

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 551.4:571.6

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУР МОДЕЛИ НВВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВОДОСБОРОВ¹

© 2021 г. С. Ю. Лупаков^{a, b, *}, А. Н. Бугаец^{a, b}, В. В. Шамова^a

^aТихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия

^bИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: rbir@mail.ru

Поступила в редакцию 01.09.2020 г.

После доработки 08.10.2020 г.

Принята к публикации 20.12.2020 г.

Изложен опыт применения гидрологической концептуальной модели НВВ, включая основную версию и ее модификации, для исследования процессов стокоформирования на малых экспериментальных водосборах в верховьях р. Уссури на основе данных полевых наблюдений в теплый период года, выполненных с 2012 по 2019 г. Показано, что во многих случаях, независимо от структуры модели, качество расчетов оказалось удовлетворительным, паводковые события рассчитаны с высоким качеством. Выявлено, что все использованные версии модели НВВ имеют общие и индивидуальные недостатки. Продемонстрирована разница структур модели и их влияние на рассчитанный сток в замыкающем створе. Внедрение дополнительных блоков в модель не вызвало прироста эффективности расчетов стока. Стандартная структура НВВ признана оптимальной с точки зрения соответствия природным процессам формирования стока и качества моделирования стока малых горных рек.

Ключевые слова: экспериментальные водосборы, НВВ, структура модели, стокоформирование.

DOI: 10.31857/S032105962104012X

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие между климатом, рельефом, почвенными процессами и растительным покровом создает сложную картину пространственно-временной неоднородности инфильтрации, испарения и стока. Наряду с получением новых экспериментальных данных перспективы в исследовании формирования стока связаны с развитием математических моделей, в структуре которых были бы учтены существующие представления об этих процессах и которые в полной мере могли бы усвоить имеющиеся данные наблюдений в конкретном речном бассейне [4].

К настоящему времени накоплен большой опыт в области моделирования гидрологических систем, однако остается до конца не выясненным то, как функционирует водосбор в целом [22]. Обзор существующих подходов и критический анализ проблем в области моделирования стока подробно изложен в [1, 6, 10]. Среди основных сложностей обычно упоминается недостаток знаний о природе стока, высокая пространственно-

временная динамика метеорологических условий, невозможность прямого задания большинства параметров с пространственным разрешением модельных элементов.

Структура модели также может быть источником критичной неопределенности [13, 17]. Полевые исследования и результаты моделирования показывают, что речные водосборы при разных начальных условиях могут по-разному реагировать на метеорологические воздействия, включение отдельных частей бассейна в процесс стокоформирования происходит неодновременно [3, 15].

Выбор гидрологической модели в качестве инструмента исследования обычно проводится в условиях значительной неопределенности и недостатка объективных критериев этого выбора [20]. Поиск оптимальной структуры модели формирования стока на речных бассейнах достаточно больших размеров обычно затруднен ввиду неоднородности ландшафтного строения, а неоднородность метеорологического воздействия влияет на процессы формирования стока даже в масштабе небольшого водосбора [11]. Существующие критерии качества моделирования не в полной мере отражают соответствие модели реальным

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 17-77-30006) и РФФИ (проект 19-05-00326).

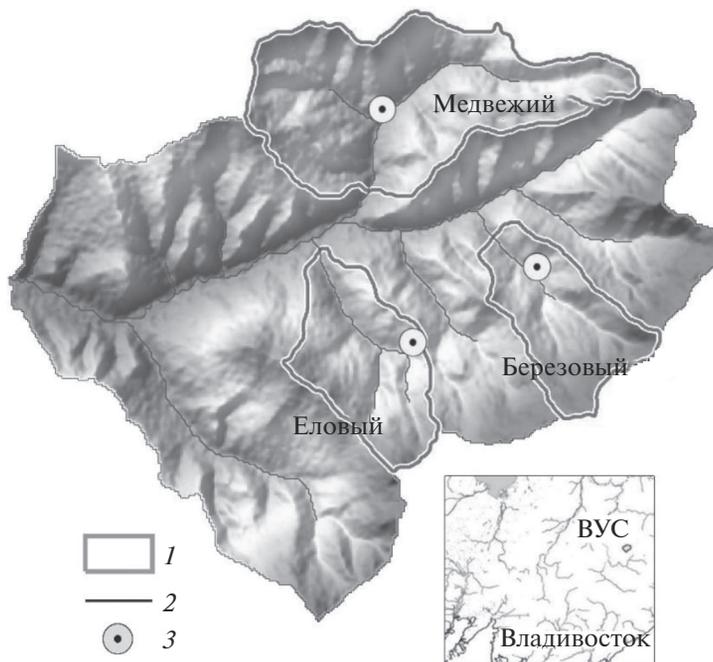


Рис. 1. Картограмма исследуемой территории Верхнеуссурийского стационара (ВУС). 1 – границы экспериментальных водосборов, 2 – речная сеть, 3 – метеостанция.

процессам [24, 27]. В этом причина тестирования большого количества моделей с различной структурой в попытке найти наиболее пригодную для решения определенных задач [14, 18, 26].

В данном исследовании применены четыре версии концептуальной гидрологической модели HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) для оценки их соответствия имеющимся априорным представлениям о стокоформировании на малых экспериментальных водосборах на юге Дальнего Востока. Оценена эффективность моделирования, выполненного с помощью различных версий HBV. Даны интерпретации результатов с точки зрения имеющихся представлений о формировании стока. Показаны преимущества и недостатки версий модели применительно к объектам исследования.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Объекты моделирования – малые речные водосборы в верховьях р. Уссури – ручьи Березовый (3.6 км²), Еловый (3.5 км²) и Медвежий (7.6 км²) (рис. 1). Исследуемая территория относится к Верхнеуссурийскому биоценологическому стационару ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (44°02′ с.ш., 134°11′ в.д.). Климат района определяется влиянием восточноазиатского внутритропического муссона. Среднегодовая, минимальная и максимальная темпера-

тура воздуха составляет соответственно +0.7°С, –45°С (январь–февраль) и +38°С (июль–август). Среднегодовое количество атмосферных осадков 750–800 мм, большая часть (до 80%) выпадает в теплый период года (апрель–октябрь). Суточные максимумы осадков достигают 100 мм и обычно связаны с активностью тропических циклонов и тайфунов, приходящих на территорию Приморского края преимущественно во второй половине лета. Высота снежного покрова обычно ≤1 м, максимальная глубина промерзания почвы составляет 1.25 м.

Рельеф – среднегорный с амплитудой высот 500–1100 м. В нижних частях изучаемые водосборы покрыты хвойно-широколиственными лесами; здесь распространены буроземы, сформированные на склоновом делювии, и пойменные почвы на аллювиальных отложениях. В верхних частях водосборов преобладают темнохвойные леса, где на элювиальных и элювиально-делювиальных отложениях на вершинах и склонах преобладают ржавоземы грубогумусовые иллювиально-гумусированные типичные и оподзоленные.

Подземные воды получают питание за счет инфильтрации атмосферных осадков на склонах, иногда выходят на поверхность в понижениях рельефа в виде родников. Глубокие грунтовые воды в основном трещинные.

Долины ручьев Елового и Березового – узкие и глубокие с фрагментами надпойменной террасы

и крутыми (до 30°–35°) выпуклыми склонами, изредка прорезанными глубокими эрозионными ложбинами. Сформированы на тектоническом контакте юрских и триасовых отложений, представленных песчаниками, гравелитами, конгломератами, алевролитами и силикатами. Верхняя часть водосборов сложена более молодыми позднемеловыми породами.

Водосбор руч. Медвежьего имеет более однородный ландшафт, почвенный покров большой мощности [7], при этом он быстрее реагирует на выпадающие осадки в сравнении с другими объектами. При высокой инфильтрационной способности сильнокаменистых почв предполагается, что часть осадков может питать грунтовые воды, вносящие вклад в гидрограф замыкающего створа [5]. Течение воды непосредственно по поверхности склонов наблюдается только при очень интенсивных осадках. В [5, 12] показано, что доля поверхностных вод при моделировании может быть достаточно высокой при прохождении паводков. Эта часть быстрого стока формируется системой внутрипочвенных дрен [2].

Исходными послужили данные полевых наблюдений за элементами приземного влагооборота, проведенных в теплый период (конец мая – начало октября) 2012–2019 гг. Устья ручьев были оборудованы автоматическими цифровыми регистраторами уровня воды “Levelogger Junior Solinst” с 15-минутным разрешением измерений. Расходы воды измерялись вручную с применением электромагнитного измерителя скорости потока “FlowSens SEBA”. Ряды суточных расходов воды получены с помощью кривых связи расхода и уровня.

Метеорологические параметры (температура и влажность воздуха, осадки, солнечная радиация, скорость ветра) измерены с 15-минутным разрешением с помощью трех автоматических метеостанций “WS-GP1” “Delta-T”. Метеостанции устанавливались на каждом водосборе на высотах: 650 (Березовый), 670 (Еловый), 550 м (Медвежий). В холодный период года были использованы материалы наблюдений метеостанции ВМО 31939 (Чугуевка) Приморского УГМС, расположенной в 35 км от исследуемых водосборов.

МОДЕЛЬ HBV

Модель HBV разработана в Швеции в 1970-х гг. [9], широко использовалась более чем в трех десятках стран, это часть гидрологической многоцелевой системы Всемирной Метеорологической Организации. Модель включает в себя три основных модуля: формирования и таяния снежного покрова, динамики влаги в почве и испарения, формирования и трансформации стока. Входные данные – атмосферные осадки, температура воз-

духа и потенциальная эвапотранспирация. Ниже дано краткое описание модели.

Основа блока расчета снега – метод градусодней [23]. Жидкие осадки и стаявший снег пополняют влагозапас концептуальной почвенной емкости в зависимости от ее текущего влагосодержания SM (мм), максимального влагосодержания FC (мм), а также коэффициента $BETA$:

$$recharge/p(t) = (SM(t)/FC)^{BETA}, \quad (1)$$

где $recharge$ – пополнение емкостей, мм/сут; $p(t)$ – осадки, мм/сут.

Испарение определяется соотношением SM/FC : если оно выше параметра LP , то действительное испарение E_{act} (мм/сут) равно потенциальному E_{pot} (мм/сут), в ином случае расчет происходит в соответствии с

$$E_{act} = E_{pot} \min \{ (SM(t)/(FC LP)), 1 \}. \quad (2)$$

Испарение может быть скорректировано параметром Set , линейно связанным с температурой воздуха. Динамика наполнения нижней емкости определяется коэффициентом $PERC$.

Различия версий модели, реализованных в HBV-light, заключаются в структуре емкостей, с помощью которых происходит формирование стока в замыкающем створе (рис. 2). Отток из всех емкостей версий St1, St2, St3 описывается линейным уравнением вида:

$$Q_n(t) = K_n S(t), \quad (3)$$

из емкости S1 версии StD отток описывается так:

$$Q_1(t) = \min(K_1 S_1(t)^{1+\alpha}), \quad (4)$$

где t – время, сут; Q_n – отток из емкости, мм/сут; K_n – коэффициент истощения, $S(t)$ – текущая величина влагозапаса в емкости, мм; α – калибруемый параметр. Сумма оттоков из стокоформирующих емкостей – это слой воды, сгенерированный моделью на каждый расчетный шаг, который затем трансформируется в гидрограф в замыкающем створе уравнением:

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i=1}^{MAXBAS} c(i) Q_{sum}(t - i + 1), \quad (5)$$

где Q_{sim} – расчетный слой стока в замыкающем створе, Q_{sum} – суммарный слой стока за время $(t - i + 1)$, i – расчетный шаг, $c(i)$ – функция бассейновой трансформации [25], $MAXBAS$ – параметр добегаания, сут.

В работе использованы четыре версии модели, обозначенные как St1, St2, St3 и StD (рис. 2). Для всех версий используются одинаковые процедуры описания процессов накопления и таяния снежного покрова, расчета потерь влаги, поступившей на поверхность водосбора, на пополнение влагозапаса бассейна и испарение. Разница в

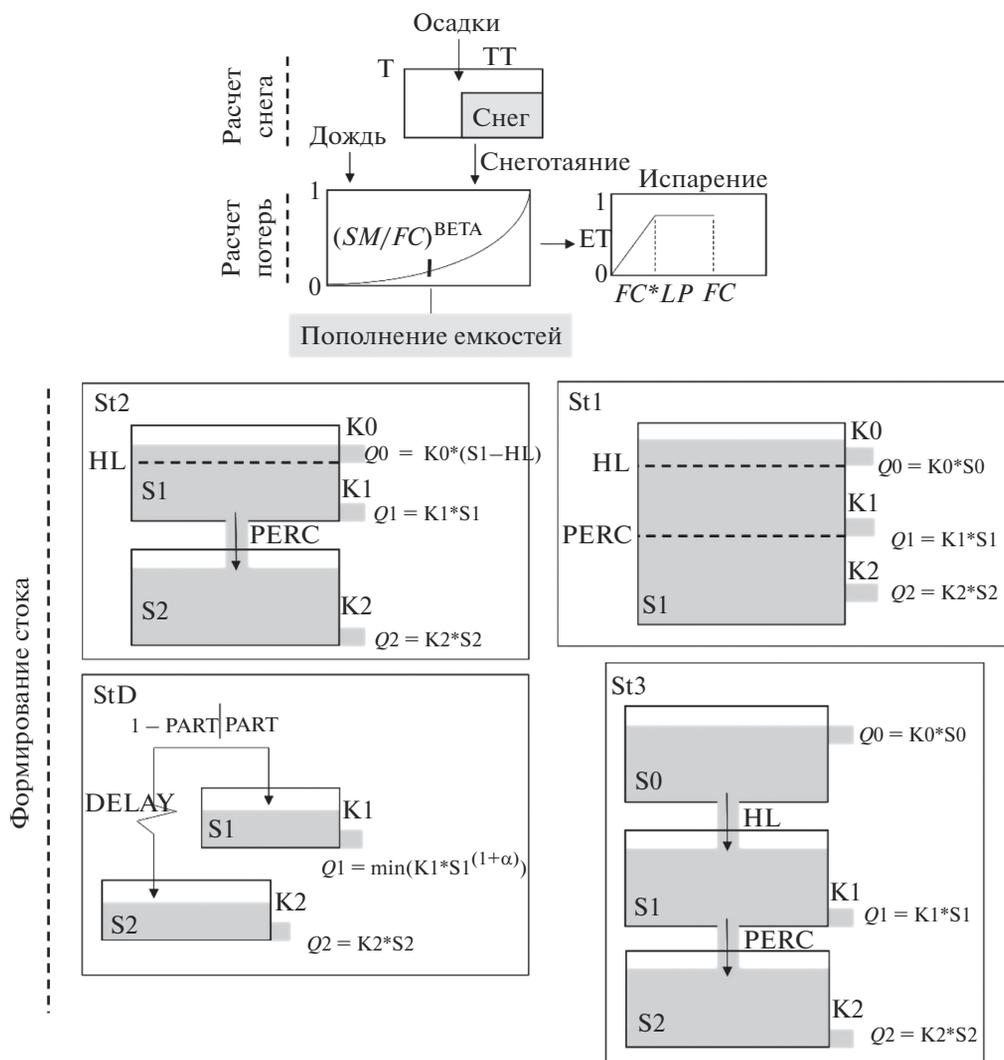


Рис. 2. Схематичное изображение структуры различных версий HBV.

вариантах модели HBV заключается в количестве емкостей, особенностях организации их взаимодействия и внутренней структуры. Модель может использовать три вида стока – Q_0 , Q_1 , Q_2 , которые, как правило, интерпретируются как поверхностный (“surface runoff”), внутрипочвенный (“interflow”) и грунтовый сток (“baseflow”) соответственно [16]. Параметры PERC и HL позволяют перераспределять воду между емкостями и изменять реакцию емкостей.

St1 – наиболее простая версия, формирование стока происходит с помощью одной емкости и двух пороговых значений. Сток Q_2 осуществляется всегда, когда в емкости есть влага; после достижения влагозапаса емкости порогового значения PERC (мм) начинает формироваться сток Q_1 ; в случае дальнейшего наполнения и достижения влагозапаса емкости порогового значения HL (мм) появляется третий вид стока Q_0 .

St2 – универсальная структура HBV, состоит из двух емкостей. В отличие от St1, параметр PERC не пороговое значение, а представляет собой поток (мм/сут), пополняющий нижнюю емкость, из которой формируется сток Q_2 . Динамика верхней емкости связана с оттоками Q_1 и Q_0 , последний формируется только по достижению влагозапаса порогового значения HL (мм). Отличие структуры St2 от St1 заключается в генерировании компонентов стока Q_1 и Q_2 без предварительного полного наполнения нижней емкости.

St3 – наиболее приближена к модели формирования стока в почвенной колонке, состоит из трех емкостей, которые в общем случае можно интерпретировать как почвенные горизонты (A, B и C). Параметры PERC и HL – потоки (мм/сут), пополняющие емкости S2 и S1 соответственно; если приход влаги больше суммы PERC и HL, пополняется верхняя емкость S0. Отток из каждого

элемента не связан со степенью наполнения нижележащих емкостей.

StD – использует две емкости, одна из которых предназначена для моделирования быстрого подповерхностного стока и имитирует неглубокие подземные воды, вторая емкость предназначена для имитации глубокого подземного питания [27]. Приходящая влага разделяется по емкостям в зависимости от параметра PART. Вода поступает в нижнюю емкость S2 с задержкой DELAY (сут). Сток Q2 генерируется аналогично другим структурам, сток Q1 рассчитывается с помощью степенной зависимости (параметр α).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование выполнено с суточным шагом по времени с помощью интерфейса HBV-light [25]. Потенциальное испарение рассчитано отдельно методом Пенмана–Монтейса. Периоды моделирования установлены исходя из наличия синхронных наблюдений за стоком и метеопараметрами для ручьев Елового – 2011–2014 гг., Медвежьего – 2014–2017 гг., Березового – 2015–2019 гг. соответственно. Для минимизации влияния начальных условий на результаты моделирования расчеты за первый год исключены из анализа. Таким образом, анализ результатов дается на основе ограниченного количества данных, не превышающего 4 лет для каждого водосбора.

Калибровка параметров выполнена вручную. Расчетные и модельные гидрографы представлены на рис. 3. Для оценки эффективности моделирования использованы данные измерений расходов воды в замыкающих створах. В качестве оценок использованы общепринятые критерии: коэффициент детерминации R^2 , коэффициент Нэша–Сатклифа NSE [21] и относительное смещение BIAS (табл. 1). Согласно [19], результаты расчетов “очень хорошие” при $NSE > 0.75$, “хорошие” при $0.65 < NSE < 0.75$, “удовлетворительные” при $0.50 < NSE < 0.65$ и “неудовлетворительные” при $NSE < 0.50$. Результаты моделирования при $BIAS < 10\%$ считаются “очень хорошими”, “хорошими” при $10 < BIAS < 15\%$, “удовлетворительными” при $15 < BIAS < 25\%$ и “неудовлетворительными” при $BIAS > 25\%$.

По указанным выше критериям (табл. 1) для руч. Березового результаты всех версий модели попадают в градацию “удовлетворительно” и лучше (за исключением 2016 г. по критерию BIAS). При моделировании стока руч. Елового с помощью версии St1 не удалось воспроизвести сток ни в один из анализируемых сезонов. Остальные расчеты попадают в категорию “удовлетворительно”. Для руч. Медвежьего качество частично “неудовлетворительно” по NSE, по BIAS – от “удовлетворительно” и лучше.

Анализ результатов моделирования позволяет заключить, что HBV лучше воспроизводит гидрографы стока многоводных лет, содержащих значительные паводки (2012 и 2016 гг.). В течение маловодных сезонов сток в значительной мере контролируется процессами эвапотранспирации, объем испарения с водосбора может в несколько раз превышать объем стока и рассчитывается с большой степенью неопределенности. Значения общих для всех версий параметров (FC , LP , $BETA$, Set) и совпадающие по смыслу коэффициенты рецессии значительно варьируют между версиями модели.

Полученные в процессе калибровки параметры (табл. 2) свидетельствуют о значительной разнице между водосборами, расположенными на расстоянии всего 2–5 км друг от друга. Результаты моделирования подтвердили высказанные ранее предположения о существенном отличии руч. Елового от соседних по характеру формирования стока: значения параметров коэффициентов рецессии, FC и $BETA$ отличаются в несколько раз. Значение параметра MAXBAS, отражающего трансформацию стока русловой сетью водосбора руч. Елового с наименьшей площадью из представленных, в 1.5–3 раза больше, чем для соседних объектов и достигает 4.2 сут. Подобное отличие можно объяснить сложным гидрогеологическим строением водосбора руч. Елового [8].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе только критериев эффективности (табл. 1) не представляется возможным сделать обоснованное заключение о преимуществе определенной структуры модели и/или степени ее ответственности имеющимся представлениям о формировании стока.

Версия St1 с одной стокообразующей емкостью оказалась более эффективной для водосбора руч. Березового по сравнению с другими версиями. В то же время для руч. Елового St1 дает отрицательные критерии эффективности моделирования и отличается неадекватным расчленением сезонного гидрографа стока на генетические составляющие. Для достаточно однородного по ландшафтным условиям водосбора руч. Медвежьего St1 не показала ожидаемого улучшения результатов моделирования по сравнению с остальными версиями.

Версия St2 продемонстрировала относительно высокое качество моделирования для всех объектов моделирования и условий водности (табл. 1). Сезонные значения компонентов водного баланса для всех водосборов находятся в соответствии с ранее опубликованными исследованиями [5, 12]. Основные паводковые события моделируются с участием быстрого поверхностного стока Q0,

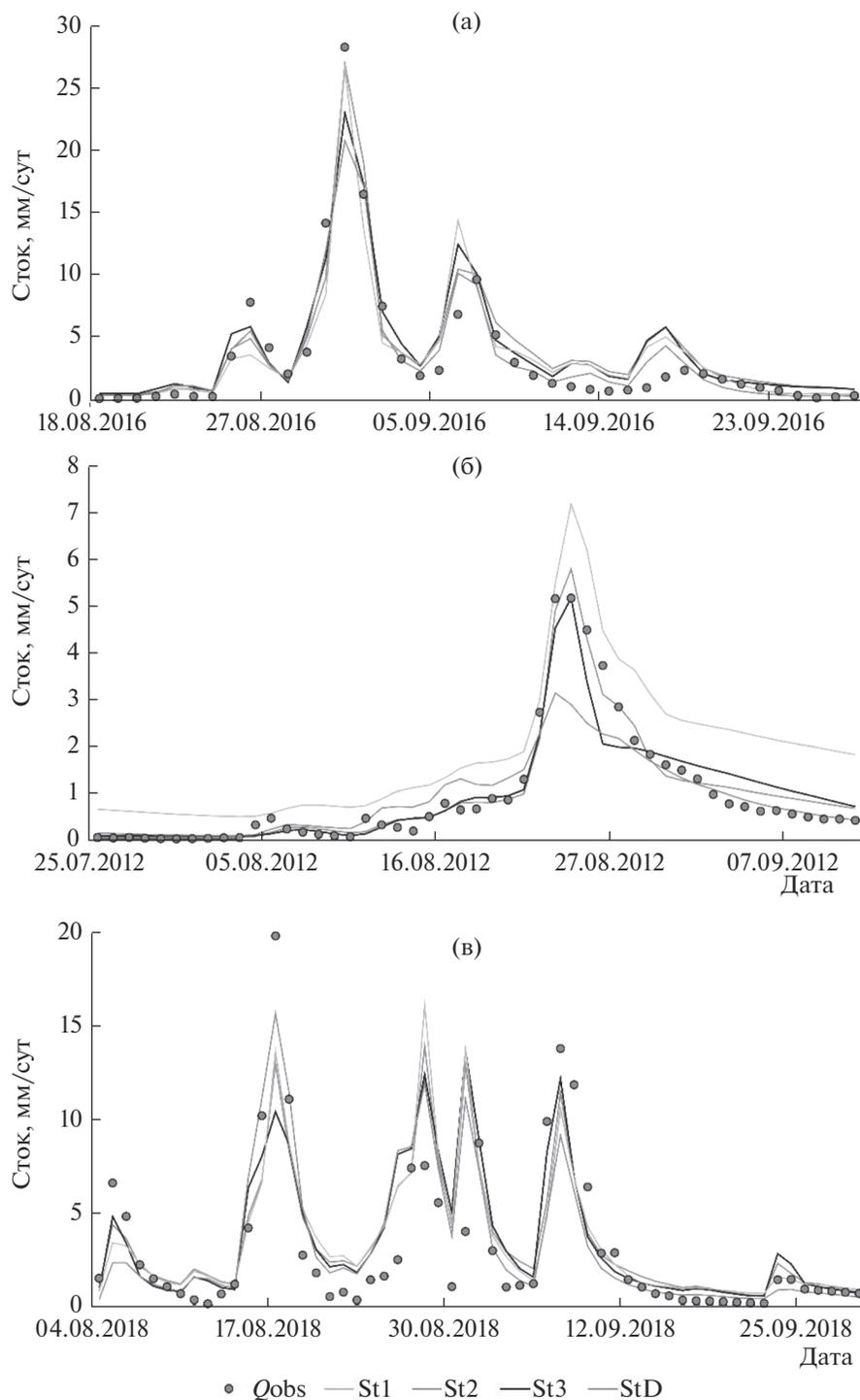


Рис. 3. Примеры измеренных Q_{obs} и модельных гидрографов для дождевых паводков, полученных с помощью различных версий НВУ (St1, St2, St3, StD) для ручьев: а – Елового, б – Медвежьего, в – Березового.

средние по водности условия сформированы обычно почвенным стоком Q_1 , низкий сток преимущественно генерируется за счет медленного стока Q_2 , за исключением руч. Елового, где его доля невысока.

Применение более универсальной структуры St3 не дало существенного улучшения результатов моделирования по сравнению с версиями St1 и St2 (табл. 1). При этом в случаях прохождения сильных единичных дождей, которым предше-

Таблица 1. Элементы водного баланса (мм) и критерии качества моделирования (P – осадки; E – суммарное испарение; Q_{sum} – суммарный сток; Q_0, Q_1, Q_2 – сток из соответствующих структуре модели емкостей; прочерк – отсутствие такого вида стока в структуре модели)

Объект	HBV	Год	P	E	Q_{sum}	Q_0	Q_1	Q_2	R^2	NSE	BIAS, %
руч. Медвежий	St1	2015	381	386	39	0	0.7	38.7	0.28	0.23	14
	St2			377	45	0	1.1	44	0.35	0.35	2
	St3			358	57	0	4.9	52.2	0.27	-0.12	-24
	StD			372	44	–	41.3	2.3	0.32	0.27	5
	St1	2016	706	335	189	26	78	84.8	0.87	0.87	-1
	St2			339	220	17.2	96.1	106.6	0.92	0.91	-18
	St3			337	225	17.6	111.3	96.2	0.9	0.9	-21
	StD			302	191	–	185.2	5.7	0.93	0.92	-2
	St1	2017	418	360	45	0	9.2	35.5	0.54	0.42	-13
	St2			333	38	0	5.1	33.4	0.56	0.53	3
	St3			305	44	0	9.9	34	0.63	0.51	-11
	StD			332	33	–	22.2	11.3	0.45	0.44	15
руч. Еловый	St1	2012	552	281	196	14.6	42.7	138.7	0.87	-0.25	-142
	St2			259	81	15	60.3	5.4	0.95	0.95	0
	St3			269	77	10.1	57.6	9.6	0.89	0.89	4
	StD			275	81	–	81.4	0	0.87	0.8	-1
	St1	2013	472	309	206	0	49.6	156	0.42	-1.4	-125
	St2			282	92	7.7	75.3	8.8	0.83	0.83	0
	St3			291	87	0.2	70	16.4	0.75	0.75	5
	StD			304	88	–	88	0	0.73	0.72	4
	St1	2014	554	328	176	0.1	41.1	134.9	0	-5.7	-125
	St2			290	76	0	64.4	12	0.56	0.55	2
	St3			293	83	3.2	57.9	22.4	0.6	0.56	-7
	StD			313	91	–	90.8	0	0.42	0.31	-16
руч. Березовый	St1	2016	738	320	268	43.7	77.9	146.2	0.87	0.84	-34
	St2			310	273	40.2	84.1	148.7	0.85	0.83	-37
	St3			325	260	92.1	72.1	96	0.71	0.69	-30
	StD			307	230	–	229.2	1.2	0.9	0.89	-15
	St1	2017	452	310	139	0	39.1	99.6	0.73	0.73	4
	St2			312	140	0.1	39.9	100.5	0.7	0.7	3
	St3			323	125	24.7	35.9	64.5	0.61	0.56	13
	StD			259	115	–	109.9	4.9	0.74	0.71	20
	St1	2018	743	331	275	28.5	84.5	161.5	0.67	0.66	-11
	St2			323	272	23.3	95.2	153.7	0.71	0.71	-10
	St3			339	263	73.1	88.2	101.4	0.69	0.68	-6
	StD			328	244	–	234.7	9.1	0.73	0.72	2
	St1	2019	458	350	135	0	22.9	111.8	0.77	0.7	-3
	St2			345	135	0	22.7	112.5	0.73	0.64	-4
	St3			358	117	7.1	29.6	80.4	0.72	0.61	10
	StD			286	108	–	94.9	12.9	0.65	0.35	17

Таблица 2. Значения параметров, полученные при калибровке различных версий HBV (прочерк – отсутствие такого параметра в структуре модели)

Параметр	руч. Березовый				руч. Медвежий				руч. Еловый			
	St1	St2	St3	StD	St1	St2	St3	StD	St1	St2	St3	StD
<i>FC</i>	410	408	325	92	545	350	356	385	205	100	133	165
<i>LP</i>	0.2	0.3	0.4	0.7	0.5	0.2	0.1	0.5	0.1	0.4	0.5	0.3
BETA	0.72	0.87	1.2	2.3	3.5	1.7	1.1	5.3	6.0	1.6	4.4	7
PERC	12	3.2	1.6	–	5.2	2.6	2.1	–	10	1.8	2.1	–
HL	32	16	7	–	29	28	18	–	80	58	23	–
K0	0.99	0.99	0.72	–	0.88	0.99	0.99	–	0.3	0.23	0.56	–
K1	0.2	0.33	0.32	0.013	0.22	0.4	0.47	0.13	0.01	0.02	0.03	0.055
K2	0.1	0.17	0.15	0.0024	0.1	0.13	0.1	0.19	0.025	0.0001	0.0002	10 ⁻⁷
MAXBAS	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.8	1.8	2.0	4.2	3.6	4.2	2.6
Cet	1	0.65	0.9	0.92	10 ⁻⁵	0	0	0.055	0	0.1	0.07	0.02
α	–	–	–	1.05	–	–	–	0.44	–	–	–	0.23
PART	–	–	–	0.58	–	–	–	0.53	–	–	–	0.34
DELAY	–	–	–	3864	–	–	–	4061	–	–	–	3000

ствовали длительные засушливые периоды 2017 и 2019 гг., основной объем паводка моделируется не наблюдавшимся в действительности быстрым поверхностным стоком Q_0 , что может рассматриваться как проявление неадекватности данной версии реальной структуре объекта.

С помощью версии StD получены удовлетворительные результаты моделирования стока по всем объектам. Для исследуемых водосборов степенная зависимость (параметр α) стока от влаго-содержания верхней емкости – удачная альтернатива линейным зависимостям, используемым в остальных версиях HBV. Полученные в результате калибровки значения параметров *K2* и DELAY для ручьев Березового и Елового указывают на то, что сток в их замыкающих створах сформирован, в основном, из верхней емкости. В данном случае нижняя емкость частично решает проблему имитации безвозвратных потерь на питание подземных вод зоны трещиноватости. Однако при более длительных периодах моделирования данный подход приведет к накоплению значительного объема в нижней емкости, искажению структуры водного баланса и появлению трендов в расчетных гидрографах стока.

Таким образом, часть априорных представлений о процессах формирования стока и сезонных значений элементов водного баланса достаточно хорошо согласуется с результатами моделирования:

выявлено неудовлетворительное качество расчетов стока руч. Елового версией St1;

подтверждены малые величины грунтового стока в бассейне руч. Елового;

подтверждено относительно редкое появление поверхностного стока в бассейнах ручьев Елового и Березового;

подтверждается гипотеза наличия грунтового стока в бассейне руч. Медвежьего;

подтверждено существенное ландшафтное различие между водосборами руч. Елового и соседних водотоков.

Существенный недостаток всех представленных версий – отсутствие учета безвозвратных потерь на питание глубоких грунтовых горизонтов (в данном случае трещинных вод, разгружающихся за пределами водосбора). Применительно к малому водосбору отсутствие в структуре модели данной возможности должно быть компенсировано за счет накопления воды в нижней емкости или параметров *FC* и *LP*, связанных с влагоемкостью почвы и расчетом испарения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном исследовании различные версии воднобалансовой концептуальной модели HBV применены для моделирования стока на малых экспериментальных водосборах южного Сихотэ-Алиня (Приморский край, Россия) с целью выявить структуру модели, соответствующую имеющимся априорным представлениям о процессах формирования стока. Показано, что использование традиционных критериев эффективности моделирования, основанных на анализе расхождений между модельными и измеренными гидрографами, не позволяет сделать объективного заключения об адекватности различных структур HBV объектам моделирования.

Все использованные версии модели имеют общие и индивидуальные недостатки. Устойчивые оценки моделирования, адекватные сезонные компоненты водного баланса и значения параметров модели получены с помощью стандартной версии, включающей в себя две стокоформирующие емкости. Данная версия обладает компактной структурой, отражает основные процессы стокоформирования рассматриваемых объектов и наиболее эффективна с точки зрения устойчивости результатов моделирования. Применение остальных структур модели требует дополнительной интерпретации параметров и результатов моделирования. Особенности этих версий неспецифичны по отношению к имеющимся данным об исследуемых водосборах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов Ю.Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 312 с.
2. *Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Орляковский А.В., Тарбеева А.М., Шамов В.В., Шекман Е.А.* Формы линейной организации склонового стока в среднегорье (на примере Сихотэ-Алиня) // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С.123–132. <https://doi.org/10.31857/S0321059620020042>
3. *Гарцман Б.И., Шамов В.В., Третьяков А.С.* Система воднобалансовых моделей малого речного бассейна // География и природ. ресурсы. 1993. № 3. С. 27–36.
4. *Гельфан А.Н.* Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 279 с.
5. *Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов 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. <https://doi.org/10.31857/S2587-556620196126-140>
6. *Мотовилов Ю. Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с. <https://doi.org/10.31857/S9785907036222000001>
7. *Терешкина А.А., Пшеничникова Н.Ф., Бугаец А.Н., Голодная О.М., Краснопеев С.М.* Цифровая почвенная карта водосбора реки Соколовка (территория Верхнеуссурийского стационара ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН) // Географические и геоэкологические исследования на Дальнем Востоке. Владивосток: Дальнаука, 2019. Вып. 1. С. 126–136. <https://doi.org/10.35735/tig.2019.26.44.012>
8. *Шамов В.В., Лупаков С.Ю.* Гидрохимическая индикация разрывных нарушений в долинах малых горных рек южного Приморья // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М.: Ленанд, 2019. С. 409–411.
9. *Bergstrom S.* Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Norrköping, Sweden: Univ. Lund. Bull., 1976. 134 p.
10. *Beven K.* Rainfall-runoff modelling. The Primer. Chichester, UK: Ltd. John Wiley Sons, 2001. 356 p. <https://doi.org/10.1002/9781119951001>
11. *Beven K.* Towards a methodology for testing models as hypotheses in the inexact sciences // Proc. Royal Society A. 2019. V. 475. № 2224. 20180862. 19 p. <https://doi.org/10.1098/rspa.2018.0862>
12. *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 Resour. 2019. V. 42. № S2. P. S8–S16. <https://doi.org/10.1134/S0097807819080037>
13. *Butts M.B., Payne J.T., Kristensen M., Madsen H.* An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation // J. Hydrol. 2004. V. 298. 242–266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.042>
14. *Cornelissen T., Diekkrüger B., Giertz S.* A comparison of hydrological models for assessing the impact of land use and climate change on discharge in a tropical catchment // J. Hydrol. 2013. V. 498. P. 221–236. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.016>
15. *Grayson R.B., Blöschl G.* Spatial patterns in catchment hydrology: Observations and modelling. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2000. 423 p. <https://doi.org/10.1002/hyp.5215>
16. *Huang J.-C., Lee T.-Y., Lee J.-Y., Hsu S.-C., Kao S.-J., Chang F.-J.* Assessing hydrological model behaviors by intercomparison of the simulated stream flow compositions: case study in a steep forest watershed in Taiwan // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 2013. V. 10. P. 855–893. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-855-2013>
17. *Kirchner J.W.* Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology // Wat. Resour. Res. 2006. V. 42. W03S04. <https://doi.org/10.1029/2005WR004362>
18. *Krysanova, V., Hattermann, F.F.* Intercomparison of climate change impacts in 12 large river basins: overview of methods and summary of results // Clim. Change. 2017. V. 141. P. 363–379. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1919-y>
19. *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. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
20. *Mroczkowski M., Raper G.P., Kuczera G.* The quest for more powerful validation of conceptual catchment models // Wat. Resour. Res. 1997. V. 26. № 10. P. 2275–2286. <https://doi.org/10.1029/97WR01922>
21. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models. Pt 1. A discussion of principles // J. Hydrol. 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.

22. *Perrin C., Michel C., Andreassian V.* Improvement of a Parsimonious Model for Streamflow Simulation // *J. Hydrol.* 2003. V. 279. P. 275–289
23. *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>
24. *Schaefli B., Gupta H.V.* Do Nash values have value? // *Hydrol. Proces.* 2007. V. 21. P. 2075–2080.
<https://doi.org/10.1002/hyp.6825>
25. *Seibert J., Vis M.* Teaching hydrological modelling with a user-friendly catchment-runoff-model software package // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 16. № 9. P. 3315–3325.
<https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>
26. *Smith M.B., Seo D.-J., Koren V.I., Reed S., Zhang Z., Duan Q.-Y., Moreda F., Cong S.* The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design // *J. Hydrol.* 2004. V. 298. № 1–4. P. 4–26.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.040>
27. *Uhlenbrook 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>