

## ГЕОГРАФИЯ ЗА РУБЕЖОМ

УДК 551.4:571.6

К. Т. ЛИ, Н. К. ЧЕН, Б. И. ГАРЦМАН, А. Н. БУГАЕЦ

### СОВРЕМЕННАЯ ВЕРСИЯ МОДЕЛИ ЕДИНИЧНОГО ГИДРОГРАФА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ТАЙВАНЕ И РОССИИ

*Рассмотрены концепция, структура и основные алгоритмы модели геоморфологического мгновенного единичного гидрографа, основанного на уравнении кинематической волны. Модель разработана и успешно применяется для расчетов и прогнозов дождевых паводков на Тайване. Представлены результаты ее сравнительного тестирования на малых водосборах Тайваня и России (Приморье), выполняемого для проверки применимости модели в регионе с существенно отличающимися условиями. Обсуждены ограничения и перспективы совершенствования модели.*

Ключевые слова: гидрологическое моделирование, геоморфологический мгновенный единичный гидрограф, кинематическая волна, нелинейность.

*We examine the concept, the structure and the main algorithms of the model for a geomorphological instantaneous unit hydrograph based on the kinematic wave equation. The model has been developed and is successfully implemented in calculations and forecasts of rain-induced floods on Taiwan. We present the results from its comparative testing on small catchments of Taiwan and Russia (Primorski Krai) made to verify the validity of the model in the region with substantially differing conditions. The limitations of the model and the prospects of its perfection are discussed.*

Keywords: hydrological modelling, geomorphological instantaneous unit hydrograph, kinematic wave, nonlinearity.

#### ВВЕДЕНИЕ

Единичный гидрограф можно считать одной из классических и наиболее разработанных моделей, применяемых в речной гидрологии. Впервые предложенная Л. К. Шерманом в 1932 г., она активно использовалась для расчетов и прогнозов стока как за рубежом, так и в России [1–3]. Ряд версий, в том числе широко применяемый интеграл Дюамеля с использованием функции влияния в виде кривой Калинина–Милюкова (instantaneous unit hydrograph — IUH, по Нэшу [4]), сохраняют основы идеологии классического подхода. Это, во-первых, линейный характер модели, выраженный в соблюдении принципа суперпозиции, во-вторых, ее чисто эмпирический характер, приводящий к исключительной роли процедур калибровки в применении модели при почти полном отсутствии привлекаемой независимой информации о моделируемой системе.

Отмеченные недостатки сильно ограничивали научную и практическую ценность модели единичного гидрографа. Однако в последней четверти XX в. эта модель получила существенное развитие, что вернуло ей научную актуальность и привлекательность для практического применения. Новая версия обозначается в зарубежной литературе аббревиатурой GIUH (geomorphologic IUH), ее теория подробно изложена в публикациях [5, 6]. Существенное усовершенствование в модели GIUH — насыщение ее огромным количеством информации о геоморфологии и гидравлике бассейна, его речной сети. Получение этой информации стало возможным после появления широко доступных цифровых моделей рельефа (ЦМР) и программных средств их обработки.

Таким образом, удалось уйти от чисто эмпирических процедур на основе калибровки по данным гидрометеорологических наблюдений и получить возможность применения модели для неизученных бассейнов. Единичный гидрограф в версии GIUH уже относится к типу квазираспределенных моделей, так как он учитывает в обобщенном виде пространственное распределение характеристик

стокоформирующих процессов в бассейне. Однако второй важнейший недостаток модели — ее линейный характер — в версии GIUN остается. В 1990-е гг. по мере распространения представлений о нелинейности и принципиальной специфике процессов экстремального стокоформирования наметилась необходимость дальнейшего развития модели GIUN с целью придания ей нелинейных свойств.

В статье представлен один из вариантов такого развития — модель геоморфологического мгновенного единичного гидрографа, основанная на уравнении кинематической волны (KW-GIUN). Она разработана К. Т. Ли с соавторами [7–10] и применяется для расчетов и прогнозов паводков в Тайване. Предполагается, что эта модель отражает влияние геоморфологии бассейна, растительного покрова, почвенных характеристик и интенсивности осадков на стокоформирование. Ее отличие от исходной версии GIUN заключается в учете нелинейности стокоформирующих процессов в зависимости от интенсивности осадков, что достигается расчетом по уравнению кинематической волны времени добегающего на каждом шаге моделирования. Представлены результаты испытаний модели, проводимых в малых речных бассейнах Приморья для проверки ее применимости в широких географических рамках.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИ KW-GIUN

Любая версия модели единичного гидрографа описывает только процессы стекания воды по водосбору. Если осадки выпадают над водосбором с равномерной интенсивностью, то можно представить дождь состоящим из большого числа независимых капель. Каждая капля, падая на водосбор случайным образом, попадает в русловую сеть и достигает замыкающего створа по некоторому пути за определенное время. Единичный мгновенный гидрограф обобщает совокупность таких путей в данный момент времени и может быть рассчитан по геоморфологическим характеристикам этого водосбора.

Основываясь на системе классификации речной сети Хортона–Штралера, представим водосбор порядка  $\Omega$  в виде совокупности разнопорядковых потоков и примыкающих к ним частных водосборов тех же порядков. Пусть  $x_{oi}$  — набор частных водосборов  $i$ -го порядка, а  $x_i$  — набор потоков  $i$ -го порядка, где  $i = 1, 2, \dots, \Omega$ . Ясно, что переход капли воды, выпавшей на  $x_{oi}$ , возможен только в направлении  $x_{oi} \rightarrow x_i$ , а из  $x_i$  только в направлении  $x_i \rightarrow x_j$ , где  $j > i$ . Следовательно, каждая капля будет двигаться по пути  $x_{oi} \rightarrow x_i \rightarrow x_j \rightarrow \dots \rightarrow x_{\Omega}$  (рис. 1). Его вероятность можно выразить как

$$P(w) = P_{oA_i} \cdot P_{x_{oi}x_i} \cdot P_{x_ix_j} \dots P_{x_kx_{\Omega}}, \quad (1)$$

где  $w \in W$ ;  $W$  — пространство путей, заданное как  $W = \langle x_{oi}, x_i, x_j, \dots, x_{\Omega} \rangle$ ;  $P_{oA_i}$  — вероятность попадания осадков на частную водосборную площадь  $i$ -го порядка, равная отношению суммы площадей водосборов  $i$ -го порядка к общей площади водосбора;  $P_{x_{oi}x_i}$  — вероятность перехода  $x_{oi} \rightarrow x_i$ , всегда равная единице;  $P_{x_ix_j}$  — вероятность перехода  $x_i \rightarrow x_j$ .

Обозначим время пробега капли воды по любому элементу  $x_i$  как  $T_{x_i}$ , тогда общее время добегающего по  $w$  до замыкающего створа будет

$$T_w = T_{x_{oi}} + T_{x_i} + T_{x_j} + \dots + T_{x_{\Omega}}. \quad (2)$$

Показано [7], что если время добегающего на каждом из этапов движения статистически независимо, и  $f_{x_j}(t)$  — функция распределения плотности вероятности времени добегающего на этапе

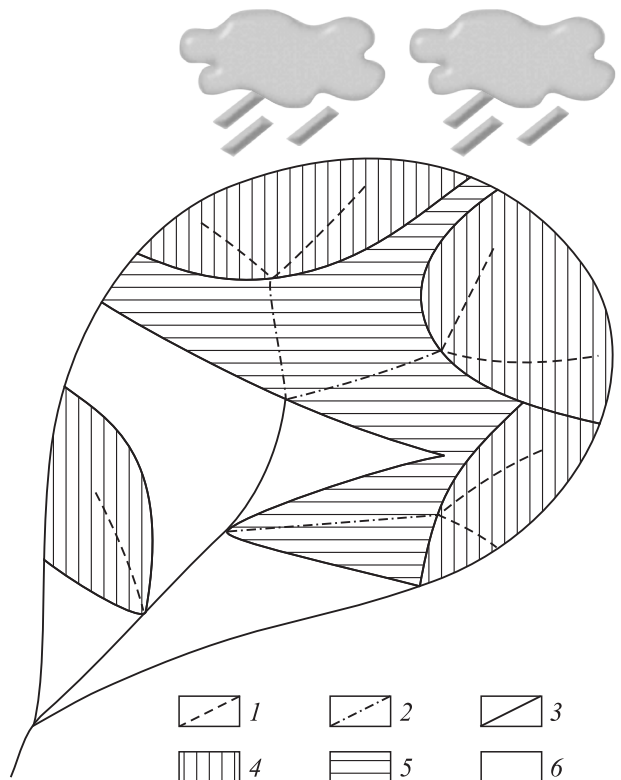


Рис. 1. Принципиальная схема классификации водотоков по схеме Хортона–Штралера и структуризации частных водосборов.

Водотоки: 1 — 1-го порядка, 2 — 2-го порядка, 3 — 3-го порядка; частные водосборы: 4 — 1-го порядка, 5 — 2-го порядка, 6 — 3-го порядка.

$x_j$  — описывается экспонентой, то мгновенный единичный гидрограф может быть выражен через конволюционный интеграл [6]:

$$u(t) = \sum_{w \in W} \left[ f_{x_{oi}}(t) \cdot f_{x_i}(t) \cdot f_{x_j}(t) \dots f_{x_{\Omega}}(t) \right]_w \cdot P(w). \quad (3)$$

Для оценки  $T_x$  на каждом из этапов представим частный водосбор как V-образный, состоящий из двух прямоугольных поверхностей, по которым происходит сток. Тогда для частного водосбора  $i$ -го порядка со средней длиной склонового  $\bar{L}_{oi}$  и руслового  $\bar{L}_{ci}$  пробегов время добегаания по склону может быть выражено на основе уравнения кинематической волны [7]:

$$T_{x_{oi}} = \left( \frac{n_o \bar{L}_{oi}}{\bar{S}_{oi}^{1/2} i_e^{m-1}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (4)$$

где  $n_o$  — коэффициент шероховатости для склонового потока;  $\bar{S}_{oi}$  — средний уклон частного водосбора  $i$ -го порядка;  $m$  — показатель степени;  $i_e$  — стокоформирующая часть дождевых осадков.

Время пробега по руслу выражается в виде следующего уравнения:

$$T_{x_i} = \frac{B_i}{2i_e \bar{L}_{oi}} \left[ \left( h_{coi}^m + \frac{2i_e n_c \bar{L}_{oi} \bar{L}_{ci}}{\bar{S}_{ci}^{1/2} B_i} \right) - h_{coi} \right], \quad (5)$$

где  $n_c$  — коэффициент шероховатости русла;  $\bar{S}_{ci}$  — средний уклон русла  $i$ -го порядка;  $B_i$  — ширина русла и  $h_{coi}$  — глубина потока, зависящая от притока воды с вышележащих русловых элементов. Для водотоков первого порядка  $h_{coi} = 0$ , поскольку вышележащих русловых элементов нет. Для остальных водотоков глубина вычисляется по формуле

$$h_{coi} = \left[ \frac{i_e n_c (N_i \bar{A}_i - A P_{oA_i})}{N_i B_i \bar{S}_{ci}^{1/2}} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (6)$$

где  $N_i$  — количество притоков  $i$ -го порядка;  $\bar{A}_i$  — средняя площадь водосбора  $i$ -го порядка (полная, а не частная).

Таким образом, для реализации описанной выше модели требуются следующие параметры:  $P_{x_i x_j}$  — вероятность впадения водотока  $i$ -го порядка в водоток порядка  $j$ ;  $\bar{L}_{oi}$  — средняя протяженность стекания по склону  $i$ -го порядка;  $\bar{S}_{oi}$  — средний уклон склона  $i$ -го порядка;  $n_o$  — коэффициент шероховатости для склонового потока;  $\bar{L}_{ci}$  — средняя протяженность водотока  $i$ -го порядка;  $\bar{S}_{ci}$  — средний уклон водотока  $i$ -го порядка;  $n_c$  — коэффициент шероховатости русел;  $\bar{A}_i$  — средняя площадь водосбора  $i$ -го порядка;  $B_i$  — средняя ширина водотока  $i$ -го порядка.

Определение такого количества параметров по топографическим картам заняло бы слишком много времени. Сейчас процедура определения геоморфологических параметров, входящих в модель, по ЦМР достаточно хорошо разработана (например, в ArcGIS Desktop [11]). Приведем расчетные формулы для определения параметров, за исключением  $\bar{A}_i$ ,  $\bar{L}_{ci}$ ,  $\bar{S}_{ci}$ ,  $\bar{S}_{oi}$ , которые находятся методом осреднения по набору однопорядковых водотоков.

Вероятность  $P_{x_i x_j}$  перехода  $x_i \rightarrow x_j$  определяется по формуле

$$P_{x_i x_j} = \frac{N_{i,j}}{N_i}, \quad (7)$$

где  $N_{i,j}$  — количество водотоков  $i$ -го порядка, впадающих в водотоки  $j$ -го порядка. Вероятность  $P_{oA_i}$  рассчитывается по формуле

$$P_{oA_i} = \frac{1}{A} \left( N_i \bar{A}_i - \sum_{l=1}^{i-1} N_l \bar{A}_l P_{x_l x_i} \right), \quad (8)$$

где  $A$  — площадь водосбора в замыкающем створе.

В уравнении (4) для принятых в модели V-образных водосборов длины склонового стока рассчитываются по формуле

$$\bar{L}_{oi} = \frac{A P_{oA_i}}{2 N_i \bar{L}_{ci}}. \quad (9)$$

Коэффициенты шероховатости  $n_o$  и  $n_c$  (уравнения (4), (5)) можно определить эмпирически путем калибровки либо по существующим таблицам [12]. В обоих случаях оценка шероховатости для каждого склонового и руслового элемента представляется невыполнимой, да и ненужной. Рацио-

нальное упрощение в модели KW-GIUN достигается принятием одного значения  $n_o$  для всех склонов бассейна и учетом зависимости шероховатости русла от порядка водотока в виде следующего уравнения:

$$n_{c_i} = n_{c_\Omega} \left( \frac{\bar{S}_{c_i}}{\bar{S}_{c_\Omega}} \right)^{0,38} . \quad (10)$$

Последний из параметров, необходимых для определения  $T_{x_i}$ , —  $B_i$  — ширина реки  $i$ -го порядка. Как правило, ширина реки пропорционально увеличивается с ростом ее порядка. Основываясь на этом предположении, для расчета  $B_i$  предложена следующая линейная зависимость [7, 8]:

$$B_i = \frac{B_\Omega \sum_{l=1}^i \bar{L}_{c_l}}{\sum_{l=1}^{\Omega} \bar{L}_{c_l}}, \quad (11)$$

где  $B_\Omega$  — ширина реки в замыкающем створе — единственный параметр, требующий непосредственного измерения в полевых условиях.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ И ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Для демонстрации способности модели KW-GIUN имитировать сток в различных климатических зонах использованы гидрологические данные четырех малых бассейнов — станций Хен-Чи и Ву-Ту в горных районах Тайваня и постов на реках Комаровка-Центральный и Комаровка-Садовый на территории Приморской водно-балансовой станции в южном Приморье (см. таблицу).

Тайвань расположен во влажной субтропической зоне со среднегодовыми осадками около 2500 мм и диапазоном среднемесячных температур воздуха от 29,7 °С летом до 13,2 °С зимой. Тайфуны воздействуют на погоду острова и приносят обильные осадки с мая по сентябрь. На севере Тайваня сильные дожди и вызываемые ими паводки наблюдаются круглый год. В режиме рек центральной и южной частей острова хорошо выражена межень, обусловленная сухим зимним сезоном. Для рек Тайваня характерны небольшие площади бассейнов (для самых крупных — немногим более 3000 км<sup>2</sup>). При этом реки отличаются большим диапазоном высот в пределах бассейнов (обычно 1500–2500 м), большой водностью (среднегодовой слой стока 1500–2000 мм). Дождевые паводки здесь имеют экстремально высокие, близкие к наивысшим в мире, удельные пиковые значения расходов.

Приморье располагается в пределах области восточноазиатского муссона умеренных широт. Среднегодовые суммы осадков изменяются от 1200 мм в горах до 600 мм на равнине. Тайфуны оказывают влияние на погоду преимущественно с июля по сентябрь. Среднемесячные температуры изменяются от –10 ÷ –24,9 °С зимой до 15,4–20,9 °С летом. Дождевые паводки на реках Приморья — основной элемент гидрологического режима рек, паводковый сезон длится с июня по октябрь. Удельные пиковые значения расходов близки к наивысшим на территории Российской Федерации, но при этом в несколько раз ниже, чем на тайваньских реках [13].

Для численных прогонов модели выбирались отдельные паводковые события на основе анализа ливневых осадков и прохождения тайфунов (для российских бассейнов только в период с июня по октябрь). При расчетах в модели применялся часовой шаг по времени, который рассматривался как верхний предел для использования уравнения кинематической волны. При подготовке данных выполнялся предварительный расчет эффективных осадков на основе уравнения инфильтрации и проводилось расчленение гидрографа для определения поверхностного и подземного стоков. Использовалась линейная схема расчленения гидрографа, предполагающая равномерное нарастание подземного стока от величины предпаводочного расхода до величины расхода по окончании паводка [7, 8].

Основные характеристики исследуемых бассейнов

Бассейн	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Порядок бассейна	Длина главного русла, м	Средний уклон, ‰	
				главного русла	бассейна
Хен-Чи	53,2	4-й	14 019	0,0440	0,282
Ву-Ту	204	4-й	48 097	0,0408	0,386
Комаровка-Центральный	157	4-й	26 532	0,0105	0,125
Комаровка-Садовый	395	5-й	35 428	0,0086	0,179

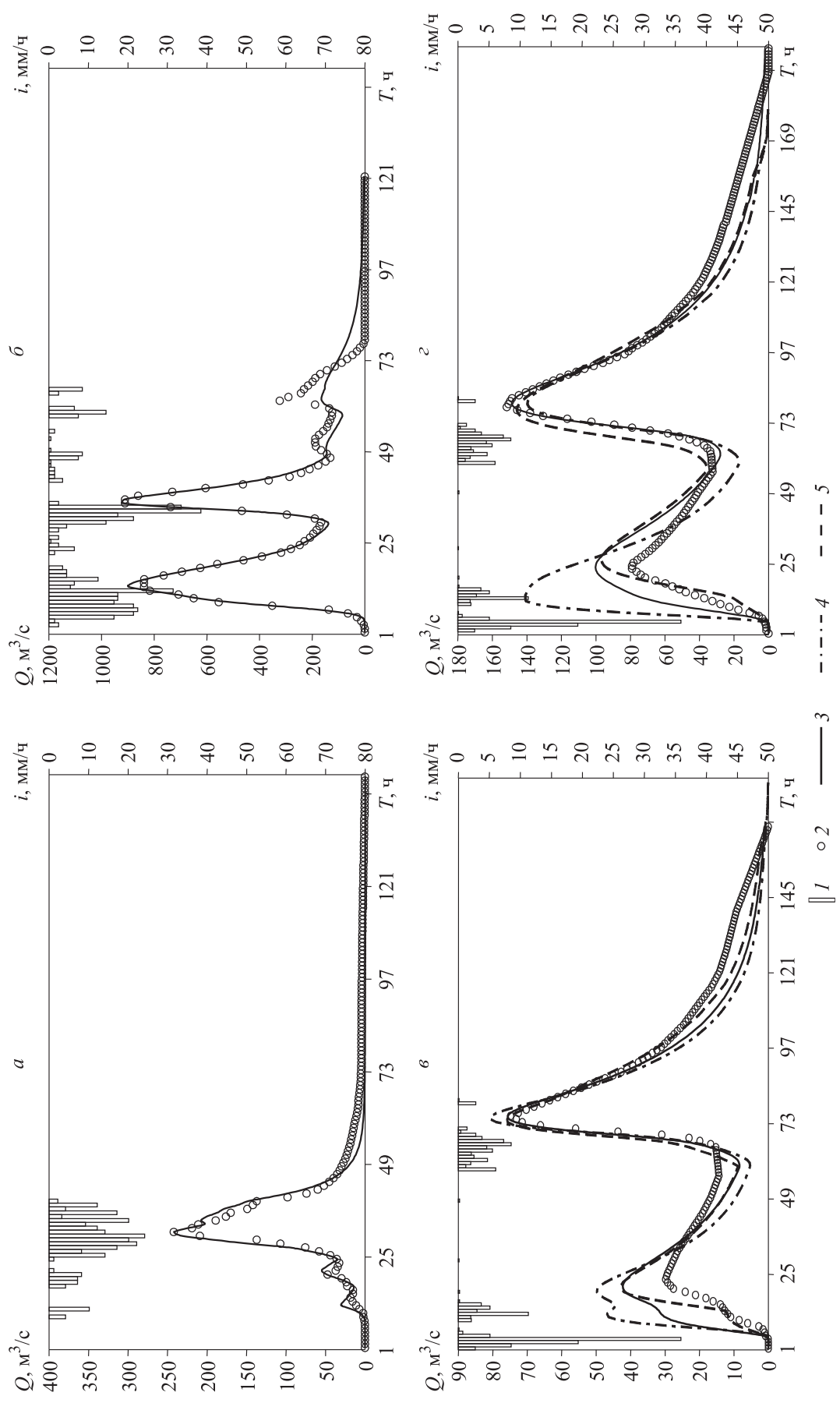


Рис. 2. Измеренные и моделированные гидрографы стока.

Бассейны: а — р. Хен-Чи, Тайвань, июль 1996 г.; б — р. Ву-Гу, Тайвань, октябрь 1998 г.; в — р. Комаровка-Центральный, Приморье, август 1971 г.; г — р. Комаровка-Садовый, Приморье, август 1971 г. 1 — слой осадков, мм/ч; 2 — измеренные расходы, м³/с; 3 — измеренные расходы, м³/с; 4 — по базовой версии KW-GIUY, 5 — по первому варианту усовершенствованной версии, 5 — по второму варианту усовершенствованной версии (см. текст).

Нами приведены примеры моделирования отдельных паводков (рис. 2). Они показывают применимость модели KW-GIUN для всех исследуемых бассейнов и хорошее качество моделирования паводков. При прогонах модели выполнялась калибровка параметров шероховатости склонов и русел, как это описано выше. В качестве оценки ширины русла использовалась максимальная ширина разлива воды по пойме при высоких паводках. На рис. 2 представлены варианты модельного гидрографа, полученные по модели KW-GIUN, в точности соответствующей изложенному выше алгоритму, а также по усовершенствованной версии модели, адаптированной к условиям юга Дальневосточного региона России. Необходимость такого усовершенствования подробнее обсуждается ниже.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Модель KW-GIUN применяется в Тайване широко и в целом успешно [9, 10]. Причем успех заключается не только в достаточной для различных инженерных приложений точности расчетов и прогнозов паводков, но и в устойчивости значений калибруемых параметров, которые в большинстве своем принимают значения в пределах физически осмысленных интервалов. Это указывает на высокую адекватность модели условиям формирования паводков на водосборах Тайваня. Рассмотрим с этой точки зрения концептуальные основы модели.

Во-первых, сама возможность осреднения геоморфологических и гидравлических параметров по порядкам водотока, а также особенности калибровочной процедуры KW-GIUN допустимы при высокой степени однородности бассейна с точки зрения единообразия строения склонов и русел, растительного и почвенного покрова, а также равномерности покрытия слоем осадков от одного дождя. Это условие хорошо выполняется для небольших гористых бассейнов Тайваня, в которых формируются чрезвычайно интенсивные дождевые паводки. Отметим, что при моделировании затопления расширенных участков долин в нижнем течении более крупных рек, интенсивно застраиваемых и используемых для сельского хозяйства, на Тайване применяются одномерные модели движения паводочной волны типа HEC-RAS, так как модель KW-GIUN становится непригодной.

Задачи инженерной гидрологии в России связаны, как правило, с необходимостью моделировать сток с гораздо более крупных бассейнов, особенно это касается прогнозов. Сами понятия о размерах бассейнов существенно различаются не только из-за разницы физико-географических условий и освоенности территории, но и из-за крайне недостаточной гидрологической изученности российского Дальнего Востока. Если российские исследователи относят к категории «малые» речные бассейны площадью 1–2 тыс. км<sup>2</sup>, то тайваньские ученые уже считают бассейны более 100 км<sup>2</sup> средними, а 1500–3000 км<sup>2</sup> — большими. Считать однородными бассейны с площадями в тысячи квадратных километров, как правило, совершенно невозможно.

Поэтому для расширения возможностей использования модели KW-GIUN представляется необходимым разработка версии, значительно более детально учитывающей пространственную неоднородность как параметров водосбора, так и осадков. В структуре модели такая возможность заложена — она заключается в переходе от учета типов путей добегания воды (см. рис. 1) к индивидуальному учету отдельных путей добегания. В этом случае параметры в формулах (2), (4)–(6), (9)–(11), осредненные по порядкам водотоков и склонов, должны заменяться на определенные значения параметров индивидуальных путей добегания от каждого частного водосбора, вычисленные для конкретных водотоков и склонов. Мгновенный единичный гидрограф при этом строится для каждого из частных водосборов, расчетные стоки с которых затем суммируются. Таким образом, модель KW-GIUN может быть органично преобразована в пространственно-распределенную модель стока.

Вторая особенность KW-GIUN — предположение о поверхностном и притом в принципе единообразном характере стекания (кинематическая волна) как по руслам, так и по склонам. Это предположение удовлетворительно выполняется на Тайване, где интенсивность и слой осадков за паводок достигают таких величин, что поверхностное стекание имеет массовое распространение, а величины начальных и текущих потерь стока ничтожно малы и сопоставимы с ошибками измерений стока. В Приморье, напротив, поверхностный сток наблюдается редко, несмотря на выдающиеся для России характеристики ливней, а начальные потери стока имеют определяющее значение для формирования паводка [14, 15].

Одна из возможностей преодоления этого недостатка модели заключается в разработке «двухслойной» версии KW-GIUN [8], в которой независимо строятся единичные гидрографы поверхностного и подповерхностного (на основе уравнения Дарси) стекания. В России, однако, более принято разделение бассейна на склоновую и русловую подсистемы, для которых формулируются соответствующие блоки модели. Представляется целесообразным выполнить корректировку структуры KW-GIUN на основе региональных разработок российских гидрологов.

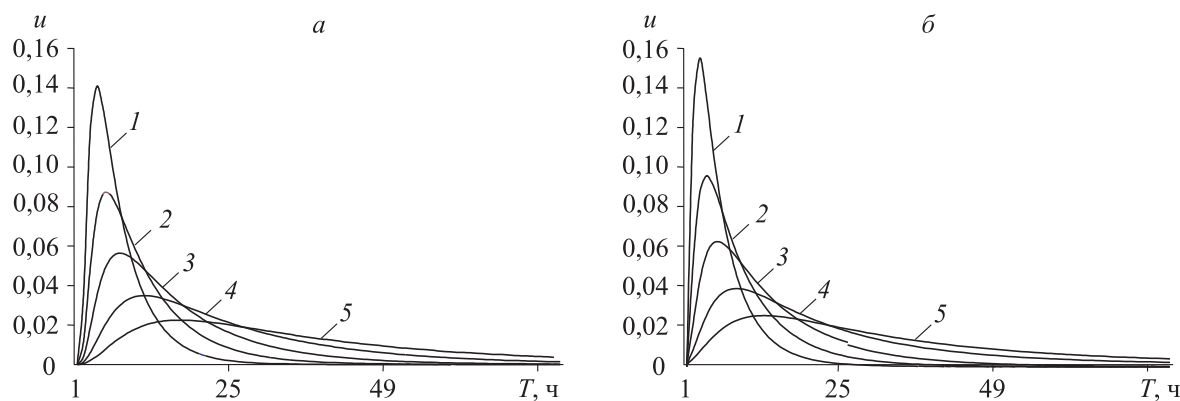


Рис. 3. Ординаты единичного гидрографа по бассейну р. Комаровка-Центральный при единичных дождях слоем 1, 3, 10, 30 и 100 мм/ч (кривые соответственно 1–5).

а — по базовой версии модели KW-GIUN; б — по усовершенствованной версии модели с индивидуальным учетом путей добегания от каждого частного водосбора.

Наконец, третья существенная особенность модели KW-GIUN — ее нелинейный характер, выраженный в зависимости формы мгновенного единичного гидрографа от интенсивности осадков. В результате этого отклик бассейна на более сильный дождь наступает значительно быстрее, чем на более слабый, и величина пикового расхода паводка возрастает нелинейно с увеличением интенсивности дождя. Это ценное свойство модели, которое, очевидно, вполне адекватно отражает особенности реального процесса стокообразования, наглядно проявляющиеся именно при экстремальных дождевых паводках.

Нами приводятся результаты расчетов паводков не только по исходной версии KW-GIUN, но и по вариантам усовершенствованной версии (см. рис. 2, в). В одном из них алгоритм построения GIUN на основе осредненных по порядкам характеристик водотоков и склонов заменен на алгоритм суммирования индивидуальных GIUN от каждого частного водосбора. Таким образом, в данном примере для бассейна р. Комаровка-Центральный учет восьми типов путей добегания заменен на учет примерно 160 индивидуальных путей, но все остальные детали алгоритма сохранены прежними.

Гидрограф стока за паводок, полученный с помощью этой версии модели при одинаковых значениях калибруемых параметров, отличается от полученного по исходной KW-GIUN большей «остротой», т. е. в среднем меньшим временем реакции водосбора и более отчетливым проявлением нелинейных свойств модели (рис. 3). Это наглядно демонстрирует тот факт, что осреднение характеристик водотоков и склонов по порядкам, даже в пределах небольшого однородного бассейна, представляет собой нелинейную операцию, приводит к смещенности параметров функции бассейнового отклика и некоторому искусственному сглаживанию результирующего гидрографа.

Другой вариант расчетного гидрографа также получен с помощью версии модели с индивидуальным учетом путей добегания, однако для этого варианта изменена еще и процедура подготовки данных об осадках (см. рис. 2, в). Построение кривой инфильтрации по уравнению Хортонa [2] и определение эффективных осадков по их интенсивности, превышающей интенсивность инфильтрации, основаны в целом на теории поверхностного стекания, которая не соответствует условиям Приморья, да и в целом должна считаться устаревшей.

Для последнего варианта использована процедура расчета коэффициента стокообразующих осадков, зависящего от наполнения русловой сети на каждом расчетном шаге. В виде части алгоритма модели паводочного цикла [13, 16] эта процедура разработана и широко опробована в пределах юга Дальневосточного региона России. Результаты расчетов в целом мало отличаются друг от друга, как и следовало ожидать для небольших и однородных по строению анализируемых бассейнов, однако последний вариант демонстрирует значительно более точный учет начальных потерь стока. В полном объеме преимущества усовершенствованной версии KW-GIUN должны проявиться при моделировании более крупных, неоднородных по строению речных бассейнов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель геоморфологического мгновенного единичного гидрографа, основанная на уравнении кинематической волны, представляет собой одну из наиболее современных версий квазираспределенной модели стекания. Она обязана своим появлением развитию автоматизированных технологий анализа структуры речных систем на базе широко доступных цифровых моделей рельефа. Адаптация

и широкое применение KW-GIUN в одном из наиболее паводковых регионов мира — Тайване — показало ее адекватность и хорошие инженерные качества. Испытания модели, выполненные пока в ограниченном объеме на территория Приморья, подтвердили пригодность KW-GIUN для рек умеренного пояса с преобладанием дождевых паводков в режиме. Они же подтвердили и существенные ограничения модели, затрудняющие ее использование для расчетов и прогнозов стока российских рек.

В то же время анализ концепции и результатов испытаний модели показывают, что ее принципы допускают органичное развитие структуры и алгоритмов, которое может значительно повысить и научную, и прикладную ценность KW-GIUN. Представляется возможной разработка эффективной региональной пространственно-распределенной гидрологической модели с использованием KW-GIUN в качестве компонента, описывающего русловое и поверхностное склоновое стекание.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (05–05–90597) и Национального научного совета Тайваня (94WFA2000011).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sherman L. K.** Stream flow from rainfall by the unit-graph method // *Engrg. News Rec.* — 1932. — № 108. — P. 501–505.
2. **Попов Е. Г.** Гидрологические прогнозы. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 256 с.
3. **Виссмен У., Харбаф Т. Г., Кнэпп Р. У.** Введение в гидрологию. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 470 с.
4. **Nash J. E.** Systematic determination of unit hydrograph parameters // *Journ. Geophys. Res.* — 1959. — № 64. — P. 111–115.
5. **Rodrigues-Iturbe I., Rinaldo A.** Fractal River Basin. Chance and self-organization. — Cambridge: Univer. Press, 1997. — 547 p.
6. **Rodrigues-Iturbe I., Valdes J. B.** The geomorphologic structure of hydrologic response // *Water Resour. Res.* — 1979. — № 15 (6). — P. 1409–1420.
7. **Lee K. T., Yen B. A.** Geomorphology and kinematic-wave based hydrograph deviation // *Journ. Hydr. Engrg. ASCE.* — 1997. — № 123 (1). — P. 73–80.
8. **Lee K. T., Chang, C.-H.** Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUN modelling // *Journ. of Hydrology.* — 2005. — Vol. 311. — Iss. 1–4. — P. 91–105.
9. **Lee K. T.** Generating design hydrographs by DEM assisted geomorphic runoff simulation: a case study // *Journ. Amer. Water Resour. Ass.* — 1998. — № 34 (2). — P. 375–384.
10. **Lee K. T., Chung Y.-R., Lau C.-C. et al.** A windows-based inquiry system for design discharge based on geomorphic runoff modelling // *Computers & Geosciences.* — 2006. — № 32 (2). — P. 203–211.
11. **Гарцман Б. И., Бугаец А. Н., Тегай Н. Д., Краснопеев С. М.** Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // *География и природ. ресурсы.* — 2008. — № 2. — С. 20–29.
12. **Карасев И. Ф., Васильев А. В., Субботина Е. С.** Гидрометрия. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 376 с.
13. **Гарцман Б. И.** Эффект бассейнового контррегулирующего при формировании экстремальных дождевых паводков // *География и природ. ресурсы.* — 2007. — № 1. — С. 14–21.
14. **Гарцман И. Н., Лылю В. М., Черненко В. Г.** Паводочный сток рек Дальнего Востока: Труды ДВНИГМИ. — 1971. — Вып. 34. — 263 с.
15. **Горчаков А. М.** Исследование элементов водного баланса и его структуры в Приморье. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 182 с.
16. **Гарцман Б. И., Губарева Т. С.** Прогноз гидрографа дождевых паводков на реках Дальнего Востока // *Метеорол. и гидрол.* — 2007. — № 5. — С. 70–80.

*Национальный Тайваньский университет океана, Кеелунг  
Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток*

*Поступила в редакцию  
11 марта 2008 г.*