

УДК 551.4:571.6

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕННОЙ АГРЕГАЦИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВКИ ПАРАМЕТРОВ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОКА НА ПРИМЕРЕ МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ (ЮГ ПРИМОРСКОГО КРАЯ, РОССИЯ)¹

© 2024 г. С. Ю. Лупаков^{a, *}, А. Н. Бугаец^a, Л. В. Гончуков^{b, c}, В. В. Шамов^a, О. В. Соколов^b^aТихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия^bДальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток, 690091 Россия^cИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: rbir@mail.ru

Поступила в редакцию 18.08.2023 г.

После доработки 20.10.2023 г.

Принята к публикации 27.11.2023 г.

Представлены результаты исследования влияния временной агрегации (1, 3, 6, 12 и 24 ч) входных данных на эффективность и значения параметров концептуальной гидрологической модели HBV на основе специальных натуральных наблюдений, выполненных на четырех малых экспериментальных водосборах (3.1–26.3 км²) в бассейне р. Правая Соколовка (Верхнеуссурийский стационар, верховья р. Уссури, юг Приморского края) в период 2012–2022 гг. Показано, что с уменьшением расчетного шага качество моделирования, рассчитанное с помощью коэффициента Нэша–Сатклифа, постепенно снижается. Для всех исследуемых водосборов модель демонстрирует высокую эффективность при расчете гидрографов высоких паводков, при этом не воспроизводит внутрисуточные колебания расходов воды (0.1–1.0 мм слоя) в период межени. Модельные доли генетических составляющих стока, при которых происходит постепенный переход к доминированию одной из генетических составляющих, не зависят от расчетного шага и имеют относительно постоянные значения. В то же время с увеличением расчетного шага по времени абсолютные значения модельных расходов воды, выраженные в мм слоя, также последовательно увеличиваются приблизительно в два раза. Закономерности изменения значений параметров блока формирования и трансформации стока HBV, а также максимальных измеренных сумм осадков от временного шага для дождей ≥ 20 мм/сут хорошо описываются степенными зависимостями с показателями 0.3–0.6. Сделано предположение о том, что для дождей высокой интенсивности наличие зависимости максимальных сумм осадков от временного интервала агрегации может оказывать влияние на значения параметров моделей типа HBV.

Ключевые слова: экспериментальные наблюдения, модель HBV, шаг по времени, параметры.

DOI: 10.31857/S0321059624030035 EDN: AUWZYQ

ВВЕДЕНИЕ

Исследование эффектов влияния временного масштабирования на результаты гидрологического моделирования подразумевает всесторонний анализ множества научных и технических вопросов, связанных с изучением взаимосвязей между процессами, временным масштабом измерений и расчетов [16], а также зависимости значений параметров [26, 28, 37] и структуры мо-

дели [13] от временного шага. В ряде работ показано, что при переходе от суточного к внутрисуточным шагам по времени диапазон значений и чувствительность параметров модели могут изменяться [19, 21, 24, 26, 28, 37], при этом эффективность моделирования может как увеличиваться, так и снижаться [14, 20, 22, 36, 38].

Большинство концептуальных гидрологических моделей включают в себя компоненты, имитирующие быструю (поверхностный), промежуточную (почвенный) и базовую (грунтовый) компоненты, составляющие результирующий гидрограф стока. Особенность реализации многих подобных моделей заключается в том, что их

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках Государственного задания Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук (тема 122020900184-5 и FWMW-2024-0003).

уравнения не имеют параметров, которые явно зависят от величины временного шага моделирования. Все потоки, как правило, выражены в единицах слоя (мм), и сама величина расчетного шага используется только для преобразования единиц измерений (в основном результирующего расхода) в удобную для гидрологов форму (например, м³/с).

Таким образом, с одной стороны, концептуальные гидрологические модели могут быть использованы с любым расчетным шагом по времени, с другой стороны, параметры уравнений, входящие в блоки, имитирующие динамику различных генетических компонентов стока, могут иметь неявный временной масштаб, наличие которого связано с решением проблем согласованности функционирования компонентов модели на разных временных шагах [23]. В связи с этим для одних и тех же водосборов по мере уменьшения временного шага моделирования одни параметры могут демонстрировать низкую чувствительность либо нечеткие тенденции (например, блока моделирования грунтовых вод), другие (например, блоков моделирования почвенного и поверхностного стока) при определенном диапазоне расчетных шагов могут демонстрировать стабилизацию значений [26, 28, 37].

В целом, влияние временного масштаба моделирования на оценки компонентов водного баланса и параметры моделей изучено недостаточно [17, 20]. Поскольку в детерминированных моделях используется предположение о том, как метеорологические переменные и речной сток распределяются внутри расчетного интервала (например, постоянная интенсивность дождя в течение расчетного шага), зависимость от времени некоторых гидрологических параметров связана с усреднением непрерывно измеряемых значений интенсивности осадков и расхода воды. Очевидно, что подобное усреднение как измеренных входных (метеорологических) данных, управляющих моделью, так и измеренных выходных данных (как правило, расходов воды в замыкающем створе), используемых для оценки параметров с помощью калибровки, связано с потерей информации о действительной динамике некоторых процессов исследуемых гидроло-

гических систем [25, 27, 29, 39, 32]. В результате значения параметров даже простой модели типа “осадки–сток” могут существенно различаться в зависимости от временного шага измеряемых данных.

Актуальная задача – оценка временной зависимости параметров моделей, их характерных временных интервалов, определение и регионализация (по бассейновому принципу) зависящих и не зависящих от шага моделирования параметров. Настоящая статья посвящена исследованию возможностей применения концептуальной гидрологической модели HBV с внутрисуточным шагом по времени на основе данных специальных полевых наблюдений, выполненных на малых экспериментальных водосборах в период 2012–2022 гг. [4]. При различных временных агрегациях исходных данных (1, 3, 6, 12 и 24 ч) были определены показатели эффективности моделирования, проанализированы зависимости значений откалиброванных параметров и переменных состояния модели от временного шага. Показаны характерные величины долей генетических составляющих паводкового стока, при которых водосбор переходит к различным состояниям увлажненности и соответствующим режимам формирования стока.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследуемая территория относится к Верхнеуссурийскому биоценологическому стационару ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (44°02' с.ш., 134°11' в.д.), расположенному в верховьях реки Уссури в Чугуевском районе Приморского края. В качестве объектов исследования выбраны четыре малых водосбора (рис. 1): ручьи Березовый (площадь 3.1 км²), Еловый (3.5 км²), Медвежий (7.6 км²) и р. Правая Соколовка (26.3 км²). Рельеф территории – среднегорный, диапазон высот в пределах выбранных речных бассейнов составляет 500–1100 м. Ширина долины р. Правая Соколовка в нижней части достигает 400–500 м, в верхней – 50 м; ширина долины ручьев в верховьях и в приустьевых участках изменяется от нескольких до десятков метров. Особенности почвенно-растительного покрова связаны с выраженной вертикальной зональностью: верхний пояс представлен горными буротаежными и гор-

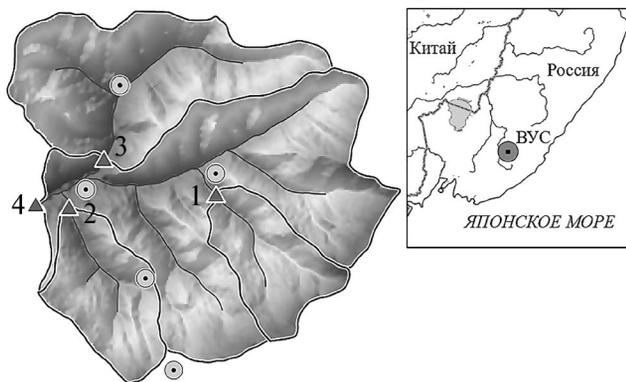


Рис. 1. Картограмма района исследования – территория Верхнеуссурийского стационара (ВУС), треугольниками показаны замыкающие створы: 1 – Березовый, 2 – Еловый, 3 – Медвежий, 4 – Правая Соколовка, круглыми значками – осадкомеры и метеостанции.

но-подзолистыми почвами темнохвойных лесов, нижний пояс – горнолесными бурыми почвами хвойно-широколиственных лесов [1].

Климат района определяется влиянием восточноазиатского муссона. Среднегодовая температура воздуха составляет 0.7°C , максимальные и минимальные отметки достигаются в июле–августе (38°C) и январе (-45°C) соответственно. За год в среднем выпадает 750–800 мм осадков, большая их часть приходится на теплый период (апрель–октябрь), при этом внутригодовое распределение осадков неравномерное (40–170% сезонной нормы). Суточные максимумы осадков находятся в диапазоне 100–200 мм и связаны с влиянием тропических циклонов, преимущественно в августе–сентябре. Гидрологический режим территории относится к дальневосточному типу с высокими летними паводками и относительно невысоким половодьем. Суточные максимумы слоя стока достигают 30–50 мм. Высота снежного покрова обычно ≤ 1 м, максимальная глубина промерзания – в пределах 0.5–1.5 м.

Полевые наблюдения выполнялись в теплый период года (май–октябрь) с 2012 по 2022 г. на водосборах ручьев Березового, Елового, Медвежьего и р. Правая Соколовка. Для мониторинга уровня воды на приустьевых контрольных участках устанавливались цифровые регистраторы “Solinst LT Levelogger Junior” (Канада). Метеорологические характеристики (темпера-

тура и влажность воздуха, осадки, солнечная радиация, показатели ветрового режима) измерялись с помощью трех автоматических метеостанций “Delta-T WS-1” (Великобритания) и двух “HP2000” (Китай), дополнительно использовались два автоматических осадкомера “Delta-ОНМ” (Италия), устанавливаемые на водоразделах и в долинах ручьев. Расходы воды в замыкающих створах измерялись вручную с помощью электромагнитного регистратора скорости потока “SEBA FlowSens” (Германия). Непрерывные серии расходов получены с использованием кривых “расход–уровень” $Q = f(H)$. Все измерения проводились с 10- или 15-минутным интервалом (в редких случаях с часовым), которые затем приводились к часовому разрешению. В холодный период года для моделирования использовались данные метеостанции Чугуевка (31939), расположенной в 30 км к СЗ от исследуемых водосборов в долине р. Уссури, также с часовым разрешением.

Для моделирования речного стока использована стандартная версия концептуальной модели HBV с сосредоточенными параметрами [15], которая состоит из трех основных блоков (рис. 2): 1) расчета аккумуляции и таяния снежного покрова; 2) состояния увлажнения водосбора и испарения; 3) формирования и трансформации стока. Входные данные модели – атмосферные осадки P (мм), температура воздуха T ($^{\circ}\text{C}$) и потенциальная эвапотранспирация PET (мм). В модели HBV слой снеготаяния и жидких осадков пополняет концептуальную емкость, имитирующую динамику почвенной влаги (рис. 2). В зависимости от ее текущего влагосодержания SM (мм) и максимального значения FC (мм) рассчитывается испарение, величина которого зависит от соотношения SM/FC , если оно выше порогового параметра LP , то действительное испарение AET (мм) приравнивается к потенциальному PET (мм), в ином случае $AET = PET \min((SM(t)/FC LP), 1)$.

Для расчета формирования стока используется схема с верхней $S1$ и нижней $S2$ емкостями. Пополнение $S1$ (Recharge) зависит от отношения текущего влагосодержания SM (мм), максимального значения FC (мм) и коэффициента $BETA$: $(SM(t)/FC)^{BETA}$; пополнение $S2$ определяется

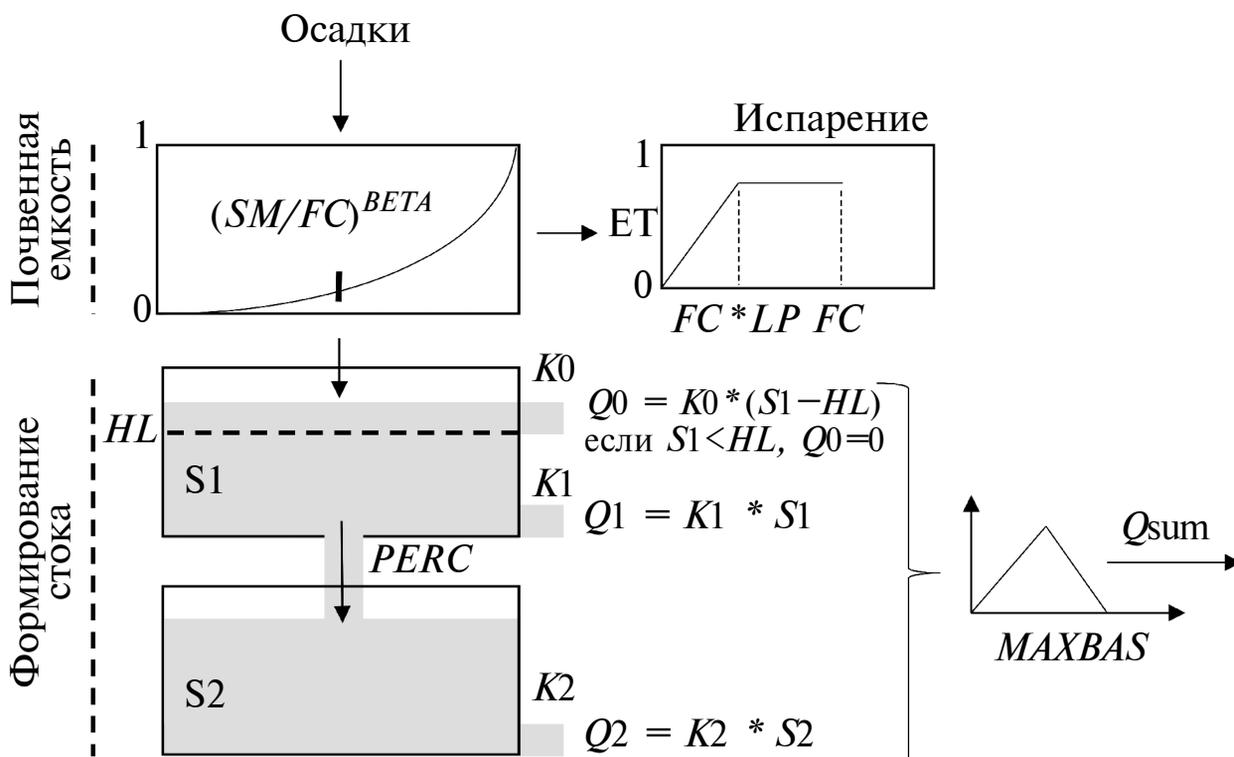


Рис. 2. Общая схема модели HBV.

максимальной скоростью просачивания $PERC$ (мм) из емкости $S1$. Рассчитывается три вида оттоков из стокоформирующих емкостей – $Q0$, $Q1$ и $Q2$, которые обычно интерпретируются как поверхностный, внутриводный и грунтовый соответственно. Для описания каждого компонента стока используется линейное уравнение вида $Qn(t) = Kn S(t)$, где Qn – отток из соответствующей емкости ($S1$ или $S2$), Kn – коэффициент рецессии, $S(t)$ – текущий влагозапас емкости (мм). Формирование $Q0$ возможно только при достижении порогового значения HL (мм) верхней емкости $S1$. Сумма всех компонентов стока ($Q0$, $Q1$ и $Q2$) на каждый расчетный шаг преобразуется в гидрограф в замыкающем створе с помощью треугольной трансформационной функции с основанием $MAXBAS$ (≥ 1), выраженным в единицах расчетного шага модели [35].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для целей данного исследования исходные измеренные данные по осадкам и температуре воздуха часового разрешения агрегированы по временным интервалам 3, 6, 12 и 24 ч. Потенци-

альная эвапотранспирация рассчитана методом Пенмана–Монтейса [12] с тем же временным разрешением. Моделирование выполнено непрерывно за период 2018–2021 гг. для руч. Березового, 2011–2022 гг. – для руч. Елового, 2015–2022 – для руч. Медвежьего, 2018–2022 гг. – для р. Правая Соколовка. Во всех случаях для расчета начальных условий использовался один год. Поскольку изначально модель HBV была разработана для суточного расчетного шага, калибровка модели была выполнена с последовательным уменьшением интервала агрегации входных данных от 24 до 1 ч с помощью метода GAD (Genetic Algorithm and Powell) [34], состоящего из нескольких последовательных этапов: 1) с помощью генератора случайных чисел создается множество наборов значений параметров; 2) для каждого набора вычисляется значение целевой функции; 3) из исходного набора параметров создается новый набор, каждый член которого получен из комбинации двух родительских наборов, выбранных на основе значения целевой функции. Результирующий набор параметров определяется с помощью алгоритма минимизации целевой функции Пауэлла [34].

В качестве целевой функции при расчетах стока использовался традиционно применяемый в гидрологии коэффициент Нэша–Сатклифа (NSE) [31]. В соответствии с [30], результаты моделирования стока “неудовлетворительные” при $NSE \leq 0.5$, “удовлетворительные” при $0.5 < NSE \leq 0.65$, “хорошие” при $0.65 < NSE \leq 0.75$, “очень хорошие” при $NSE > 0.75$.

Согласно [30], все расчеты относятся к категории “хорошо” и “очень хорошо”, за ис-

ключением двух случаев (руч. Еловый, 1 и 3 ч) (табл. 1). В целом следует отметить, что с уменьшением расчетного шага эффективность моделирования постепенно снижается. Для водосборов, имеющих минимальную площадь, ручьев Березового и Елового ($3.1\text{--}3.5\text{ км}^2$ соответственно) – заметное снижение значений NSE происходит при уменьшении расчетного шага моделирования до 1–3 ч, для остальных водосборов (Медвежьего (7.6 км^2), и Правой Соколовки (26.3 км^2)) – при расчетном шаге 3–6 ч. Пример

Таблица 1. Оценки эффективности гидрологического моделирования (NSE)

Водосбор	Шаг по времени, ч				
	1	3	6	12	24
Березовый	0.72	0.80	0.79	0.80	0.79
Еловый	0.55	0.60	0.70	0.67	0.69
Медвежий	0.77	0.76	0.78	0.78	0.82
Правая Соколовка	0.71	0.68	0.74	0.76	0.81

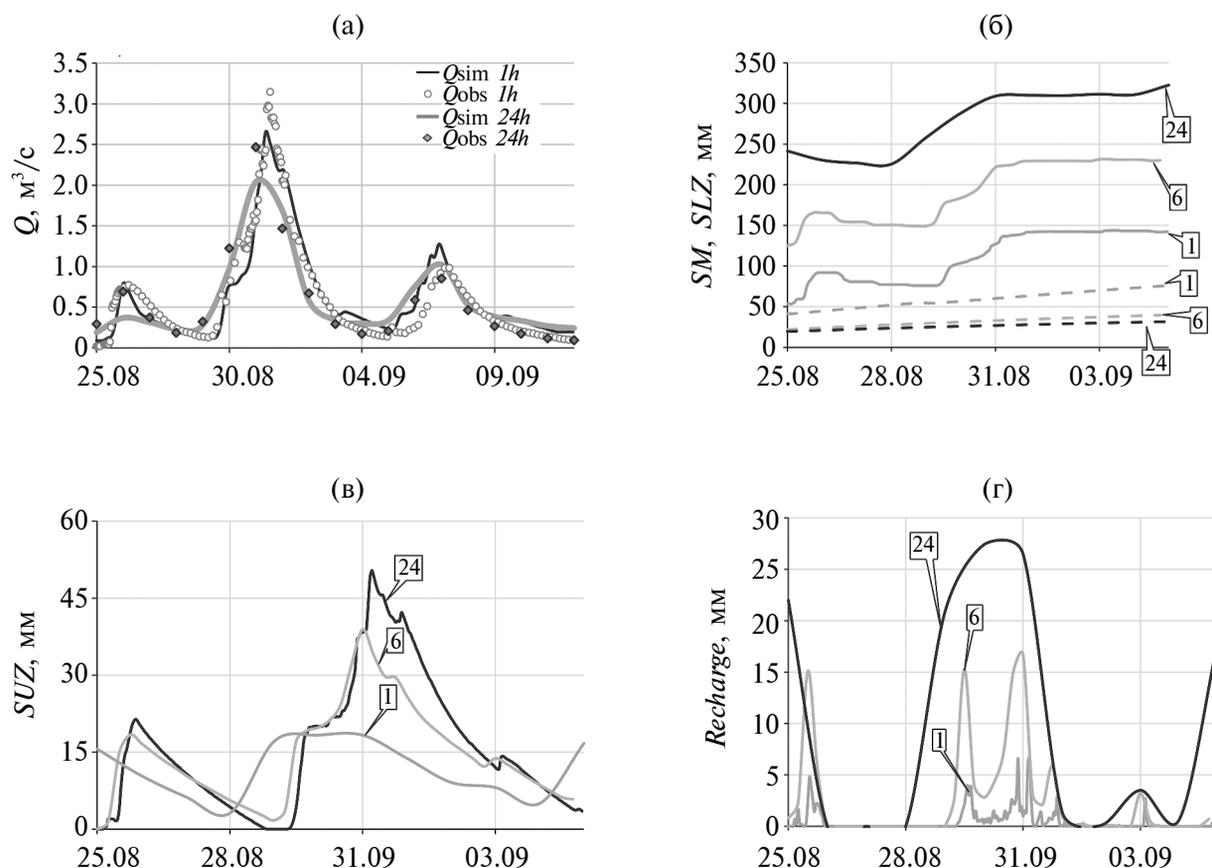


Рис. 3. Динамика: а – измеренных (Q_{obs}) и рассчитанных (Q_{sim}) расходов 1–24-часового разрешения (1 и 24 ч соответственно), б – влагозапаса концептуальной почвенной емкости (SM , линии) и емкости $S2$ (SLZ , пунктир), в – влагозапаса емкости $S1$ (SLZ , пунктир), г – пополнения емкости $S1$ ($Recharge$) 1-, 6- и 24-часового разрешения (указано в сносках) для руч. Медвежьего за период прохождения выдающегося паводка 2016 г.

гидрографов измеренного и рассчитанного стока, динамики влагозапаса емкости (SM), ее пополнения ($Recharge$), а также верхней и нижней стокоформирующих емкостей (SUZ и SLZ) за период выдающегося паводка 2016 г. представлен на (рис. 3). С уменьшением расчетного шага значения измеренных и смоделированных расходов воды (m^3/c) увеличиваются, появляется заметное расхождение по времени между максимумами, а абсолютные значения переменных состояния модели снижаются.

Изменение полученных в результате калибровки при разных расчетных шагах значений параметров модели достаточно хорошо описывается степенными зависимостями. Для параметров блока формирования стока (FC , LP , $BETA$, $PERC$ и HL) (рис. 4) некоторые из этих зависимостей (в основном для водосборов с меньшей площадью) могут существенно отклоняться от общей области изменения, например FC и LP для Березового (рис. 4), $PERC$ для Елового, $BETA$ для Медвежьего. Значения пороговой величины HL (рис. 4), при которой начинает формироваться быстрый (поверхностный)

сток, для часового расчетного интервала близки (15–22 мм) для всех водосборов. Для суточного расчетного шага амплитуда значений HL составляет 23–50 мм.

С увеличением расчетного шага и абсолютных величин вертикальных потоков (мм) значения коэффициентов рецессии $K0$ и $K1$ также существенно возрастают от минимальных $0.01 < K0 < 0.05$ при расчетном шаге 1 ч до 0.5 (Березовый, Еловый) и 0.8 (Медвежий, Правая Соколовка) при моделировании с суточным временным разрешением (рис. 4). Значения параметра $K2$, полученные для водосборов Елового и Березового (0.01–0.23), практически на порядок больше (0.001–0.12), чем для водосборов Медвежьего и Правой Соколовки. Максимальные значения параметра $MAXBAS$ (основание треугольной трансформационной функции) при моделировании с суточным разрешением составляют 57–69 ч. При уменьшении расчетного шага значение $MAXBAS$ практически линейно уменьшается до 1–8 ч, что примерно соответствует данным региональных исследований о времени реакции склона на осадки [3, 6].

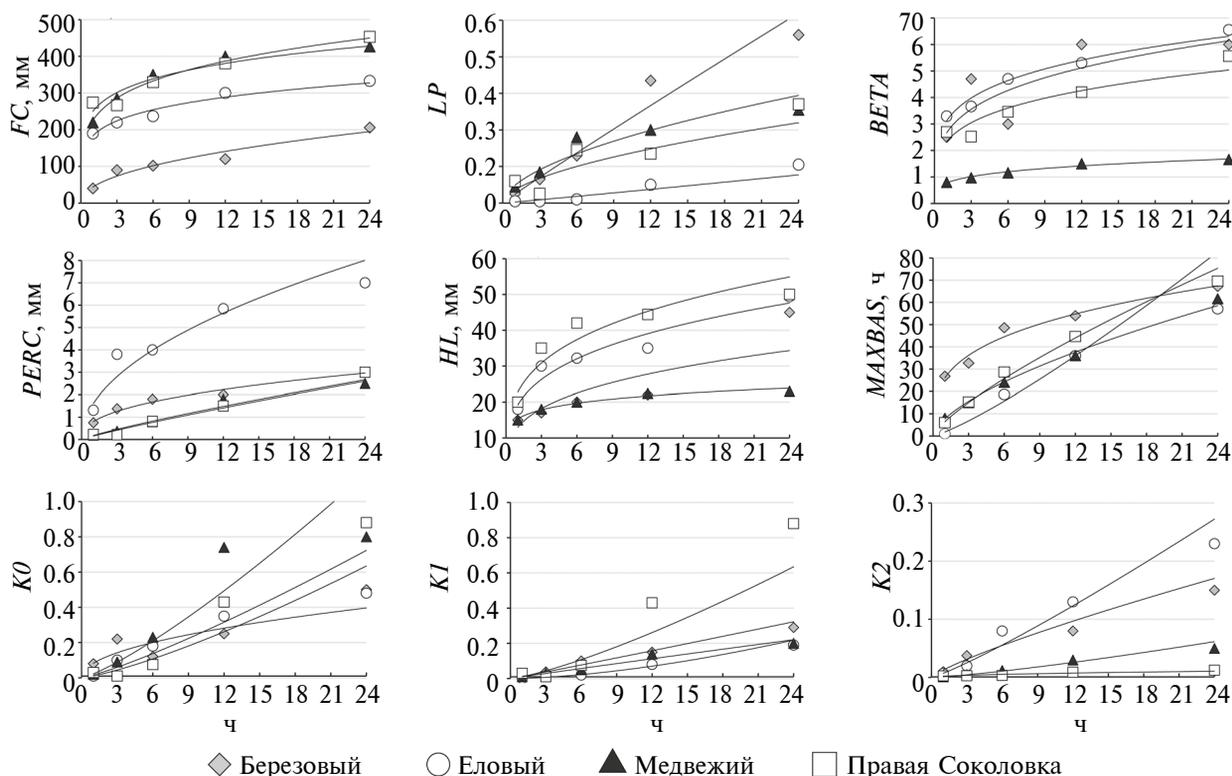


Рис. 4. Зависимости откалиброванных значений параметров HBV от шага по времени.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характерная особенность малых рек Приморья – хорошо выраженные внутрисуточные колебания расходов воды в меженные периоды с минимумом днем и максимумом в ночные часы [3], преимущественно связанные с интенсивностью эвапотранспирации [8]. Подобные колебания расходов воды (0.1–1.0 мм слоя) при расчетном шаге 1, 3 и частично 6 ч модель не смогла воспроизвести ни на одном из водосборов. При этом динамика входных рядов *PET* и рассчитанного *AET* имеет хорошо выраженный внутрисуточный ход. Из этого можно заключить, что основной источник ошибок при расчете меженного стока – недостаточная точность и репрезентативность измерений метеоэлементов, входящих в уравнения расчета испарения, а также учет влияния биотических факторов приповерхностного влагооборота на речной сток [3]. При формировании высоких паводков объем стока значительно превышает потери [5, 7], эффективность моделирования паводковых событий существенно возрастает, и расчетные гидрографы паводковых сезонов достаточно хорошо соответствуют данным измерений.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что эффективность модели *HBV* и полученные в результате калибровки ее параметры связаны с расчетным шагом по времени. Параметры модели, которые принято связывать с гидрологическими характеристиками водосбора, в целом, остаются в интервале физически обоснованных величин. Увеличение расчетного интервала ведет к закономерному увеличению вертикальных потоков (мм) в модели и снижению интенсивности (мм/с) влагообмена. В первую очередь это относится к параметрам блока образования стока и влагоемкостным характеристикам речного бассейна. Очевидно, что гидрофизические характеристики почвы мало изменяются во времени и для рассматриваемых временных масштабов могут считаться постоянными, при этом соответствующие параметры модели *HBV* демонстрируют достаточно четкие связи с временным шагом моделирования, которые хорошо описываются степенными зависимостями с показателями 0.3–0.6 (рис. 4).

Полученные зависимости могут нарушаться для малых водосборов, что в целом соответствует результатам предыдущих исследований, в которых на основе химического анализа и гидрологического моделирования достоверно показано, что для расположенных рядом объектов исследования процессы формирования стока не являются гидрологически подобными, и параметры различных моделей не могут переноситься по принципам географической близости на соседние водосборы [10, 18]. Например, значения параметра *FC*, по смыслу близкого к полевой влагоемкости почвы, полученные для водосборов руч. Медвежьего и р. Правая Соколовка, достаточно близки и находятся в диапазоне 220–450 мм, для руч. Елового – 190–330 мм, что может быть сравнимо с имеющимися данными о влагоемкостных характеристиках почв [1]. Для руч. Березового значения *FC* заметно ниже (40–206 мм), что объясняется различиями характеристик подстилающей поверхности водосбора [10, 18].

При изменении расчетного шага моделирования динамика компонентов стока также

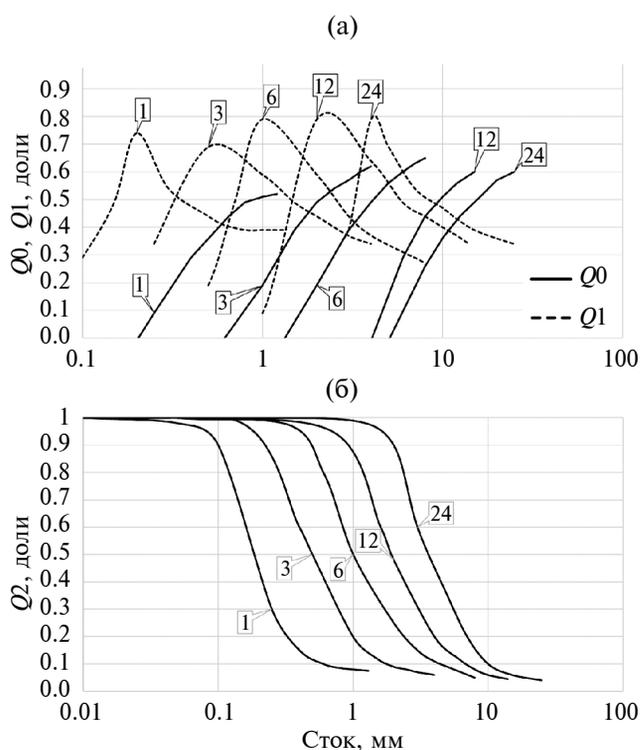


Рис. 5. Распределение модельных компонентов стока от расхода в замыкающем створе (мм) для руч. Медвежьего: а – поверхностного (Q_0) и почвенного (Q_1); б – грунтового (Q_2) стока. В сносках показаны значения расчетного шага по времени.

подчинена закономерностям, выражающимся в наличии характерных пороговых диапазонов расходов воды, достижение которых связано с изменением режима стокоформирования. На рис. 5 для всех расчетных шагов показаны обобщенные кривые долей модельных компонентов стока в расчетном гидрографе, для построения которых в качестве исходных данных использовался смоделированный сток в замыкающем створе и формирующие его компоненты — Q_0 , Q_1 , Q_2 (поверхностный, почвенный и грунтовый соответственно).

В период межени сток формируется в основном грунтовыми водами (Q_2). При средних условиях увлажнения доля грунтовых вод постепенно снижается до минимума, одновременно возрастает доля почвенного стока Q_1 . Поверхностный сток Q_0 появляется при достижении пороговой величины HL влагозапаса емкости S_1 , его доля растет до наступления пика расхода. Доли генетических компонентов, при которых водосбор переходит из одного режима формирования стока в другой, остаются относительно постоянными. В то же время характерные пороговые значения постепенно, приблизительно двукратно увеличиваются при возрастании расчетного шага моделирования от 1 до 24 ч.

Снижение доли грунтовых вод и начало формирования почвенного стока для водосборов площадью 3.1–3.5 км² при различных расчетных шагах наблюдаются при достижении расходов 0.4–3.0 мм. Для водосборов с площадью 7.6–26.3 км² диапазон уменьшается до 0.05–2.0 мм. Максимальное абсолютное значение Q_1 , при котором происходит формирование поверхностного стока, для этих же водосборов составляет 1.3–8.0 и 0.1–5.0 соответственно. Точка пересечения графиков долей стока Q_0 и Q_1 , соответствующая переходу к доминированию поверхностного стока и формированию высоких паводков, для всех расчетных шагов моделирования остается приблизительно постоянной — 0.45–0.5. В то же время при увеличении расчетного шага по времени от 1 до 24 ч абсолютные значения модельных расходов воды (мм) увеличиваются в ~2 раза (рис. 5). В целом, полученные соотношения долей генетических компонентов стока согласуются с региональными представлениями о сто-

коформировании и результатами ранее выполненных исследований, в которых также делается вывод о существовании особого, критического расхода воды в замыкающем створе, который отражает наполнение условных бассейновых емкостей и начало формирования поверхностного стока на водосборе [2, 9, 11].

Полученные степенные зависимости для параметров модели хорошо коррелируют с распределением максимальной интенсивности осадков для различных интервалов агрегации данных наблюдений. В течение сильных дождей сумма осадков за сутки может достигать 100 мм и более, при этом сумма осадков за час обычно не превышает 20–30 мм. Связь максимальных измеренных сумм осадков с временным шагом для дождей ≥ 20 мм/сут за весь период наблюдений (2011–2022 гг.) по аналогии с параметрами модели также может быть описана степенной зависимостью с показателем 0.3–0.6 (рис. 6). Таким образом, можно предположить, что наличие зависимости максимума осадков наиболее интенсивных дождей от интервала агрегации данных оказывает существенное влияние на значения параметров концептуальных моделей типа HBV. Этим же эффектом может быть объяснен противоречивый результат ранее проведенных исследований, когда значения параметров гидрологических моделей для разных физико-географических условий могут быть как связаны [19, 21, 24, 38], так и не связаны с расчетным шагом по времени [28, 33, 37]. Если описанные выше связи между суммами осадков максимальной интенсивности для разных расчетных интервалов существуют, то параметры модели при переходе от базового суточного шага к более дробной дискретизации данных

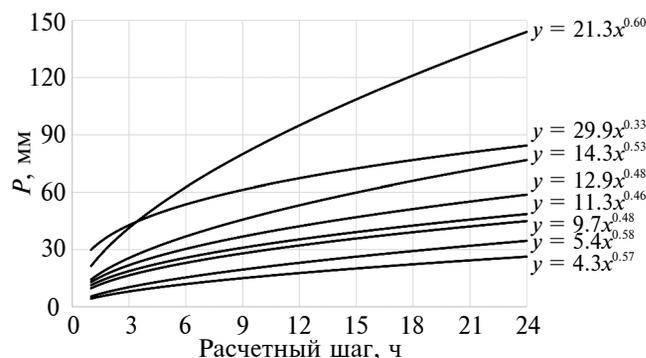


Рис. 6. Обобщенные зависимости максимальных измеренных сумм осадков P от временного шага для дождей ≥ 20 мм/сут.

по времени, вероятно, будут изменяться подобным образом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что эффективность модели HBV и полученные с помощью ее калибровки параметры связаны с расчетным шагом по времени. В целом, с уменьшением расчетного шага по времени эффективность моделирования постепенно снижется. Для всех исследуемых водосборов в период межени модель не воспроизводит внутрисуточные колебания расходов воды (0.1–1.0 мм слоя), что связано с точностью и репрезентативностью данных измерений метеоэлементов, входящих в уравнения расчета эвапотранспирации. Соотношение долей генетических компонентов стока, при котором водосбор переходит к доминированию поверхностной составляющей (формирование паводка), не зависит от расчетного шага и относительно постоянно для всех исследуемых водосборов. В то же время при последовательном увеличении расчетного шага по времени абсолютные значения всех модельных компонентов стока (мм) также последовательно увеличиваются в ~2 раза. Зависимости параметров блока формирования и трансформации стока HBV, а также максимальных измеренных сумм осадков от временного шага для дождей ≥ 20 мм/сут хорошо описываются степенными функциями с показателями 0.3–0.6. Это дает основание предположить, что для района исследований зависимость максимальных сумм осадков высокой интенсивности от временного интервала агрегации данных наблюдений может влиять на значения параметров моделей типа HBV.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаец А.Н., Пшеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Лупаков С.Ю., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Гончуков Л.В., Голодная О.М., Краснопеев С.М., Кожевникова Н.К. Цифровое почвенное картографирование для целей гидрологического моделирования на примере экспериментальных водосборов (юг Приморского края) // Почвоведение. 2021. Т. 55. № 9. С. 1085–1096.
2. Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 223 с.
3. Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. С. 589–599.
4. Гарцман Б.И., Шамов В.В., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Бугаец А.Н., Кожевникова Н.К., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н., Пшеничникова Н.Ф., Гончуков Л.В. Условия формирования стока: комплексные исследования на экспериментальных водосборах в верховьях р. Уссури // ДАН. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 2. С. 127–133.
5. Гарцман Б.И., Шамов В.В., Третьяков А.С. Система водно-балансовых моделей малого речного бассейна // География и природ. ресурсы. 1993. № 3. С. 27–36.
6. Гарцман И.Н., Лыло В.М., Черненко В.Г. Паводочный сток рек Дальнего Востока. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 264 с.
7. Горчаков А.М. Исследование элементов водного баланса и его структуры в Приморье. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 182 с.
8. Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Рубцов А.В., Кожевникова Н.К. Возможности оценивания бассейновой транспирации на основе измерения стволового сокодвигания: постановка задачи // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. № 4. С. 504–532.
9. 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.
10. Лупаков С.Ю., Бугаец А.Н., Шамов В.В. Оценка параметров гидрологической модели HBV по данным полевых наблюдений на экспериментальных водосборах (юг Приморского края) // География и природ. ресурсы. 2022. Т. 43. № 3. С. 158–166.
11. 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. № 4. С. 417–426.
12. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration: Guide-lines for computing crop water requirements. Rome, Italy: FAO-56, 1998. 300 p.
13. Atkinson S.E., Woods R.A., Sivapalan M. Climate and landscape controls on water balance model complexity over changing landscapes // Water Resour. Res. 2002. V. 38 P. 1314.
14. Bastola S., Murphy C. Sensitivity of the performance of a conceptual rainfall-runoff model to the temporal

- sampling of calibration data // *Hydrol. Res.* 2013. V. 44 (3). P. 484–494.
15. Bergstrom S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Norrköping, Sweden: SMHI, 1976. 134 p.
16. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: a review // *Hydrol. Processes.* 1995. V. 9. P. 251–290.
17. Brighenti T.M., Bonuma N.B., Srinivasan R., Chaffe P.L.B. Simulating sub-daily hydrological process with SWAT: a review // *Hydrol. Sci. J.* 2019. V. 64. P. 1415–1423.
18. Bugaets A., Gartsman B., Gubareva T., Lupakov S., Kalugin A., Shamov V., Gonchukov L. Comparing the runoff decompositions of small experimental catchments: end-member mixing analysis (EMMA) vs. Hydrological modelling // *Water.* 2023. V. 15. P. 752–774.
19. Cullmann J., Mishra V., Peters R. Flow analysis with WaSiM-ETH – Model parameter sensitivity at different scales // *Advances in Geosci.* 2006. V. 9. P. 73–77.
20. Fichi A., Perrin C., Andreassian V. Impact of temporal resolution of inputs on hydrological model performance: An analysis based on 2400 flood events // *J. Hydrol.* 2016. V. 538. P. 454–470.
21. Finnerty B.D., Smith M.B., Seo D.J., Koren V., Moglen G.E. Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs // *J. Hydrol.* 1997. V. 203 (1–4). P. 21–38.
22. Fuentes-Andino D., Hundedeha Y., Lindstrom G., Olsson J. Exploring the potential for parameter transfer from daily to hourly time step in the HYPE model for Sweden // *Hydrol. Sci. J.* 2022. V. 67. P. 1988–2001.
23. Haddeland I., Lettenmaier D.P., Skaugen T. Reconciling simulated moisture fluxes resulting from alternate hydrologic model time steps and energy budget closure assumptions // *J. Hydrometeorol.* 2006. V. 7 (3). P. 355–370.
24. Jie M.-X., Chen H., Xu C.-Y., Zeng Q., Chen J., Kim J.-S., Guo S., Guo F.-Q. Transferability of conceptual hydrological models across temporal resolutions: approach and application // *Water Resour. Management.* 2018. V. 32 (4). P. 1367–1381.
25. Kandel D.D., Western A.W., Grayson R.B. Scaling from process timescales to daily time steps: A distribution function approach // *Water Resour. Res.* 2005. V. 41 (2). P. 1–16.
26. Kavetski D., Fenicia F., Clark M.P. Impact of temporal data resolution on parameter inference and model identification in conceptual hydrological modeling: Insights from an experimental catchment // *Water Resour. Res.* 2011. V. 47 (5). W05501.
27. Krajewski W.F., Lakshmi V., Georgakakos K.P., Jain S.C. A Monte Carlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model // *Water Resour. Res.* 1991. V. 27 (1). P. 119–128.
28. Littlewood I.G., Croke B.F.W. Data time-step dependency of conceptual rainfall–streamflow model parameters: an empirical study with implications for regionalization // *Hydrol. Sci. J.* 2008. V. 53 (4). P. 685–695.
29. Morel-Seytoux H.J. Soil aquifer stream interactions – a reductionist attempt toward physical-stochastic integration // *J. Hydrol.* 1988. V. 102. P. 355–379.
30. 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. № 3. P. 885–900.
31. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: Pt I. A discussion of principles // *J. Hydrol.* 1970. V. 10. P. 282–290.
32. Paschalis A., Fatichi S., Molnar P., Rimkus S., Burlando P. On the effects of small scale space-time variability of rainfall on basin flood response // *J. Hydrol.* 2014. V. 514. P. 313–327.
33. Reynolds J.E., Halldin S., Xu C.Y., Seibert J., Kauffeldt A. Sub-daily runoff predictions using parameters calibrated on the basis of data with a daily temporal resolution // *J. Hydrol.* 2017. V. 550. P. 399–411.
34. Seibert J. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2000. V. 4. P. 215–224.
35. 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.
36. Shuai P., Chen X., Mital U., Coon E.T., Dwivedi D. The effects of spatial and temporal resolution of gridded meteorological forcing on watershed hydrological responses // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2022. V. 26. P. 2245–2276.
37. Wang Y., He B., Takase K. Effects of temporal resolution on hydrological model parameters and its impact on prediction of river discharge // *Hydrol. Sci. J.* 2009. V. 54 (5). P. 886–898.
38. Wawrzyniak T., Osuch M., Nawrot A., Napiorkowski J.J. Run-off modelling in an Arctic unglaciated catchment (Fuglebekken, Spitsbergen) // *Annals Glaciol.* 2017. V. 58. P. 36–46.
- Woolhiser D.A., Goodrich D.C. Effect of storm rainfall intensity patterns on surface runoff // *J. Hydrol.* 1988. V. 102. P. 335–354.