означает неудовлетворительное качество расчетов ($NSE < 0,5$).

При расчете стока 2016 г. на руч. Медвежьем значения коэффициента NSE при использовании параметров руч. Берёзового, оцененные за 2018 и 2019 гг., составили 0,7 и 0,9 соответственно. При расчете полного ряда (2016–2019 гг.) NSE составил 0,8 при использовании параметров руч. Берёзового, полученных за 2019 г.; остальные сочетания привели к отрицательному результату.

При этом параметры руч. Медвежьего более подходят для руч. Берёзового: из 25 расчетов семь оказались с $NSE > 0,5$, что преимущественно связано с высоким стоком. Это объясняется высокой чувствительностью коэффициента Нэша–Сатклифа к наличию экстремальных значений [25, 26]. В данном случае совпадение наблюдаемого и модельного пиков обеспечивает получение удовлетворительного (или выше) результата по этой метрике, в то время как в действительности полученные модельные параметры могут быть неадекватны остальным фазам гидрологического режима.

При паводковых событиях коэффициенты рецессии K_0 и K_1 , определяющие скорость сработки влагозапаса верхней емкости модели HBV (сток Q_0 и Q_1), оказались наиболее значимыми. Параметр FC , обуславливающий максимальное количество воды в концептуальной почвенной емкости и влияющий на пополнение емкостей и объем потерь на испарение, также можно отнести к ключевым.

Доминирующая роль и устойчивость полученных параметров емкостей модели HBV, имитирующих поверхностное и почвенное стокообразование, дает принципиальную возможность их использования для неизученных объектов при моделировании экстремальных паводков и оценке характеристик максимального стока по лимитированным данным наблюдений, охватывающих 1–2 паводковых события. При выборе периода калибровки предпочтительнее снизить его продолжительность в пользу длины ряда данных, используемого для верификации модели при оценке устойчивости параметров модели в различных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов калибровки гидрологической модели HBV показал, что значения оптимальных параметров модели, полученные для различных промежутков времени, существенно различаются. Период калибровки может быть назначен исходя из целей конкретного исследования. Например, для прогнозирования паводкового стока с оценкой на основе коэффициента NSE достаточно определить коэффициенты рецессии K_0 и K_1 для двух видов оттока из верхней емкости. Для этого достаточно двух-трех лет наблюдений, охватывающих выдающиеся паводки. Модель хорошо воспроизводит измеренный сток отдельных лет, при моделировании полного ряда происходит снижение качества расчетов.

Взаимный перенос модельных параметров между соседними малыми водосборами в большинстве случаев неэффективен, что связано с гидрогеологическими условиями и особенностями формирования меженного стока. В целом перенос параметров гидрологических моделей, полученных на основе данных экспериментальных наблюдений, должен выполняться с учетом надежных сведений о строении исследуемых речных бассейнов и связанных с ними априорных представлений о процессах формирования стока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (17–77–30006) и Российского фонда фундаментальных исследований (19–05–00326).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gelfan A.N., Millionshchikova T.D. Validation of a hydrological model intended for impact study: Problem statement and solution example for Selenga River Basin // Water Resources. — 2018. — Vol. 45, N S1. — P. S90–S910.
2. Wagener T., McIntyre N., Lees M.J., Wheater H.S., Gupta H.V. Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis // Hydrol. Process. — 2003. — Vol. 17. — P. 455–476.
3. Merz R., Parajka J., Blöschl G. Time stability of catchment model parameters: implications for climate impact analyses // Water Resources Research. — 2011. — Vol. 47. — W02531.
4. Yapo P.O., Gupta H.V., Sorooshian S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data // Journ. Hydrology. — 1996. — Vol. 181, N 1–4. — P. 23–48.
5. Vrugt J.A., Gupta H.V., Dekker S.C., Sorooshian S., Wagener T., Bouten W. Application of stochastic parameter optimization to the Sacramento soil moisture accounting model // Journ. Hydrology. — 2006. — Vol. 325. — P. 288–307.
6. Perrin C., Oudin L., Andreassian V., Rojas-Serna C., Michel C., Mathevet T. Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models // Hydrological Sciences Journ. — 2007. — Vol. 52. — P. 131–151.
7. Seibert J., McDonnell J. Gauging the Ungauged Basin: Relative value of soft and hard data // Journ. of Hydrologic Engineering. — 2013. — Vol. 20, N 1. — P. A4014004.
8. Reynolds J.E., Halldin S., Seibert J., Xu C.Y., Grabs T. Robustness of flood-model calibration using single and multiple events // Hydrological Sciences Journ. — 2020. — Vol. 65, N 5. — P. 842–853.
9. Bardossy A. Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments // Hydrology and Earth System Sciences. — 2007. — Vol. 11. — P. 703–710.
10. Oudin L., Andreassian V., Perrin C., Michel C., Le Moine N. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments // Water Resources Research. — 2008. — Vol. 44, N 3. — P. W03413.
11. Zelelew M.B., Alfredsen K. Transferability of hydrological model parameter spaces in the estimation of runoff in ungauged catchments // Hydrological Sciences Journ. — 2014. — Vol. 59, N 8. — P. 1470–1490.
12. Patil S.D., Stieglitz M. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters // Journ. Hydrology. — 2015. — Vol. 525. — P. 409–417.
13. Антипов А.Н., Фёдоров В.Н. Ландшафтно-гидрологическая организация территории. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — 254 с.
14. Корытный Л.М. Бассейновая концепция: от гидрологии к природопользованию // География и природ. ресурсы. — 2017. — № 2. — С. 5–16.
15. Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Lupakov S.Y., Shamov V.V., Pshenichnikova N.F., Tereshkina A.A. Modeling the hydrological regime of small testbed catchments based on field observations: a case study of the Pravaya Sokolovka River, the Upper Ussuri river basin // Water Resources. — 2019. — Vol. 46, N S2. — P. S8–S16.
16. Seibert J., McDonnell J. On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration // Water Resources Research. — 2002. — Vol. 38, N 11. — P. 1241–1252.
17. Гарцман Б.И., Шамо́в В.В. Натурные исследования стокообразования в дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. — 2015. — Т. 42, № 6. — С. 589–599.
18. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамо́в В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупаков С.Ю. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2019. — № 6. — С. 126–140.
19. Bergstrom S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments // Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) Report RH07. — Norrköping: SMHI, 1976. — 134 p.
20. Seibert J., Vis M. Teaching hydrological modelling with a user-friendly catchment-runoff-model software package // Hydrology and Earth System Sciences. — 2012. — Vol. 16, N 9. — P. 3315–3325.
21. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 — A discussion of principles // Journ. Hydrology. — 1970. — Vol. 10, N 3. — P. 282–290.
22. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // Transactions of the ASABE. — 2007. — Vol. 50, N 3. — P. 885–900.
23. Гарцман Б.И., Шамо́в В.В., Третьяков А.С. Система водно-балансовых моделей малого речного бассейна // География и природ. ресурсы. — 1993. — № 3. — С. 27–36.
24. Uhlenbrook S., Seibert J., Leibundgut C., Rodhe A. Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure // Hydrological Sciences Journ. — 1999. — Vol. 44, N 5. — P. 779–797.
25. Schaefli B., Gupta H. Do Nash values have value? // Hydrological Processes. — 2007. — Vol. 21. — P. 2075–2080.
26. Gupta H., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling // Journ. Hydrology. — 2009. — Vol. 377. — P. 80–91.

Поступила в редакцию 26.01.2021

После доработки 11.05.2021

Принята к публикации 29.03.2022