

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 551.4.571.6

СОПОСТАВЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ СТОКА,
ВОДНОГО БАЛАНСА И ПАРАМЕТРОВ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ
HBV И GR4J НА ПРИМЕРЕ РЕК БАССЕЙНА ВЕРХНЕЙ УССУРИ
(ЮГ ПРИМОРСКОГО КРАЯ)¹

© 2023 г. С. Ю. Лупаков^a, *, А. Н. Бугаец^a, Л. В. Гончуков^{b, c},
О. В. Соколов^b, Н. Д. Бугаец^a

^aТихоокеанский институт географии ДВО РАН,
Владивосток, 690041 Россия

^bДальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Владивосток, 690091 Россия

^cИнститут водных проблем РАН, Москва, 117971 Россия

*e-mail: rbir@mail.ru

Поступила в редакцию 03.08.2022 г.

После доработки 19.05.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Выполнен анализ эффективности моделирования стока, значений параметров, динамики расчетных компонентов стока в двух гидрологических концептуальных моделях GR4J и HBV для 17-ти водосборов рек бассейна верхней Уссури (Приморский край, Россия) площадью от 138 до 24400 км². Обе модели демонстрируют увеличение оценок эффективности моделирования NSE с увеличением площади водосборов до 1–2 тыс. км², далее происходит их стабилизация в интервале 0.75–0.85 за период калибровки и 0.70–0.80 за период верификации. При этом оценки, полученные для модели HBV, на 5–10% выше, чем для модели GR4J. На основе анализа измеренных и рассчитанных годовых максимумов стока за теплый период можно сделать вывод, что модель GR4J в среднем на 5–6% эффективнее рассчитывает максимальные значения расходов дождевых паводков, чем HBV. При этом полученные значения относительной ошибки BIAS свидетельствуют о более точном воспроизведении среднегодового стока моделью HBV. Основные отличия, определяющие эффективность моделирования в районе исследования, следующие: схема задания градиента осадков при разбивке водосборов на высотные пояса, особенности расчета модельного испарения, метод расчета оттока из концептуальных стокоформирующих емкостей в моделях GR4J и HBV.

Ключевые слова: модель, HBV, GR4J, параметры, водный баланс, Уссури.

DOI: 10.31857/S0321059622600557, **EDN:** NWDPLA

ВВЕДЕНИЕ

Модели, разработанные разными группами исследователей, часто используют параллельную терминологию и основаны на одних и тех же принципах моделирования генетических компонентов стока. В разных моделях упрощения при описании физических процессов и методы численного решения могут быть реализованы по-разному, соответственно результаты моделирования также могут в значительной степени различаться. С одной стороны, существенные различия ре-

зультатов расчетов генетических компонентов стока по разным моделям подобного типа означают то, что для данных водосборов модели следует применять с осторожностью, обусловленной риском недостоверных выводов. С другой стороны, анализ различий и сходств результатов расчетов подобных моделей может дать информацию об источниках ошибок и быть основой для проверки гипотез о формировании стока [5, 14, 19].

Исследование возможностей различных моделей (помимо эквифинальности [11] при воспроизведении гидрографа стока) аналогичным образом описывать основные гидрологические процессы все еще недостаточно. Выбор в пользу той или иной гидрологической модели в качестве методической основы большинства исследований обычно проводится в условиях значительной не-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках Государственного задания ТИГ ДВО РАН (тема 122011400135-0); часть исследования, связанная с анализом результатов моделирования, выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 122041100259).

определенности и недостатка объективных критериев этого выбора [5, 19]. Как правило, для исследования выбирается одна гидрологическая модель, возможно, с новым представлением определенных процессов с учетом размера водосбора, состава и наличия данных наблюдений или особенностей гидрологических условий климатических зон [25]. При этом надежность утверждений о характеристиках выбранной гидрологической модели обычно подтверждается ее применением для различных физико-географических условий [3, 6, 15, 23].

В ряде исследований проводится взаимное сравнение моделей, при котором основное внимание фокусируется не на оценке модели по данным наблюдений, а на выявлении различий в динамике компонентов водного баланса и сравнении параметров моделей, обобщении результатов моделирования и интерпретации различий в терминах полноты описания процессов, качества и репрезентативности данных гидрометеорологических наблюдений [12, 16]. Также для оценки масштабов применимости моделей важное значение имеют результаты исследований, в которых проводится анализ результатов моделирования для вложенных водосборов (представляющих собой иерархическую структуру, в которой водосборы рек более низких порядков являются частью водосборов рек более высоких порядков), на основе которого можно выявить пространственное распределение ошибок моделирования и их зависимость от неоднородности метеорологического воздействия, влияния особенностей ландшафта территории водосбора и структуры руслоевой сети [4].

Цель данного исследования – оценка влияния степени упрощения описания процессов формирования стока на результаты моделирования с помощью сравнения модельных компонентов водного баланса, параметров и эффективности широко применяемых в практике гидрологических исследований концептуальных моделей с открытым кодом HBV и GR4J. В качестве объектов исследования выбраны 17 вложенных водосборов бассейна Верхней Уссури (южная часть Приморского края) площадью от 133 до 24400 км². Калибровка и верификация моделей выполнены на основе данных наблюдений на метеостанциях и гидрологических постах Росгидромета. Представлены результаты сравнения модельных компонентов водного баланса, сопоставления значений близких по смыслу параметров двух моделей. Выполнен анализ влияния различных схем учета испарения, вертикального градиента метеорологических данных, динамики влагозапаса и блоков трансформации стока на результаты моделирования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования – 17 водосборов в бассейне Уссури–Кировский (24400 км²) (рис. 1), расположенные в южной части Приморского края. В восточной и южной частях водосбора рельеф среднегорный, отметки высот >1000 м и достигают 1850 м (г. Облачная), более равнинные участки приурочены к западной и северной частям водосбора, высотные отметки основных водоразделов – в интервале 400–500 м. В почвенном покрове и растительности выражена высотная поясность. Горно-тундровые почвы развиты в пределах наиболее возвышенных участков, на основной части среднегорья получили распространение горные буровато-желтые почвы, бурые почвы распространены в пределах равнинных участков, луговые глеевые почвы приурочены к наиболее пониженным территориям. С увеличением высотных отметок дубовые леса сменяются смешанными, склоны в верховьях рек в основном покрыты темнохвойным лесом, на высотах >1300 м начинает встречаться кедровый стланник [2].

Основная особенность климата региона – муссонный характер перемещения воздушных масс. Среднегодовая температура воздуха составляет 3–4°C, минимальная достигает –46°C (январь), максимальные 38–40°C (июль–август). За год в среднем выпадает 600–700 мм осадков, максимальные годовые суммы достигают 1100 мм. Характер увлажнения обуславливает особенности гидрологического режима рек, который традиционно относят к дальневосточному типу с относительно низким половодьем (обычно 5–10% годового стока) и высокими дождовыми паводками в теплый период года (до 90% годового стока), суточный слой стока может достигать 60–70 мм. Большая часть осадков (до 80–90%) приурочена к теплому периоду года (май–октябрь), зима преимущественно малоснежная. Суточные максимумы осадков находятся в диапазоне 100–200 мм и связаны с активным циклогенезом и выходом тайфунов (обычно в июле–августе) на территорию Приморского края.

В качестве методической основы исследования использованы две концептуальные модели с сосредоточенными параметрами – HBV [10] и GR4J [21], активно применяющиеся по всему миру, в частности на территории России [4, 5, 7–9]. Входными данными модели HBV являются атмосферные осадки, температура воздуха и потенциальная эвапотранспирация. Если температура воздуха (T , °C) опускается ниже порогового значения (TT , °C), осадки аккумулируются в снежном покрове, в ином случае рассчитывается снеготаяние (M , мм/сут) на основе метода градусо-дней [22] с использованием коэффициента $CFMAX$ (мм (°C·сут)): $M = CFMAX(T(t)) - TT$). Для учета ошибок измерений, потери части снега в виде

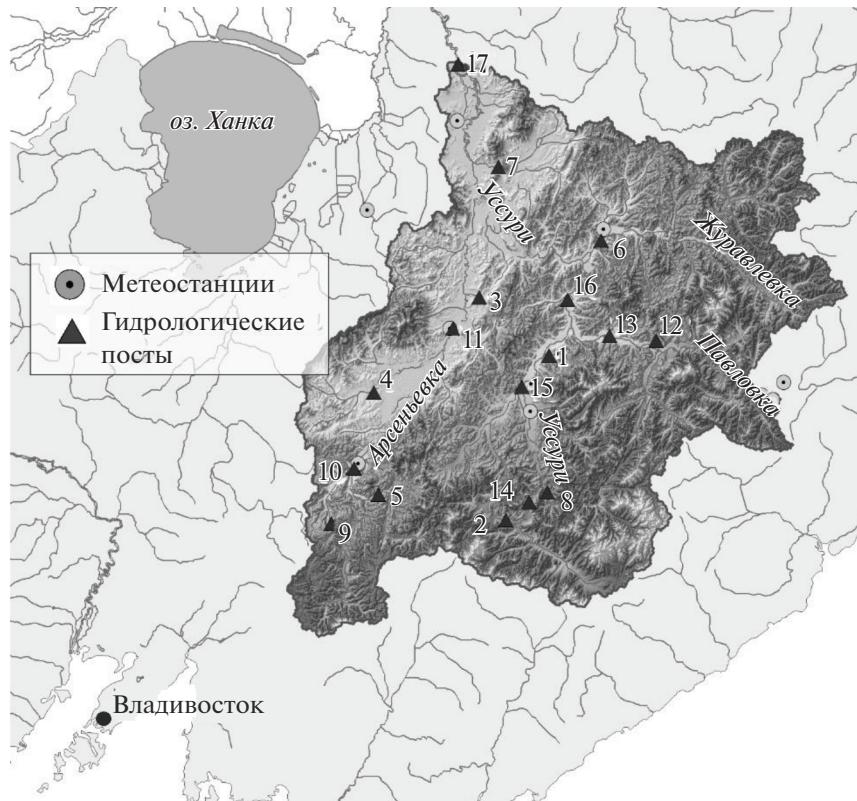


Рис. 1. Водосбор Уссури–Кировский. 1–17 – пункты сети мониторинга Приморского УГМС (номера гидрологических постов соответствуют табл. 1).

сублимации, явно неучитываемой в модели, и других факторов в блоке расчета снега дополнительно предусмотрен поправочный коэффициент $SFCF$. Жидкие осадки и стаявший снег пополняют влагозапас концептуальной почвенной емкости (recharge, мм/сут) в зависимости от ее текущего влагосодержания (SM , мм), максимального значения (FC , мм), осадков ($P(t)$ мм/сут), а также показателя степени $BETA$: $recharge/p(t) = (SM(t)/FC)^{BETA}$. Испарение определяется отношением SM/FC : если оно выше порогового значения LP (доля SM/FC), то действительное испарение (E_{act} , мм/сут) равно потенциальному (E_{pot} , мм/сут), в ином случае E_{act} вычисляется на основе E_{pot} и соотношения величин текущего и максимального влагозапаса почвенной емкости $E_{act} = E_{pot} \min \{(SM(t)/(FC LP)), 1\}$.

Использованная версия HBV содержит две стокоформирующих емкости $S1$ и $S2$ (верхняя и нижняя соответственно), из которых происходит три вида оттока (мм/сут): быстрый – $Q0$, промежуточный – $Q1$, медленный – $Q2$, обычно интерпретируемые как поверхностный, почвенный и грунтовый соответственно. Отток из каждой модельной емкости описывается линейным уравнением вида $Q_n(t) = K_n S(t)$, где Q_n – отток из емкости, K_n – коэффициент истощения (рецессии),

$S(t)$ – текущий объем воды в емкости. Динамика пополнения нижней емкости $S2$ определяется параметром $PERC$ (мм/сут). После достижения влагозапаса $S1$ порогового значения HL (мм) формируется сток $Q0$. Суммарный отток из всех модельных емкостей, сформированный моделью на каждый расчетный шаг, трансформируется в замыкающем створе с учетом параметра добегания $MAXBAS$, измеряющегося сутками [24]. Значения параметров модели HBV, в целом, коррелируют с ландшафтными характеристиками водосборов [4].

Входные данные модели GR4J – суточные суммы атмосферных осадков P (мм) и потенциальная эвапотранспирация PET (мм), которая должна быть предвычислена отдельно. В структуре модели предусмотрены две емкости, отвечающие за формирование S и трансформацию R стока с параметрами максимального влагозапаса $x1$ (мм) и $x3$ (мм) соответственно. GR4J на каждом расчетном шаге проводит предварительный расчет эффективных осадков. Для этого в начале каждого расчетного шага выполняется расчет баланса влаги на верхней границе водосбора $P - PET$. Таким образом, если $P - PET > 0$, вычисляются фактические осадки P_n , при этом фактическое испарение $E_n = 0$ и наоборот. В первом случае ($P_n > 0$) часть фактических осадков P_s направляет-

ся в стокоформирующую емкость $P_s = f(S, P_n)$, а оставшаяся часть – эффективные осадки $P_r = P_n - P_s$ – используется для расчета стока. Во втором случае ($P_n = 0, E_n > 0$) испарение из емкости формирования стока определяется как $E_s = f(S)$, объем S после этого корректируется: $S = S_n + P_s - E_s$. Величина водоотдачи $PERC$ рассчитывается как функция влагосодержания S (соответственно $S = S - PERC$), вместе с эффективными осадками они образуют объем стока для трансформации к замыкающему створу $P_r = PERC + P_n - P_s$.

Сформированный на текущий расчетный шаг слой стокообразования P_r разделяется на две строго фиксированные доли: (1) 90% от P_r направляется через единичный гидрограф UH1 в емкость трансформации стока R , (2) оставшиеся 10% P_r направляются единичным гидрографом UH2 непосредственно к замыкающему створу. Оба единичных гидрографа построены от одного и того же временного параметра $x4$ (сут), но UH2 имеет в два раза большее основание $2x4$. Обмен с грунтовыми водами F рассчитывается в зависимости от фактического влагосодержания емкости R и калибруемого параметра влагообмена $x2$ (мм/сут). F включается непосредственно между быстрым прямым $Q1$ (выход из UH2) и задержанным $Q9$ (выход из UH1) компонентами стока. Наконец, расход в замыкающем створе на расчетный шаг Q является суммой расходов $Q_r + Q_d$, которые рассчитываются как максимум из $\{0; R + Q9 + F\}$ и $\{0; Q1 + F\}$ соответственно.

Для моделирования процессов аккумуляции и таяния снежного покрова в GR4J используется концептуальная модель CemaNeige [26], основанная на методе градусо-дней и имеющая два калибруемых параметра – коэффициенты инерции температуры снежного покрова ($x6$) и стаивания ($x5$). Входными данными модели являются осадки и температура воздуха. Водосбор разбивается на высотные зоны, для которых используются фиксированные значения градиента температуры воздуха и суммы осадков со средней высотой. В каждой высотной зоне модель разделяет осадки на дождь и снег по жестко заданной пороговой температуре воздуха, равной 0°C . Рассчитанный суточный объем снеготаяния подается на вход гидрологического блока модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование выполнено с суточным временным шагом. На каждый расчетный шаг атмосферные осадки осреднялись по данным наблюдений на ближайших метеостанциях и осадкомерных пунктах. Данные по температуре воздуха взяты только с метеостанций и использованы для расчета потенциального испарения по методу Одина [20], процессов накопления и таяния сне-

га. Калибровка параметров моделей выполнена с помощью данных гидрометеорологических наблюдений Приморского УГМС [1, 10] вручную. Верификация выполнена на основе рекомендаций [17]. Период калибровки для большинства водосборов составил 21–38 лет, период верификации 16–31 год. Входные данные, периоды расчетов, высотное разделение водосборов приняты одинаковыми для GR4J и HBV; таким образом, разница в расчетах стока между двумя моделями обусловлена только их структурой.

Эффективность моделирования оценена (табл. 1) с помощью критерии Нэша–Сатклиффа NSE и относительного смещения $BIAS$ (%). На основе рекомендаций [18] результаты расчетов стока рассматривались в качестве “неудовлетворительных” при $NSE \leq 0.50$, “удовлетворительных” при $0.50 < NSE \leq 0.65$, “хороших” при $0.65 < NSE \leq 0.75$, “очень хороших” при $NSE > 0.75$; “неудовлетворительных” при $|BIAS| \geq 25\%$, “удовлетворительных” при $15\% \leq |BIAS| < 25\%$, “хороших” при $10\% \leq |BIAS| < 15\%$, “очень хороших” при $|BIAS| < 10\%$.

За период калибровки по критерию NSE все расчеты относятся к категориям “удовлетворительно” и лучше, за период верификации расчеты стока по модели HBV не опускаются ниже градации “удовлетворительно”, по модели GR4J два результата переходят в категорию “неудовлетворительно”. По критерию $BIAS$ все расчеты за периоды калибровки и верификации относятся к категории “удовлетворительно” и лучше.

Для малых рек обе модели демонстрируют относительно высокую вариацию оценок NSE . С достижением пороговой площади водосбора 1–2 тыс. km^2 происходит их стабилизация в интервале 0.75–0.85 за период калибровки и 0.70–0.80 за период верификации. Модель GR4J в среднем на 5–6% лучше воспроизводит максимальные значения расходов дождевых паводков, чем HBV. При этом для модели HBV значения NSE выше на 5–10%, а значения $BIAS$ ниже на 6–7%, чем для модели GR4J (табл. 1).

За период верификации значения критерия NSE по модели GR4J снижаются до диапазона неудовлетворительных только для поста Тихая–Чернышевка, при этом эффективность модели HBV все еще остается удовлетворительной. Снижение значений критериев эффективности в обоих случаях происходит за счет сильной недооценки стока во время катастрофического паводка 2013 г., вызванного мощным циклоном. Согласно данным метеонаблюдений, в период с 19.07.2013 по 02.08.2013 выпало 133 мм осадков. Поскольку водосбор р. Тихой имеет преимущественно равнинный характер, поправки на высотный градиент здесь незначительны, суммы осадков с учетом вертикального градиента составили 147 и 139 мм в

Таблица 1. Значения критериев эффективности моделирования стока $NSEc$ и $BIAsc$, полученные при калибровке, и $NSEv$ и $BIASv$, полученные при верификации моделей (числитель – для модели HBV, знаменатель – для модели GR4J)

Пост	Пост	Площадь водосбора, км ²	$NSEc$	$NSEv$	$BIAsc$	$BIASv$
1	Каменка	138	0.80/0.71	0.71/0.62	3/10	4/11
2	Правая Поперечка	222	0.85/0.81	0.69/0.72	8/3	16/11
3	Варфоломеевка	256	0.79/0.71	0.59/0.54	-5/12	0/17
4	Чернышевка	580	0.70/0.64	0.63/0.46	-1/5	10/18
5	Гродеково	761	0.82/0.75	0.70/0.68	0/15	3/19
6	Самарка	1030	0.76/0.71	0.58/0.54	2/7	-5/4
7	Крыловка	1070	0.75/0.69	0.71/0.69	-1/-5	1/-4
8	Извилинка	1160	0.68/0.68	0.58/0.54	4/9	4/9
9	Виноградовка	940	0.70/0.69	0.65/0.70	-1/14	-17/2
10	Анучино	2480	0.85/0.81	0.78/0.75	1/10	6/15
11	Яковлевка	5180	0.86/0.81	0.85/0.74	0/11	13/23
12	Антоновка	2670	0.85/0.81	0.77/0.74	3/15	15/24
13	Уборка	3350	0.81/0.79	0.78/0.77	0/11	13/23
14	Верхняя Бреевка	1720	0.84/0.82	0.75/0.76	2/11	12/22
15	Новомихайловка	5170	0.86/0.82	0.80/0.80	3/8	-4/3
16	Кокшаровка	9340	0.83/0.79	0.76/0.76	1/11	2/13
17	Кировский	24400	0.87/0.85	0.84/0.82	1/4	7/9

моделях HBV и GR4J соответственно. При этом слой стока по данным измерений на гидрологическом посту за тот же период составил 230 мм, такое несовпадение можно объяснить нерепрезентативностью метеорологических данных для водосбора р. Тихой. При исключении из анализа результатов расчетов за указанный период эффективность моделирования для обеих моделей возрастает и для модели GR4J значения критериев эффективности NSE за период верификации переходят в категорию “удовлетворительно”.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Соотношение компонентов водного баланса в моделях GR4J и HBV определяется структурой моделей и различными подходами к учету вертикальных градиентов осадков и температуры (табл. 2; рис. 2). Изменение температуры воздуха в обеих моделях задается с помощью постоянного значения градиента ($^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$), изменение осадков в GR4J задается с помощью градиента в абсолютных значениях ($\text{мм}/100 \text{ м}$), в HBV – в долях (%) от подаваемого на вход модели количества осадков на 100 м. В результате, после учета высотного градиента в модели HBV объем атмосферных осадков по всем исследуемым водосборам в среднем на 12% больше, чем в модели GR4J, что оказывает существенное влияние на качество моделирования расходов воды в замыкающих створах. В пе-

риоды весеннего половодья и летней межени учет градиента осадков в GR4J на основе абсолютных значений приводит к накоплению погрешностей в расчетах стока.

Существенная разница в оценках компонентов водного баланса также связана с особенностями расчета испарения в моделях. В соответствии с базовыми уравнениями в модели испарение в GR4J прямо зависит от величины осадков, поэтому для суточных сумм осадков, превышающих $PET (>6 \text{ мм})$, испарение приравнивается к нулю. Напротив, в HBV модельное испарение в теплый период никогда не опускается до нуля, поскольку связано с влагозапасом концептуальной почвенной емкости SM , никогда не опускающейся ниже слоя 20 мм для рассмотренных водосборов.

Во время летней межени объем стока в модели HBV определяется главным образом динамикой истощения влагозапаса стокоформирующей емкости $S2$, которое описывается линейным уравнением. В модели GR4J при расчете динамики емкости стокоформирования R учитываются потери на испарение, истощение влагозапаса описывается нелинейным уравнением. В гидрографах сильных паводков в модели HBV наблюдается явное доминирование доли быстрого (поверхностного) стока, сформированного верхней емкостью модели (рис. 2). В GR4J динамика паводка определяется только одной емкостью, доли быстрого

Таблица 2. Среднемноголетние значения основных компонентов водного баланса (мм), полученные с помощью моделей GR4J и HBV (P – осадки в модели с учетом градиента, Q_{sim} – рассчитанный сток; в модели GR4J: E_s – рассчитанное модельное испарение, F – влагообмен с грунтовыми водами, Q_r и Q_d – компоненты стока; в модели HBV: AET – рассчитанное модельное испарение, $Q0$, $Q1$, $Q2$ – компоненты стока)

Пост	GR4J						HBV					
	P	Q_{sim}	E_s	F	Q_r	Q_d	P	Q_{sim}	AET	$Q0$	$Q1$	$Q2$
1	2.24	0.93	0.71	0.07	0.78	0.15	2.47	1.01	1.38	0.02	0.31	0.67
2	2.28	0.98	0.58	0.04	0.85	0.13	2.58	0.91	1.26	0.01	0.19	0.73
3	1.98	0.74	0.71	-0.08	0.47	0.02	2.25	0.89	1.55	0.02	0.25	0.30
4	1.96	0.62	0.74	0.02	0.54	0.08	2.26	0.67	1.51	0.02	0.39	0.25
5	2.14	0.76	0.73	0.02	0.66	0.09	2.54	0.89	1.47	0.01	0.10	0.78
6	2.26	0.76	0.76	-0.02	0.70	0.06	2.54	0.90	1.35	0.03	0.23	0.65
7	2.04	0.71	0.45	-0.04	0.66	0.05	2.25	0.76	1.25	0.01	0.11	0.64
8	1.97	0.78	0.66	0.09	0.62	0.15	2.16	0.74	1.34	0.01	0.51	0.22
9	2.31	0.98	0.69	0.08	0.80	0.16	2.62	1.01	1.35	0.01	0.24	0.74
10	2.25	0.81	0.65	0.02	0.71	0.10	2.55	0.89	1.40	0.02	0.32	0.55
11	2.19	0.69	0.75	-0.04	0.64	0.05	2.27	0.77	1.30	0.02	0.16	0.58
12	2.18	0.72	0.71	-0.01	0.66	0.07	2.51	0.83	1.45	0.01	0.27	0.54
13	2.14	0.72	0.70	0.00	0.65	0.07	2.43	0.81	1.43	0.02	0.15	0.65
14	2.18	0.72	0.69	0.01	0.64	0.08	2.43	0.77	1.42	0.02	0.17	0.58
15	2.02	0.62	0.66	-0.01	0.56	0.05	2.24	0.70	1.41	0.02	0.34	0.33
16	2.18	0.73	0.66	0.02	0.65	0.09	2.52	0.82	1.48	0.01	0.26	0.55
17	2.2	0.75	0.62	0.03	0.65	0.10	2.52	0.77	1.51	0.01	0.31	0.45

и медленного стока строго фиксированы; таким образом, взаимная динамика, обеспечивающая преобладание одной или другой компоненты стока в гидрографе паводка, исключена.

Структура модели GR4J предусматривает возможность имитации водообмена с грунтовыми водами (безвозвратные потери стока или приток), в HBV – такой возможности нет, что приводит к необходимости компенсации этой части водного баланса за счет увеличения испарения (отвечающие за это параметры – LP и FC). Оба компонента стока (Q_r и Q_d) модели GR4J (табл. 3) имеют достаточно тесную связь с $Q0$ и $Q1$ модели HBV (табл. 4). Динамика грунтового стока $Q2$ модели HBV не коррелирует с компонентами стока GR4J.

Значения большинства параметров ($PERC$, UZL , $K1$, $K2$, TT , $CFMAX$, $SFCF$, FC , LP) модели HBV находятся в рекомендуемых диапазонах [24, 25]. Значения параметров $K0$ и $BETA$ завышены относительно рекомендованных, что связано с необходимостью моделирования паводковых событий, вызванных мощными и кратковременными ливневыми осадками. Значения параметра $MAXBAS$ хорошо коррелируют с площадью водосбора. Параметры модели GR4J $x1$, $x2$ и $x3$ находятся в рекомендуемых интервалах [21]. Значения

$x4$ закономерно возрастают с увеличением размеров речного бассейна. Параметры $x5$ и $x6$ модели CemaNeige находятся в пределах рекомендуемых значений [26].

Модули расчета аккумуляции и таяния снежного покрова в обоих случаях основаны на методе градусо-дней, поэтому коэффициенты интенсивности стаивания $x5$ (GR4J) и $CFMAX$ (HBV) в моделях по смыслу идентичны. Несмотря на небольшие различия абсолютных значений, корреляция между ними отсутствует. За исключением параметра интенсивности снеготаяния, все параметры модулей расчета аккумуляции и таяния снежного покрова значительно отличаются по смыслу в зависимости от концептуальных основ моделей. Например, параметр $x6$ в GR4J может быть соотнесен с понятием суммы отрицательных значений температуры применительно к снежному покрову, в HBV похожий по смыслу параметр отсутствует. В модели HBV при этом можно увеличить/уменьшить высоту снежного покрова параметром $SFCF$, отрегулировать температуру начала снеготаяния TT , в модели GR4J это значение является константой.

Параметры $x4$ в модели GR4J и $MAXBAS$ в модели HBV описывают русловое регулирование и

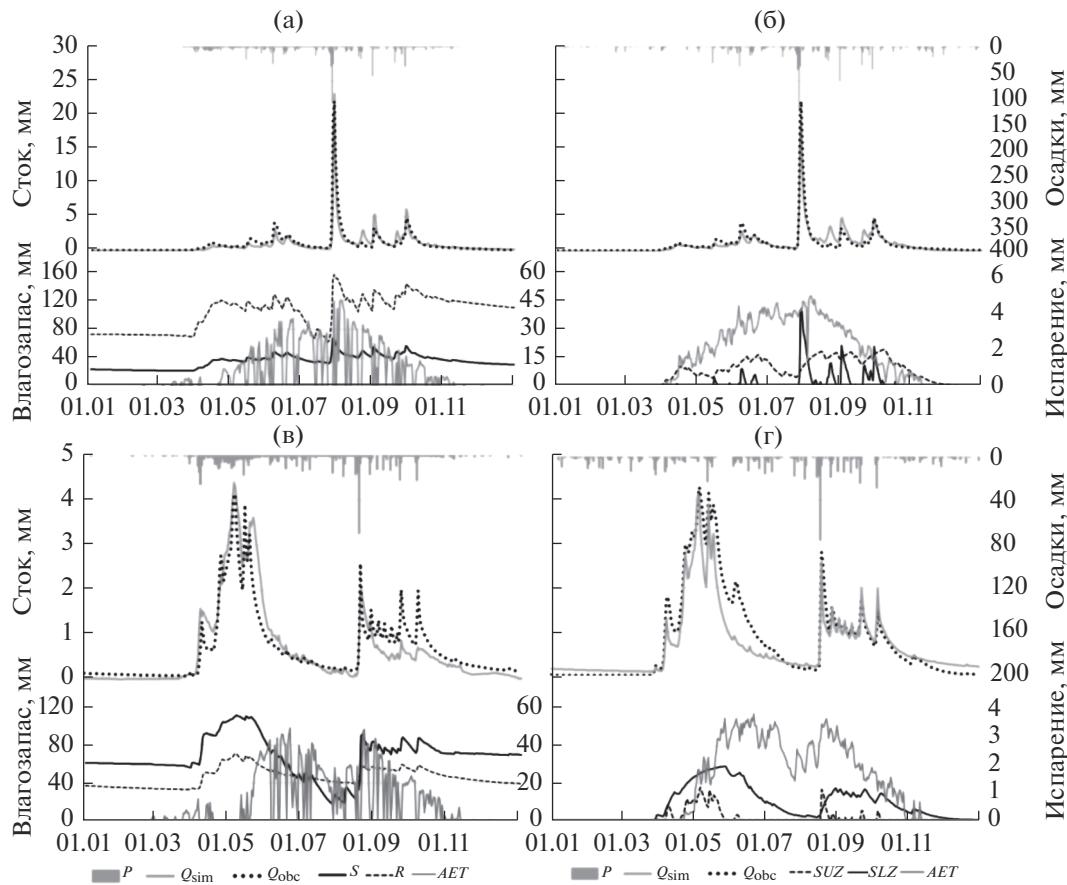


Рис. 2. Динамика основных компонентов водного баланса моделей GR4J (а, в) и HBV (б, г) на примере Павловка–Антоновка (а, б) в 1989 г. (исторический паводок) и Каменка–Каменка (в, г) в 1979 г. (низкий сток): P – осадки, Q_{obs} – измеренный расход, Q_{sim} – моделированный расход, AET – модельное испарение, S и R – емкости модели GR4J, SUZ – и SLZ – емкости модели HBV.

распластывание паводковых волн. Их значения для объектов исследования близки ($R^2 = 0.96$) и пропорциональны площади водосборов. При этом значения параметра *MAXBAS* на 40% выше, чем $x4$. Отметим, что быстрый (поверхностный) сток в GR4J формируется единичным гидографом UH2 с основанием $2x4$. Сумма значений параметров $x1$ и $x3$ (максимальные величины влагозапаса емкостей формирования и трансформации стока) близка к значениям *FC* в модели HBV ($R^2 = 0.50$). Параметр *K2* модели HBV, определяющий интенсивность водоотдачи из емкости *S2*, статистически связан с параметром $x2$ модели GR4J, имитирующими влагообмен с грунтовыми водами ($R^2 = 0.46$). Параметры *PERC*, *UZL*, *BETA* и *LP*, определяющие интенсивность испарения, динамику пополнения и оттока из емкостей, в модели HBV не связаны с параметрами модели GR4J.

За период июнь–сентябрь разница значений *NSE* по двум моделям снизилась в 3–5 раз относительно полного ряда и в среднем составила 1.7% (рис. 3). Разница значений $|BIAS|$ за полный

период моделирования при калибровке и верификации моделей для всех водосборов составила в среднем 87 и 62% соответственно. За июнь–сентябрь эта разница составляет 23%, при этом абсолютные значения $|BIAS|$ для модели GR4J практически всегда отрицательны, для модели HBV они, наоборот, положительны. Таким образом, исключение влияния динамики аккумуляции и таяния снежного покрова на результаты расчетов приводит к сближению моделей по эффективности моделирования гидографа, при этом динамика емкостей моделей и компонентов стока остается различной (рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность задачи сравнения моделей, имеющих разные концептуальные основы описания процессов формирования стока, обусловлена необходимостью оценки влияния степени упрощения тех или иных процессов в моделях на возможность воспроизведения основных гидрологических процессов, регионализации параметров и

Таблица 3. Значения параметров моделей GR4J, полученные в процессе калибровки

Пост	<i>x</i> 1	<i>x</i> 2	<i>x</i> 3	<i>x</i> 4	<i>x</i> 5	<i>x</i> 6
1	128	1.0	110	1.4	3.0	0.7
2	52	1.0	257	1.1	2.1	0.1
3	134	-0.8	33	2.2	2.3	0.1
4	134	0.2	33	3.4	2.5	0.4
5	164	0.3	63	2.2	2.6	0.4
6	181	-0.2	60	1.3	1.9	0.5
7	25	-0.7	110	2.2	1.6	0.4
8	81	0.9	45	3.2	1.5	0.2
9	221	1.0	90	1.1	2.0	0.4
10	116	0.3	128	2.1	2.0	0.2
11	148	-0.5	67	2.2	1.8	0.5
12	181	-0.1	77	2.2	2.2	0.7
13	181	0.0	81	2.5	2.0	0.4
14	181	0.1	81	2.4	2.5	0.5
15	99	-0.2	60	4.4	1.7	0.3
16	164	0.2	74	3.5	2.5	0.5
17	164	0.3	52	6.6	3.5	0.3

оценки потенциала моделирования для решения различных задач гидрологии. Выполненное в данном исследовании сравнение полученных в результате калибровки значений параметров, модельных компонентов стока и водного баланса моделей HBV и GR4J позволило сделать вывод о том, что эти модели демонстрируют схожую динамику оценок эффективности *NSE* в зависимости от площади водосбора. Стабилизация значений *NSE* для каждой из моделей происходит при преодолении пороговой площади 1–2 тыс. км². Оценки *NSE*, полученные для модели HBV, выше на 5–10%, чем для модели GR4J. Значения *Bias* ниже на 6–7% при использовании модели HBV. При этом модель GR4J на 5–6% эффективнее воспроизводит максимумы дождевых паводков. Динамика аккумуляции и таяния снежного покрова также оказывает существенное влияние на оценки эффективности моделирования. Параметры моделей, выполняющие схожие функции, имеют высокую корреляцию. Основные факторы, определяющие эффективность моделирования, следующие: способ задания градиента осадков при разбивке водосборов на высотные пояса, особенности расчетов модельного испарения и

Таблица 4. Значения параметров моделей HBV, полученные в процессе калибровки

Пост	<i>PERC</i>	<i>UZL</i>	<i>K0</i>	<i>K1</i>	<i>K2</i>	<i>MAXBAS</i>	<i>TT</i>	<i>CFMAX</i>	<i>SFCF</i>	<i>FC</i>	<i>LP</i>	<i>BETA</i>
1	2.1	30	0.17	0.13	0.07	2.1	-0.8	1.4	0.81	155	0.49	2.6
2	3.0	57	0.56	0.13	0.04	1.8	0.4	2.1	0.41	245	0.90	5.1
3	1.2	29	0.8	0.27	0.12	3.0	-0.6	1.7	0.60	175	0.31	5.5
4	0.7	21	0.38	0.29	0.09	5.0	-0.1	2.0	0.71	230	0.60	4.0
5	5.5	22	0.25	0.23	0.12	2.5	-0.2	1.5	0.62	295	0.60	3.0
6	3.1	25	0.53	0.24	0.09	2.3	1	2.0	0.47	270	0.72	2.7
7	3.8	29	0.98	0.26	0.16	3.2	0.4	1.1	0.44	160	0.78	2.9
8	0.5	35	0.99	0.26	0.05	4.3	-0.6	1.1	0.78	190	0.89	7.5
9	2.5	35	0.27	0.13	0.07	1.0	1.1	1.6	0.55	370	0.76	3.1
10	1.5	33	0.40	0.14	0.05	2.8	-0.1	1.2	0.51	210	0.40	1.9
11	3.4	27	0.58	0.25	0.10	3.0	1.7	2.0	0.54	235	0.80	3.7
12	1.8	30	0.33	0.17	0.08	2.9	-0.2	2.2	0.53	280	0.57	3.1
13	2.8	19	0.38	0.17	0.09	4.2	-0.3	1.2	0.56	265	0.40	1.9
14	2.2	30	0.93	0.17	0.10	4.1	0.6	2.0	0.53	320	0.66	3.3
15	0.9	27	0.54	0.22	0.06	6.4	-0.4	1.0	0.60	215	0.74	6.1
16	1.7	32	0.50	0.17	0.09	5.2	-0.3	1.5	0.55	300	0.57	3.3
17	1.2	30	0.48	0.18	0.08	9.0	-0.5	1.5	0.48	255	0.51	3.8

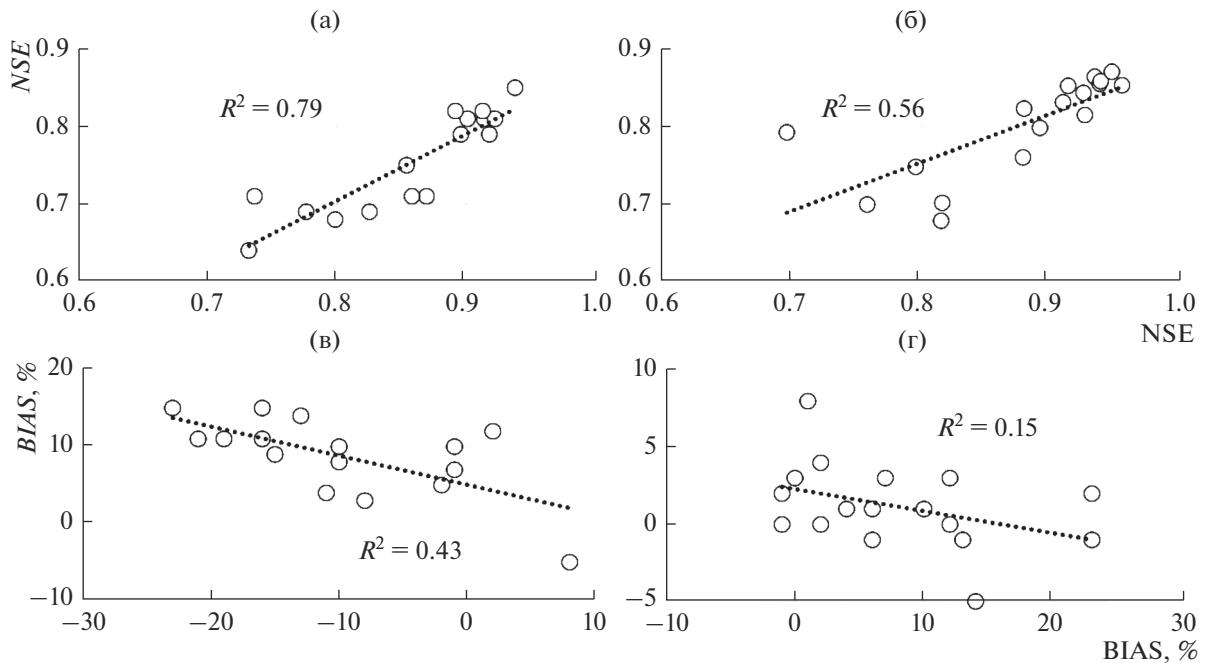


Рис. 3. Связи значений NSE (а, б) и $BIAS$ (в, г), полученные за период июнь–сентябрь (ось абсцисс) и за полный период калибровки (ось ординат): а, в – при использовании модели GR4J, б, г – при использовании модели HBV.

оттока из концептуальных стокоформирующих емкостей в моделях GR4J и HBV.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бугаец А.Н., Гарциман Б.И., Краснопеев С.М., Бугаец Н.Д. Опыт обработки информации модернизированной гидрологической сети с использованием системы управления данными CUHSI HIS ODM // Метеорология и гидрология. 2013. № 5. С. 91–101.
- Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Краснопеев С.М., Гарциман Б.И. Анализ пространственной дифференциации почвенного покрова юга Приморья на примере бассейна р. Комаровка // Почвоведение. 2015. № 3. С. 268–276.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X15030028>
- Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 312 с.
- Лупаков С.Ю., Бугаец А.Н. Использование концептуальной модели речного стока HBV для анализа паводков на малых водосборах // Метеорология и гидрология. 2022. № 1. С. 84–94.
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-1-84-94>
- Лупаков С.Ю., Бугаец А.Н., Шамов В.В. Применение различных структур модели HBV для исследования процессов формирования стока на примере экспериментальных водосборов // Вод. ресурсы. 2021. Т. 48. С. 417–426.
<https://doi.org/10.31857/S032105962104012X>
- Мотовилов Ю.Г., Гельфанд А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов.
- Симонов Ю.А., Семенова Н.К., Христофоров А.В. Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 55–65.
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-6-55-65>
- Ayzel G. Runoff predictions in ungauged Arctic basins using conceptual models forced by reanalysis data // Water Resour. 2018. V. 45 (S2). P. S1–S7.
<https://doi.org/10.1134/S0097807818060180>
- Ayzel G., Abramov D. OPENFORECAST: an assessment of the operational run in 2020–2021 // Geosci. (Switzerland). 2022. V. 12 (2). P. 67.
<https://doi.org/10.3390/geosciences12020067>
- Bergstrom S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Norrkoping, Sweden: Univ. Lund. Bull., 1976. 134 p.
- Beven K. Rainfall-runoff modelling. The Primer. Chichester: Ltd. John Wiley & Sons, 2001. 356 p.
<https://doi.org/10.1002/9781119951001>
- 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 test-bed catchments based on field observations: a case study of the Pravaya Sokolovka River, the Upper Ussuri River basin // Water Resour. 2019. V. 42 (S2). P. S8–S16.
<https://doi.org/10.1134/S0097807819080037>
- Bugaets A.N., Gonchukov L.V., Sokolov O.V., Gartsman B.I., Krasnopeev S.M. Information system to support regional hydrological monitoring and forecasting // Water

- Resour. 2018. V. 45 (S1). P. S59–S66.
<https://doi.org/10.1134/S0097807818050329>
14. *Clark M.P., Kavetski D., Fenicia F.* Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling // *Wat. Res. Res.* 2011. V. 47. W09301.
<https://doi.org/10.1029/2010wr009827>
 15. *Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H., Arnold J.G.* The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research and directions // *Am. Soc. Agricultural Biol. Engineers.* 2007. V. 50. № 4. P. 1211–1250.
<https://doi.org/10.13031/2013.23637>
 16. *Haddeland I., Clark D.B., Franssen et al.* Multimodel Estimate of the Global Terrestrial Water Balance: Setup and First Results // *Hydrometeorol.* 2011. V. 12. P. 869–884.
<https://doi.org/10.1175/2011JHM1324.1>
 17. *Klemes V.* Operational testing of hydrologic simulation models // *Hydrolog. Sci. J.* 1986. V. 31. P. 13–24.
<https://doi.org/10.1080/02626668609491024>
 18. *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 // *Trans. ASABE.* 2007. V. 50. P. 885–900.
<https://doi.org/10.13031/2013.23153>
 19. *Mroczkowski M., Raper G.P., Kuczera G.* The quest for more powerful validation of conceptual catchment models // *Water Resour. Res.* 1997. V. 26. P. 2275–2286.
<https://doi.org/10.1029/97WR01922>
 20. *Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andreassian V., Anctil F., Loumagne C.* Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Pt 2. Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling // *J. Hydrol.* 2005. V. 303. P. 290–306.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
 21. *Perrin C., Michel C., Andreassian V.* Improvement of a Parsimonious Model for Streamflow Simulation // *J. Hydrol.* 2003. V. 279. P. 275–289.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
 22. *Rango A., Martinec J.* Revisiting the degree-day method for snowmelt computations // *Water Resour. Bull.* 1995. V. 31. P. 657–669.
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03392.x>
 23. *Seibert J., Bergstrom S.* A retrospective on hydrological catchment modelling based on half a century with the HBV model // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2022. V. 26. P. 1371–1388.
<https://doi.org/10.5194/hess-26-1371-2022>
 24. *Seibert J., Vis M.* Teaching hydrological modelling with a user-friendly catchment-runoff-model software package // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 16. P. 3315–3325.
<https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>
 25. *Uhlenbroek S., Seibert J., Leibundgut C., Rodhe A.* Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure // *Hydrol. Sci. J.* 1999. V. 44. № 5. P. 779–797.
<https://doi.org/10.1080/02626669909492273>
 26. *Valery A.* Modélisation précipitations-débit sous influence nivale, élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Paris: Cemagref, 2010. 405 p.