МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГИДРОЛОГИИ СУШИ

УДК 556.06:556.166

МОДЕЛЬ СТОКА FCM ДЛЯ МАЛЫХ РЕК С ДОЖДЕВЫМ ПИТАНИЕМ 2. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ¹

© 2023 г. Б. И. Гарцман^{а, b,} *, Т. С. Губарева^{а, b}, В. В. Шамов^b, С. Ю. Лупаков^b

^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия ^bТихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: gartsman@inbox.ru Поступила в редакцию 07.10.2022 г. После доработки 05.03.2023 г. Принята к публикации 06.03.2023 г.

Проведены анализ специфики параметризации и верификации модели FCM, систематизация ранее опубликованных данных, а также оригинальных результатов авторских натурных наблюдений. Описаны алгоритмы параметризации и результаты тестирования модели, которое проводилось в разных регионах с преобладанием дождевых паводков в режиме рек. Обсуждены основания и эмпирические подтверждения некоторых основных гипотез FCM, рассмотрен так называемый эффект бассейнового контррегулирования. Это наиболее яркое проявление сильной нелинейности экстремального стокоформирования представляет собой хотя и редкий, но принципиально важный феномен при формировании экстраординарных дождевых паводков.

Ключевые слова: дождевые паводки, гидрологическое моделирование, малые бассейны, дренажная сеть, нелинейность процессов стокоформирования.

DOI: 10.31857/S0321059623040090, EDN: QKPSUG

введение

Особенность современного этапа развития моделирования в гидрологии – смещение фокуса внимания от разработки моделей к проблемам их параметризации и верификации. К настоящему моменту созданы сотни разнообразных моделей речного стока [12, 16, 19], которые уже прочно утвердились в качестве инструментов решения широкого круга прикладных задач. Это выдвигает на первый план две нерешенные проблемы.

Первая из них связана с тем, что на данный момент основной и почти безальтернативный способ определения параметров гидрологических моделей — калибровка. Все модели стока сталкиваются с принципиальными проблемами, если их параметризация основана на калибровке по данным о стоке в замыкающем створе, в особенности для слабо обеспеченных наблюдениями либо существенно неоднородных бассейнов. Устранение по возможности процедуры калибровки необходимо для широкого применения гидрологических моделей [12, 13].

Другая проблема связана с необходимостью получения не только реалистичных гидрографов стока, но и корректного воспроизведения в модели природных процессов. Известно, что модели стока, сильно различающиеся по структуре и алгоритмам, могут давать на выходе сходные результаты, одинаково близкие к наблюдениям. Это свойство эквифинальности широко дискутируется как ключевая проблема развития гидрологического моделирования. Обе проблемы тесно связаны между собой, так как эквифинальность следствие оценки параметров методом калибровки [12, 13].

Данная работа посвящена специфике параметризации и верификации модели Flood Cycle Model (FCM), концепции и алгоритмы которой описаны в [4]. Систематизируются данные, ранее опубликованные авторами [3, 5, 6, 10, 11, 14], а также оригинальные результаты авторских натурных наблюдений. Описаны алгоритмы параметризации и результаты тестирования модели, которое проводилось в разных регионах с преобладанием дождевых паводков в режиме рек. Тестирование основывалось на обычных процедурах и критериях, используемых для оценки качества гидрологических моделей, и показало хорошие результаты работы FCM.

Концепция FCM включает в себя ряд не общепринятых предположений и приводит к нетривиальным выводам, предсказывая параметры и ре-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001, государственная регистрация № 122041100222-7).

жимы функционирования бассейна, практически не наблюдаемые из-за их редкости и трудности наблюдения. Поэтому традиционная процедура тестирования гидрологических моделей должна быть дополнена анализом стандартных и специальных наблюдений с целью прямого подтверждения как базовых предположений FCM, так и наиболее дискуссионных ее результатов.

Специальный раздел статьи посвящен обоснованию и эмпирическому подтверждению некоторых основных гипотез FCM, а именно:

последовательности трех различных режимов стокоформирования (внутриобъемный, поверхностный, "прорывной") по мере нарастания увлажнения бассейна, каждый последующий из которых связан со скачком эффективности стокоформирования, сначала за счет 100%-го стекания осадков и быстрой мобилизации гравитационного влагозапаса, а затем за счет мобилизации капиллярного влагозапаса при ослаблении/исчезновении капиллярных сил;

существованию пороговых расходов — критического $Q_{\rm cr}$ при переходе от внутриобъемного к поверхностному режиму и "прорывного" $Q_{\rm bur}$ от поверхностного к "прорывному" режиму;

механизмам стокоформирования в поверхностном режиме, обеспечивающим нелинейность гидрологического отклика бассейна на экстремальные осадки, в особенности пространственной динамики склоновой дренажной сети.

Детально рассматривается эффект бассейнового контррегулирования — наиболее яркое проявление сильной нелинейности экстремального стокоформирования.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ FCM

Оценка параметров FCM по данным стандартных наблюдений

Основные параметры FCM определяются путем обработки многолетних рядов суточных осадков и расходов. Первый из них — коэффициент k_{gc} , определяющий соотношение расхода Q и руслового влагозапаса S_{gc} [4]:

$$Q = k_{gc} S_{gc}.$$
 (1)

Этот коэффициент рассчитывается через показатель истощения стока R_{cha} , определяемый как тангенс угла наклона нижней прямолинейной огибающей поля точек на диаграмме { Q_i , Q_{i+1} } (*i* – номер суток), построенной по кривым спада большого числа паводков (рис. 1а). Эта огибающая задает предельную кривую истощения в виде

геометрической прогрессии $\{QR_{cha}^{i}\}$, в результате суммирования которой получаем

$$k_{gc} = 1 - R_{\rm cha}.$$
 (2)

Критический расход $Q_{\rm cr}$ оценивается путем построения гистограмм распределения многолетних выборок пиковых расходов чисто дождевых паводков [3, 4]. Концептуально Q_{cr} фиксирует пороговое состояние смены режимов, при котором скачкообразно возрастает эффективность стокоформирования. Интуитивно очевидна неустойчивость данного состояния, из-за чего вероятность формирования паводка с пиковым расходом $Q_{\text{max}} \approx Q_{\text{cr}}$ должна быть значительно ниже, чем на соседних интервалах. Анализ гистограмм в подавляющем большинстве случаев позволяет выявить минимум плотности вероятности, разделяющий первую и вторую моды распределения (рис. 1б). Положение минимума дает первичную оценку $Q_{\rm cr}$, которая может быть уточнена калибровкой. В предшествующих работах авторов [3, 6, 14] подробно рассмотрены механизмы формирования двумодальной структуры гистограммы пиковых расходов, надежность ее выявления и точность оценки $Q_{\rm cr}$.

Набор емкостных параметров бассейна определяется построением диаграммы бассейновой емкости на основе расчетов водного баланса паводков с превышением Q_{cr} за многолетний период, как описано в [4]: полной влагоемкости ("total moisture capacity" (*TMC*)), наименьшей влагоемкости ("field moisture capacity" (*FMC*)), гравитационной критической влагоемкости ("gravitational critical capacity" (*GCC*)) и русловой критической влагоемкости ("channel critical capacity" (*CCC*)). Выборка значений предпаводковой общей свободной емкости бассейна ΔS представляется в виде поля точек в координатах { ΔS , *Q*} (пример на рис. 2).

Точка *A* соответствует Q_{cr} , при этом $\Delta S = 0$. Кривые *AD* и *AC* представляют собой преобразованные кривые истощения руслового S_{gc} и гравитационного S_g влагозапасов, построенные в соответствии с уравнениями (1)–(2) и (3)–(4) [4].

$$Q = k_g S_g^3, \tag{3}$$

$$k_g = \frac{k_{gc}^3}{27Q_{cr}^2},\tag{4}$$

где k_g — параметр истощения гравитационного влагозапаса. Кривая *AC* описывает минимальные возможные величины ΔS при заданном *Q*, т. е. когда она полностью определяется свободной гравитационной емкостью ΔS_g . Для этой кривой из уравнения (3) получаем

$$\Delta S^{\min} = \Delta S_g = \left(\frac{\underline{Q}_{\rm cr}}{k_g}\right)^{1/3} - \left(\frac{\underline{Q}}{k_g}\right)^{1/3}.$$
 (5)

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ том 50 № 4 2023



Рис. 1. Определение параметров FCM: а – диаграмма $\{Q_i, Q_{i+1}\}$ – пример определения R_{cha} для Комаровка–Сахзавод, 616 км²; б – гистограмма распределения максимальных расходов паводков – пример определения Q_{cr} для Тигровая– Хмельницкое, 524 км².

Кривая *AC*, по определению, — нижняя огибающая поля точек на диаграмме (рис. 2), что хорошо подтверждается для бассейнов, обеспеченных надежными данными. Аналогичный вывод выражения для прямой *AD* из уравнения (1) тривиален.

Кривая *AB* представляет верхнюю огибающую поля точек и описывает максимально возможные при заданном *Q* величины $\Delta S - \Delta S^{\text{max}}$. Величина ΔS^{max} складывается из ΔS_g и максимально возможной при данном *Q* величине свободной негравитационной емкости ΔS_e^{max} (рис. 2). Предполагаем, что отношение ΔS_g и ΔS^{max} выражается постоянным коэффициентом свободной пористости бассейна k_{bp} [4], что означает однородность пористости зоны активного водообмена при любом уровне увлажнения, тогда

$$\Delta S^{\max} = \Delta S_g + \Delta S_e^{\max} = \frac{1}{k_{bp}} \left(\left(\frac{Q_{cr}}{k_g} \right)^{1/3} - \left(\frac{Q}{k_g} \right)^{1/3} \right).$$
(6)

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ том 50 № 4 2023

Значение k_{bp} подбирается таким образом, чтобы кривая *AB* наилучшим образом огибала сверху поле точек. При наличии надежных данных почти все (теоретически — все) точки диаграммы должны лежать в поле, ограниченном огибающими *AB* и *AC*, что подтверждается анализом данных по десяткам малых бассейнов [3, 6]. Пересечения кривых с осью абсцисс, определяемые при Q = 0, дают значения емкостных параметров бассейна: |OB| равно *TMC*, |BC| — *FMC*, |OC| — *GCC*; |OD| — *CCC*.

Таким образом, набор основных параметров FCM определяется прямым анализом массовых данных наблюдений. Их уточнение возможно путем калибровки, но, как показано исследованием [14], точность первичной оценки вполне удовлетворительна: k_{gc} и Q_{cr} вообще нецелесообразно калибровать, калибровка емкостных параметров позволяет несколько улучшить качество моделирования с учетом конкретной решаемой задачи.



Рис. 2. Диаграмма бассейновой емкости для бассейна Комаровка-Центральный, 157 км², 1958–1987 гг.

Несколько вспомогательных параметров FCM определяются калибровкой или подбором на основе рациональных соображений. Из них только два заметно варьируют и влияют на результат — коэффициент истощения влагозапаса верховодки k_u и константа глубокого подземного водообмена G. То же касается и краевых условий моделирования. Поскольку FCM применяется только в сезон дождевых паводков, начальное состояние бассейна на спаде весеннего половодья обычно предполагается водонасыщенным. Испарение задается в виде средней за сезон суточной величины, которая в имитационных экспериментах ка-

либруется, а в сценарных расчетах определяется законом распределения. При моделировании высоких и экстраординарных паводков принятая максимально грубая параметризация испарения представляется достаточной. В табл. 1 приведен список параметров FCM и дана информация о способах их определения.

Тестирование FCM по данным стандартных наблюдений

Испытания FCM (табл. 2) выполнены на малых речных бассейнах Дальневосточного региона

Параметр	Единицы измерения	Способ оценки	Вариабельность (для калибруемых)	
<i>k_{gc}</i> , коэффициент истощения	_	Кривые истощения	_	
руслового влагозапаса				
$Q_{ m cr}$, критический расход	мм/сут	Гистограмма пиков	_	
		Паводков		
ТМС, полная влагоемкость	MM	Диаграмма бассейновой	—	
<i>FMC</i> , наименьшая влагоемкость	ММ	емкости	—	
<i>GCC</i> , гравитационная	ММ	*	_	
критическая влагоемкость				
ССС, русловая критическая влагоемкость	ММ	*		
k_{bp} , коэффициент свободной пористости	—	*	—	
k_u , коэффициент истощения	_	Калибровка	Высокая, от 0 до 1	
влагозапаса верховодки				
G, глубокий подземный водообмен	мм/сут	»	Высокая, от >0 до <0	
а, коэффициент, уравнение (11) [4]	—	»	Низкая, ~1	
<i>m</i> , показатель степени, уравнение (11) [4]	—	»	Ограниченная, от 2.5 до 4.0	

Таблица 1. Параметры бассейна в модели FCM

Параметры									
$Q_{ m cr}$, мм/сут	R _{cha}	ТМС, мм	<i>FMC</i> , мм	<i>GCC</i> , мм	k _u	<i>G</i> , мм/сут	R_{NS}^2		
Реки побережья Японского моря, 18 шт.									
11.9-6.42	0.550-0.060	287-166	217-120	81.0-27.0	0.95-0.52	1.14-0.03	0.891-0.464		
8.43	0.302	217	175	42.3	0.79	0.36	0.810		
Реки бассейна р. Уссури, 36 шт.									
10.5-4.09	0.550-0.090	332-119	276-73	90.0-15.0	0.99-0.24	1.03-0.48	0.914-0.644		
7.48	0.291	193	154	39.1	0.75	0.11	0.835		
Реки бассейна Нижнего Амура, 29 шт.									
13.1-4.57	0.640-0.100	373-123	293-98	80.0-18.0	0.89-0.05	1.81 - 0.07	0.877-0.514		
7.54	0.335	214	176	38.5	0.55	0.76	0.700		
Реки бассейна Среднего Амура, 27 шт.									
10.6-1.45	0.560-0.060	268-91	242-81	56.0-7.0	0.94-0.05	1.33-0.07	0.766 - 0.221		
5.52	0.305	187	161	26.1	0.52	0.49	0.605		
Реки Западного Кавказа, 3 шт.									
12.1-10.8	0.108-0.086	210-160	166-120	44.0 - 40.0	~1	0.2-0.3	0.715-0.569		
11.6	0.098	187	144	42.3	-	-0.07	0.635		
Реки Тайваня, 7 шт.									
48.0-37.0	0.152-0.013	630-430	474-285	196–126	0.95-0.55	7.0 - 1.0	0.928-0.696		
42.7	0.064	557	410	147	0.81	2.7	0.795		
Реки Австрии, 5 шт.									
6.33-4.33	0.279-0.154	184-114	156-95	28.4-18.8	0.96-0.81	0.42 - 0.06	0.810 - 0.687		
5.65	0.193	156	131	25.1	0.90	0.21	0.741		

Таблица 2. Оценки параметров FCM и показатели качества моделирования для малых бассейнов в различных регионах (в числителе – пределы изменения, в знаменателе – среднее арифметическое)

России, а также Западного Кавказа, Тайваня и Австрии. В пределах Дальневосточного региона выделены традиционные макробассейны: побережье Японского моря, р. Уссури, Нижний Амур, Средний Амур. Все отобранные регионы имеют общие признаки – преимущественно горный рельеф (бассейны отбирались в основном в пределах средне- и низкогорья) и хорошую выраженность сезона дождевых паводков. Для каждого бассейна модель тестировалась по сезонным данным о суточных осалках и расходах за многолетний период. Границы сезонов дождевых паводков определялись для каждого региона отдельно. Продолжительность рядов наблюдений варьирует в интервале 14-47 лет. Качество моделирования оценивалось коэффициентом эффективности Нэша—Сэтклифа R_{NS}^2 [3, 11].

Некоторые параметры FCM (например, удельный $Q_{\rm cr}$, мм/сут) демонстрируют большую устойчивость внутри регионов и даже могут рассматриваться как региональные константы. Такие параметры наглядно характеризуют различия между регионами. Например, если на о. Тайвань дождевые паводки в разы чаще и интенсивнее, чем в других регионах, то и ключевые параметры, такие как $Q_{\rm cr}$, *TMC*, *FMC* и *G*, здесь в 3–10 раз выше, чем в остальных.

Мера R_{NS}^2 почти везде указывает на высокое или удовлетворительное качество моделирования, иногда превышая 0.9 и никогда не падая ниже 0.5 в горных регионах гумидной зоны. Исключение составляет засушливая Амуро-Зейская равнина в пределах бассейна Среднего Амура, где R_{NS}^2 имеет минимальные значения, снижаясь почти до 0.2. На рис. 3 приведены примеры успешного моделирования стока.

В табл. 3 показана устойчивость оценок R_{NS}^2 для калибровочных и поверочных периодов на отдельных бассейнах, что указывает на достаточную стабильность параметров. Для поверочного периода R_{NS}^2 бывает как меньше, так и больше, чем для калибровочного, но в целом изменения умеренные либо совсем незначительные.



Рис. 3. Сравнение измеренного (сплошная линия) и смоделированного (пунктирная линия) гидрографов с июня по сентябрь: а – Комаровка–Сахзавод, 616 км², 1974 г.; 6 – Кичмари–Малмыж, 61.6 км², 1971 г.; в – р. Та-Лу-Кенг (Ta-Lu-Keng), 247 км², 1997 г.; г – Кренстеттен–Урлбач (Krenstetten–Urlbach), 156 км², 1985 г.

МОДЕЛЬ СТОКА FCM ДЛЯ МАЛЫХ РЕК С ДОЖДЕВЫМ ПИТАНИЕМ

D	Площадь,	D	Калибров	ка	Поверка		
Река–пункт км ²		Регион	период, годы	R_{NS}^2	период, годы	R_{NS}^2	
Комаровка-Сахзавод	616	Побережье Японского моря	1962-1975	0.928	1976-1989	0.881	
Бира-Лермонтовка	728	Бассейн р. Уссури	1967-1981	0.739	1982-1996	0.709	
Гугинка–Гуга	56.5	Бассейн Нижнего Амура	1965-1977	0.734	1978-1991	0.595	
Кичмари-Малмыж	61.6	Бассейн Нижнего Амура	1971-1981	0.681	1982-1992	0.743	
Большой Невер–	563	Бассейн Среднего Амура	1962-1975	0.676	1976-1989	0.630	
Сковородино							
Туапсе-Туапсе	351	Западный Кавказ	1978-1987	0.715	1988–1991,	0.582	
					1994—1996, 2009—2010		
Псекупс-	765	Западный Кавказ	1977-1990	0.569	1991-2002	0.694	
Горячий Ключ							
Та-Лу-Кенг	247	Тайвань	1980-1990	0.837	1991-2001	0.866	
Кренстеттен-Урлбач	156	Австрия	1978-1987	0.715	1988-1997	0.828	

Таблица 3. Оценки качества моделирования стока рек разных регионов по калибровочным и поверочным периодам

ВЕРИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ГИПОТЕЗ FCM

Пороговое значение расхода Q_{cr}

Согласно изложенному в [4], гипотеза о критическом расходе $Q_{\rm cr}$, фиксирующем переход от внутриобъемного к поверхностному режиму стокоформирования, — основа разработки FCM. При $Q > Q_{\rm cr}$ коэффициент стока поступающих осадков становится равным 1, дренажная сеть интенсивно развивается и распространяется в пространстве, быстро мобилизуя все виды гравитационных влагозапасов бассейна, которые по своим гидравлическим свойствам приближаются к русловому влагозапасу. Какие прямые аргументы в пользу этой концепции можно получить на основе анализа стандартных либо специальных наблюдений на малых речных бассейнах?

На рис. 4 представлена зависимость суммарных осадков и стока для отдельных паводковых событий по данным наблюдений Приморской воднобалансовой станции на 15 малых речных бассейнах за период 1954–1988 гг. В выборку включались данные только по продолжительным паводкам, когда периоды с $Q > Q_{cr}$ составляли ≥4 сут. Осадки и сток суммировались только для этих периодов с исключением первых суток для получения данных, с максимальной чистотой характеризующих поверхностный режим стокоформирования. Теснота линейной зависимости, близкой к линии равных значений, подтверждает концептуальную состоятельность понятия $Q_{\rm cr}$, а также точность его оценки для отдельных бассейнов.

Данные прямых наблюдений поверхностного режима стокоформирования получены авторами при исследованиях в Центральном Сихотэ-Алине, на экспериментальных водосборах Верхнеуссурийского стационара (ВУС) (рис. 5), описание которого дано в ряде публикаций [5, 6]. Летом 2016 г. в период прохождения тайфуна Лайонрок выполнялись наблюдения за осадками и стоком на двух ручьях – Березовом (2.95 км²) и Медвежьем (7.60 км²). На каждом из них были установ-



Рис. 4. Связь ΣQ и ΣP для паводков с продолжительностью $Q > Q_{cr} \ge 4$ сут (суммирование со вторых суток) на 15 малых бассейнах ПВБС, 1954—1988 гг.



Рис. 5. Расположение бассейнов и пунктов наблюдений ВУС. *1* – водотоки; *2* – гидропосты; *3* – метеостанции; *4* – дрены (А – Антропоген, Б – Ботаническая); *5* – границы экспериментальных бассейнов (І – Медвежий, ІІ – Березовый); *6* – границы ВУС.

лены автоматизированные датчики — метеостанция с часовым интервалом записи и уровнемер с интервалом записи 15 мин. Также проводились ежедневные, а на пике паводка дважды в день измерения расходов в ручьях.

На руч. Березовом (рис. 6) в течение июля-августа наблюдалась серия дождей, давшим слой 30-70 мм, с постепенным ростом увлажнения бассейна, выраженном в нарастании остроты реакции стока на осадки. 29 августа начался длительный дождливый период, закончившийся 10 сентября. Уже на второй день увеличение расхода выше среднего регионального значения $Q_{\rm cr}$ (табл. 2) указывает на установление поверхностного режима. Сравнительно равномерное выпадение дождя обеспечило сохранение такого режима в течение 5 сут, при этом наблюдались его характерные признаки – переувлажнение почвы, обилие луж и временных склоновых потоков, активное функционирование подповерхностных дрен с выходом потоков на поверхность. Затем после двухдневного перерыва наблюдается еще один период с превышением $Q_{\rm cr}$ длительностью 3 сут.

За 5 сут режима поверхностного стокоформирования на руч. Березовом выпало 113.2 мм осадков, сток составил 109.3 мм; в течение следующего периода в 3 сут – осадки 30.8 мм, сток 35.6 мм. Характер событий на руч. Медвежьем в целом был аналогичным, но осадков на нем выпало меньше и поверхностный режим в первый период держался только 4 сут, осадки в сумме составили 72.6 мм, сток – 69.0 мм. Во второй период $Q_{\rm cr}$ был превышен только на сутки, баланс не оценивался. Расхождение между суммарными величинами стока и осадков значительно меньше возможных погрешностей измерений, это надежный аргумент в пользу концепции $Q_{\rm cr}$.

Второе пороговое значение расхода Q_{bur}

Второе пороговое значение расхода $Q_{\rm bur}$ теоретически предсказано в рамках развития концепции FCM как переход от поверхностного режима формирования стока к "прорывному". Выведено соотношение для его оценки [4]

$$Q_{\rm bur} = 3^{3/2} Q_{\rm cr} \approx 5.196 Q_{\rm cr}.$$
 (7)

В отличие от $Q_{\rm cr}$, $Q_{\rm bur}$ — величина практически ненаблюдаемая, так как этот порог проявляется при формировании паводков исключительной силы, крайне редких во всех исследуемых регионах, за исключением о. Тайвань.

Рассмотрим гистограмму распределения паводковых максимумов для одного из малых бассейнов Тайваня с длительными наблюдениями хорошего качества (рис. 7). На первый взгляд, хорошо выраженная структура гистограммы с двумя модами и разделяющим их "запретным" для пиков паводков интервалом позволяет оценить $Q_{\rm cr}$ так же, как и в других регионах (рис. 16). Од-



Рис. 6. Наблюдения за осадками и стоком летом 2016 г. на руч. Березовом, 2.95 км², ВУС. Темным рисунком выделены даты с $Q > Q_{cr}$.

нако на тайваньских реках этот четко выделяющийся интервал варьирует в диапазоне расходов 180—250 мм/сут, что превышает полные диапазоны расходов в остальных регионах и в ~20 раз больше типичных для них значений $Q_{\rm cr}$. Кроме того, оценка $Q_{\rm cr}$ на уровне 200 мм/сут приводит к совершенно нереалистичным значениям емкостных параметров FCM и снижает частоту достижения полного увлажнения для бассейнов о. Тайвань, ставя его в один ряд с другими регионами, что явно противоречит реальности.

Очевидно, в этом случае наблюдаемый интервал минимальной плотности вероятности на гистограмме отвечает "прорывному" расходу – $Q_{\rm bur}$. Так же как и Q_{cr} , он фиксирует скачкообразный переход к большей интенсивности стокоформирования и поэтому должен быть связан с провалом на гистограмме паводковых максимумов. При этом интервал, связанный с Q_{cr} , слишком узок в сравнении с огромным диапазоном расходов тайваньских рек и с большими ошибками их измерения, поэтому проявляется на гистограмме слабо и неопределенно. Поэтому сначала для рек о. Тайвань по гистограммам паводковых максимумов определялись значения $Q_{\rm bur}$, затем по уравнению (7) вычислялись значения Q_{cr} . Окончательная верификация параметров FCM обеспечивается оценкой качества моделирования стока (табл. 2). Возможность получения данных о "прорывном" режиме стокоформирования целесообразно проверить в других экстремально паводкоопасных регионах мира.

Нелинейность формирования паводкового стока и динамика дренажной сети

В концепции FCM предполагается два основных механизма нелинейности. Первый из них практически совпадает со сформулированным в общем виде В.И. Найденовым в [9] на основе базовых физических законов. Рост скоростей течения и снижение времени концентрации паводка при увеличении влагозапаса бассейна происходит в результате возрастания потенциальной энергии влаги и одновременного снижения сопротивления ее движению, что объясняется В.И. Найденовым на основе закона течения вязкой жилкости Ньютона. Подобная же нелинейная зависимость скорости поверхностного стекания от интенсивности осадков детально алгоритмизирована в модели геоморфологического мгновенного единичного гидрографа, основанного на уравнении кинематической волны КW-GUIH [2, 7, 15].

Второй механизм нелинейности предполагает при превышении порогового значения увлажнения интенсивный рост размеров и производительности дренажной сети бассейна, которая включает в себя не только постоянные и временные поверхностные водотоки, но и большое число подповерхностных, пронизывающих толщу рыхлых почвогрунтов на склонах. Дренажная система представляется как динамичная трехмерная каскадная структура, быстро растущая либо деградирующая в пространстве зоны активного водообмена бассейна соответственно степени его увлажнения таким образом, что любая точка этого пространства потенциально для нее доступна.



Рис. 7. Гистограммы распределения максимальных расходов за период 1974–2004 гг. для бассейна Хенг-Чи (Heng-Chi), 52.9 км², Тайвань: а – всех паводков; б – максимальных годовых.

Такая структура порождает эффекты так называемой сильной нелинейности в динамике бассейновой системы.

Бывшее в основном умозрительным в процессе разработки FCM с начала 1990-х гг. предположение получило фактическое подтверждение в результатах авторских работ в 2010-е гг. [5, 10], а также в ряде современных публикаций [1, 8, 17]. В особенности отметим исследование [18], включающее последовательные полевые съемки дренажной сети на малом горном водосборе в различные по увлажненности сезоны и расчет кривых распределения времен добегания в каждом случае. В итоге отмечено, что эффект распространения и деградации дренажной сети критически важен для оценки скорости бассейнового добегания, но в существующих моделях стока не учитывается.

В процессе исследований на ВУС (рис. 5) обнаружены скрытые под поверхностью водотоки на склонах – дрены – протяженностью в десятки и сотни метров. Они широко распространены в среднегорье и имеют фундаментальную значимость в процессах формирования стока [5, 10]. Подобно первичным элементам речной сети, дрены имеют линейную форму, устойчивую локализацию и довольно стабильный режим стока. Их подповерхностные русла сформированы в хорошо промытых крупнообломочных отложениях, и потоки в них аналогичны поверхностным по скорости и характеру движения. Однако при низкой водности дрены истощаются и течение в них переходит в форму фильтрации. При высоком увлажнении эти потоки приобретают бурный характер, переполняют подземные русла и выходят на поверхность.

Цикл полевых наблюдений в период паводка 2016 г. дал некоторые прямые данные о нелинейности экстремального стокоформирования. На участке дрены Антропоген (рис. 5) протяженно-



Рис. 8. Совмещенные единичные гидрографы дрены Антропоген по данным измерений расходов в период 9.08.2016–14.09.2016. В выносках – измеренный модуль стока, л/с км².

стью 10.3 м и уклоном 0.24 м/м, залегающей в нижней части облесенного склона северной экспозиции, в период с 9 августа по 14 сентября выполнены 12 измерений расходов методом ионного паводка. Площадь водосбора дрены оценена в ~ 1 га, диапазон измеренных модулей стока составил 11.4—695 л/с км². Запись каждого ионного паводка была пересчитана в ординаты единичного гидрографа. На рис. 8 продемонстрирована нелинейность гидрологического отклика склона в зависимости от степени его увлажнения. Четыре "острых" варианта единичного гидрографа формируются при модулях >100 л/с км², что примерно соответствует $Q_{\rm cr}$.

На участке дрены Ботанической протяженностью 57.4 м и уклоном 0.26 м/м получены две записи ионных паводков, запущенных 3 и 19 сентября 2016 г. Эта дрена залегает в средней части облесенного склона южной экспозиции, т. е. имеет характер "подвешенной" и в сухие периоды почти пересыхает. Для записи ионного паводка автоматический кондуктометр помещался в естественную полость под корнями дерева на глубину ~25 см, в поток глубиной ≥10 см. Обе записи оканчиваются резким срывом до значений минерализации, близких к нулевым. Это представляет собой фиксацию исчезновения потока, т. е. прекращения функционирования дрены как элемента дренажной сети. При извлечении кондуктометра полость, в которой он находился, оказывалась обсохшей.

В первом случае (рис. 9а) срыв произошел после прохождения ионного паводка. Измеренный расход составил ~1 л/с, а скорость течения, оце-

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ том 50 № 4 2023

ненная по пиковой ординате минерализации, ~3.5 см/с, т. е. в дрене наблюдался явно свободный поток. Во втором случае (рис. 9б) срыв записи произошел сразу после прохождения очень сглаженного пика минерализации, из-за чего расчет выполнить невозможно. Однако, по примерной оценке, расход составлял 0.05-0.10 л/с, а скорость ≤3 мм/с, т. е. в дрене наблюдался слабый фильтрационный поток. Соответственно, в первом случае интервал исчезновения потока составил немногим более часа, а во втором ~40 мин. С точки зрения современных моделей стока, использующих суточный либо часовой расчетный шаг, распад сети склоновых потоков (и возникновение тоже?) происходит "мгновенно", в пределах одного интервала времени.

ЭФФЕКТ БАССЕЙНОВОГО КОНТРРЕГУЛИРОВАНИЯ

Наиболее яркое проявление нелинейности экстремального стокоформирования — эффект бассейнового контррегулирования, т. е. превышение паводкового стока над паводкообразующими осадками по максимальной интенсивности и/или объему. В рамках концепции FCM [4] этот эффект ожидаем и должен систематически проявляться в поверхностном и "прорывном" режимах стокоформирования. С другой стороны, такое предположение необычно и противоречит "повседневному" опыту гидрологов. Указания на отдельные случаи превышения стока над осадками при выдающихся паводках обычно сталкиваются с убеждением в их невозможности, такие



Рис. 9. Записи ионных паводков на дрене Ботанической в 2016 г.: а – 3–4 сентября, б – 19–20 сентября.

случаи трактуются как артефакты, появляющиеся за счет низкого качества наблюдений.

В целом, современная теория стока основана на представлении о различных типах потерь и процессах регулирования, рассматриваемых в линейных либо слабо нелинейных приближениях, что делает контррегулирование в описанном выше смысле невозможным. С другой стороны, бассейновое контррегулирование отвечает базовым физическим принципам сильно нелинейных систем, чья способность к усилению сигналов обусловлена наличием дополнительного ресурса. При возможности быстрой мобилизации предварительно накопленных влагозапасов бассейн представляет собой типичный усилитель, что должно проявляться хоть и редко, но регулярно, во вполне определенных ситуациях.

Упомянутая выше концепция нелинейности В.И. Найденова [9] предполагает в результате роста увлажнения ускоренное возрастание расхода, однако не рассматривает возможности эффекта контррегулирования. Подробное экспериментальное исследование нелинейности при формировании паводкового стока на склонах горного бассейна Панола (Джорджия, США) описано в [17], причем авторы уделяют внимание пороговым эффектам в отношении интенсивности осадков, величины предпаводкового увлаженения и степени развития склоновой дренажной сети. Однако и здесь не упоминается возможность превышения стока над осадками за отдельный паводок.

Анализ 1800 водопунктов наблюдений за осадками и стоком, выполненный для 60 малых бассейнов Приморья, позволил обнаружить 55 случаев превышения максимального суточного слоя стока за паводок над суточным максимумом паводкообразующих осадков в летне-осенний сезон. Жесткий отбор с учетом возможных погрешностей данных сократил выборку до пяти максимально надежных случаев. Отметим, что ошибки в данных возможны в обе стороны, т. е. часть случаев превышения могла не попасть в выборку. В итоге обеспеченность проявлений бассейнового контррегулирования в Приморье оценивается



Рис. 10. Пересекающиеся кривые обеспеченности максимальных за июнь–сентябрь суточных слоев осадков (м/с) (Щербаковка, темные точки) и стока (Маргаритовка–Маргаритово, 763 км², светлые круги).

в 0.3—3.0%, что лежит в диапазоне принятых нормативов для инженерных расчетов. Максимальное превышение стока над осадками достигает 40— 45 мм/сут, что соответствует оценкам возможной мобилизации грунтового влагозапаса в режиме поверхностного стокоформирования (табл. 2).

Анализ выборок по 100 бассейнам в Приморье выявил для пяти из них пересечения кривых обеспеченности максимальных суточных слоев стока и осадков за летне-осенний сезон (рис. 10). Учитывались случаи, подтвержденные эмпирическими точками либо полученные при небольшой экстраполяции кривых с обеспеченностями точек пересечения 2–0.1%. Поскольку кривые для осадков строились по данным отдельных станций, а не для средних значений по бассейнам, эти факты имеют запас надежности и свидетельствуют о регулярности проявлений контррегулирования.

Детальный воднобалансовый анализ с использованием FCM [3] выявил редкий случай наблюдения эффекта контррегулирования с высокой надежностью и двойной повторностью. Два аналогичных соседних бассейна рек, впадающих в Японское море, показали сходные режимы стока в летне-осенний период 1989 г., включая исторический паводок под воздействием тайфуна Джуди в конце июля. Осадки по каждому из них вычислялись по данным двух независимых метеостанций. По бассейну Маргаритовка-Маргаритово предпаводковый влагозапас был примерно на уровне ТМС. Выпавший дождь слоем 340 мм за 4 сут с максимумом 157 мм/сут вызвал сток 390 мм за 6 сут с максимумом 203 мм/сут (27.07.1989). По бассейну Аввакумовка-Ветка

предпаводковая свободная емкость бассейна оценивалась в ~10% *ТМС*. Выпадение 190 мм осадков за 4 сут при максимуме 94 мм/сут вызвало сток 220 мм за 5 сут с максимумом 94 мм/сут.

Более очевидно эффект контррегулирования проявляется на реках о. Тайвань. Анализ выборок максимальных суточных слоев осадков и стока за паводок по тайваньским бассейнам представлен в табл. 4. Все бассейны имеют площадь <1000 км² и интенсивный паводковый режим — среднегодовой сток варьирует от 1600 до 2800 мм, паводковые максимумы часто >300 мм/сут, достигают 400–900 мм/сут. Отметим, что наблюдения на о. Тайвань отличаются высоким пространственным разрешением и надежностью.

В целом, частота проявлений эффекта контррегулирования на о. Тайвань на 1-2 порядка выше, чем в Приморье. Средняя их повторяемость – 1 раз в 2-7 лет, при высоких паводках они наблюдаются в 20-100% случаев. Максимальные величины превышения стока нал осалками (надежные оценки) составляют от 56 до 151 мм/сут, что хорошо соответствует оценкам FCM возможной мобилизации бассейнового влагозапаса при поверхностном и "прорывном" режимах (табл. 2). Единственное исключение с полным отсутствием эффекта – бассейн Сан-Лин Бридж (San-Lin Bridge) сильно вытянутой и зауженной формы, что, очевидно, выражается в увеличении времени руслового добегания и интенсивной редукции паводковой волны.

Графическим представлением обсуждаемой концепции контррегулирования может служить типичный пример связи $\{Q_{\max}, P_{\max}\}$, представленный на рис. 11. Поле точек отражает соотношения

Бассейн	Площадь, км ²	Количество метеостанций	Частота превышений (%) для паводков с <i>Q_{max}</i> больше, чем			Наибольшее	Среднегодовое количество
			50	150	300	I · · · ·	превышений
Хенг-Чи	52.9	1	18	40	80	116	0.55
Сан-Хсиа (San-Hsia)	125	1	17	47	100	112	0.44
Та-Лу-Кенг	247	2	18	28	40	82 (423)	0.46
Пи-Ан-Чоу (Pi-An-Chou)	110	1	9	18	50	128	0.20
Caн-Tи-Meн (San-Ti-Men)	409	2	11	19	20	151 (503)	0.44
Сан-Лин Бридж	519	3	_	_	_	_	_
Тунг-Toy 2 (Tung-Tou 2)	259	2	6	9	17	128 (588)	0.17
Пеи-Канг (Pei-Kang)	597	4	7	25	100	56	0.13
Лан-Янг Бридж (Lan-Yang Bridge)	821	5	5	17	50	85	0.13

Таблица 4. Превышения максимальной суточной интенсивности осадков (P_{max} , мм/сут) над стоком (Q_{max} , мм/сут) для рек о. Тайвань (в скобках – данные сомнительной точности)

максимальных суточных слоев стока и осадков для паводков с $Q_{\rm max} > 50$ мм/сут и сглажено линией регрессии, соответствующей полиному третьей степени. Зависимость на диаграмме разделяется на три части.

Первая часть начинается от нуля и идет под примерно постоянным углом к линии равных значений, что отвечает концепции постоянства коэффициента паводкового стока. Затем линия регрессии изгибается и на втором участке приблизительно параллельна линии равных значений, что отвечает представлениям о постоянстве предельной величины потерь паводкового стока. На третьем участке линия регрессии приближается к линии равных значений и затем пересекает ее, что указывает на систематический характер



Рис. 11. Соотношение максимальных суточных слоев стока и осадков для паводков с $Q_{\text{max}} > 50$ мм/сут. 1-3- участки линии регрессии.

значительных превышений стока над осадками и соответствует концепции контррегулирования. Точки пересечений линий регрессии и равных значений соответствуют расходам в 300—600 мм/сут для разных бассейнов, выше которых эффект контррегулирования преобладает. Точки перегибов между участками линии регрессии удовлетворительно, с учетом погрешности построения, соответствуют оценкам $Q_{\rm cr}$ и $Q_{\rm bur}$ для бассейнов о. Тайвань (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При современном состоянии гидрологического моделирования целесообразность разработки новой модели критически зависит от способа ее параметризации, а также от корректности и полноты верификации. Обычная процедура тестирования, основанная на проверке качества воспроизведения моделью рядов стока, должна быть дополнена углубленным анализом концептуальных основ модели. В случае FCM, ориентированной на описание экстраординарных паводков, серьезные затруднения представляет редкость изучаемых событий, неполнота и относительно низкая точность данных, почти всегда позволяющие оспорить их достоверность. При этом возрастает ценность немногочисленных прямых наблюдений экстремальных паводков на специально оборудованных экспериментальных бассейнах. отличающихся повышенной точностью, детальностью и разнообразием наблюдаемых характеристик.

Тестирование модели FCM выполнено с применением традиционных процедур по стандартным данным, полученным на 125 малых речных бассейнах Дальневосточного региона России, Западного Кавказа, Австрии и о. Тайвань. Результаты тестирования показали высокое качество моделирования в условиях, отвечающих основным ограничениям модели. Подтверждены также достаточные точность и устойчивость оценок основных параметров, получаемых независимым анализом данных многолетних гидрологических наблюдений, что является итоговой верификацией процедур параметризации.

Обобщение литературных сведений, результатов специального анализа массовых данных в паводкоопасных регионах и собственных детальных натурных наблюдений на экспериментальных бассейнах позволяет подтвердить реалистичность некоторых основных гипотез FCM: существование трех режимов стокоформирования, различающихся по его эффективности; наличие пороговых величин расхода, фиксирующих переходы между режимами; важность роли пространственно-временной динамики склоновой дренажной системы, обеспечивающей нелинейность бассейнового отклика на выдающиеся дожди. Получена аргументация в пользу реальности эффекта контррегулирования стока вследствие быстрой мобилизации бассейнового влагозапаса, который представляет собой хотя и редкий, но принципиально важный феномен при формировании экстраординарных дождевых паводков. Теоретические и экспериментальные исследования эффекта контррегулирования имеют как фундаментальное значение для развития теории формирования речного стока, так и прикладное – для оценки катастрофических паводков, особенно в условиях нестационарного климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Василенко Н.Г. Гидрология рек зоны БАМ: экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История, 2013. 672 с.
- 2. Васильева Е.С., Белякова П.А., Алексюк А.И., Селезнева Н.В., Беликов В.В. Моделирование быстроразвивающихся паводков на малых реках Северного Кавказа с использованием современных данных автоматизированной гидрометеорологической сети // Вод. ресурсы. 2021. Т. 48. № 2. С. 135–146.
- Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 223 с.
- 4. Гариман Б.И. Модель стока FCM для малых рек с дождевым питанием 1. Концепция и алгоритмы // Вод. ресурсы. 2023. Т. 50. № 4. С. 395–406.
- 5. Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю. и др. Формы линейной организации склонового стока в среднегорье (на примере Сихотэ-Алиня) // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 123–132.
- 6. Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Шамов В.В. Речные системы Дальнего Востока России: четверть века исследований. Владивосток: Дальнаука, 2015. 492 с.
- 7. Ли К.Т., Чен Н.К., Гарцман Б.И., Бугаец А.Н. Современная версия модели единичного гидрографа и ее применение в Тайване и России // География и природ. ресурсы. 2009. № 1. С. 144–151.
- 8. *Михайлов В.М.* Пойменные талики Северо-Востока России. Новосибирск: Гео, 2013. 244 с.
- 9. Найденов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши. М.: Наука, 2004. 318 с.
- 10. Шамов В.В., Шекман Е.А., Губарева Т.С. и др. Характеристики и условия формирования предпочтительных водопроводящих путей на склонах долин малых горных рек // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3. № 3. С. 275–296.
- Belyakova P.A., Gartsman B.I. Possibilities of flood forecasting in the West Caucasian rivers based on FCM model // Water Resour. 2018. T. 45. № S1. C. S50–S58.
- 12. *Beven K.J.* Rainfall-runoff Modelling: The Primer. Chichester: Wiley&Sons, 2001. 488 p.
- Bloeschl G. 133 Rainfall-runoff Modelling of Ungauged Catchments // Encyclopedia of Hydrol. Sci. / Eds M.G. Anderson, J.J. McDonnell. New York: John Wiley, 2005. P. 2061–2080. https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa140

- 14. *Gartsman B.I., Lupakov S.Yu.* Changes in the maximum runoff regime in the Ussuri River Basin: the methodological aspects of forecasting based on dynamic-stochastic simulation // Water Resour. 2018. T. 45. N

 1 P. 79–89.
- 15. Gonchukov L.V., Bugaets A.N., Gartsman B.I., Lee K.T. Weather radar data for hydrological modelling: an application for south of Primorye region, Russia // Water Resour. 2019. T. 46. № 2. P. 25–30.
- Mathematical models of small watershed hydrology // Eds V.P. Singh, D.K. Frevert. Highlands Ranch: Water Resour. Publ., 2001. 972 p.
- Tromp-van Meerveld H.J., McDonnell J.J. Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope // Water Resour. Res. 2006. V. 42. W02410.
 https://doi.org/10.1020/2004WD002778

https://doi.org/10.1029/2004WR003778

- van Meerveld H.J.I., Kirchner J.W., Vis M.J.P., Assendelft R.S., Seibert J. Expansion and contraction of the flowing stream network alter hillslope flowpath lengths and the shape of the travel time distribution // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2019. V. 23. P. 4825–4834. https://doi.org/10.5194/hess-23-4825-2019
- 19. *Wagener T., Wheater H.S., Gupta H.V.* Ranfall-runoff Modelling in gauged and ungauged catchments. London: Imperial College Press, 2004. 332 p.

422