

УДК [556.51+911.5]: 519.85

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПОЛОВОДЬЯ ГОРНЫХ РЕК

Ю.Б. Кирста, О.В. Ловцкая

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул
E-mail: kirsta@iwep.ru, kirsta2007@mail.ru, lov@iwep.ru, lov_olga@inbox.ru

На примере 34 средних и малых рек Алтае-Саянской горной страны разработана универсальная имитационная модель прогноза речного стока в период половодья. Входными факторами модели служат месячные осадки и среднемесячные температуры воздуха. Метеорологические характеристики рассчитываются в процентах от их среднемноголетних значений и усредняются по всей площади исследуемой территории. Сток прогнозируется на три месяца вперед с трехкратно меньшей дисперсией, чем у прогноза по среднемноголетнему значению. Качество прогноза характеризуется критерием Нэша-Сатклиффа $NSE > 0,68$ и является очень высоким для долгосрочных прогнозов половодья.

Ключевые слова: системно-аналитическое моделирование, половодье, прогноз, горные реки, Алтай, Саяны.

DOI: 10.24411/2410-1192-2020-15604

Дата поступления 3.03.2020

Решение проблем эффективного использования речного стока в условиях потепления климата и увеличения числа экстремальных погодных явлений требует разработки адекватных прогнозных моделей этого стока. Такие модели дают возможность оценивать риски наводнений, включая катастрофические, заблаговременно принимать меры по предотвращению их неблагоприятных последствий и обеспечивать устойчивое водоснабжение населения в целом [1]. Модели должны учитывать изменения метеорологических, геоморфологических и других факторов среды во времени и/или пространстве, и после выявления наиболее важных из них давать количественный прогноз гидрологического режима рек [2-4]. Данная задача резко осложняется для горных территорий вследствие их сложного орографического строения, не менее сложной пространственно-временной структуры метеорологических полей и редкой сети метеостанций [5-7]. Нами предлагается универсальная математическая модель для долгосрочного прогноза речного

стока в период весенне-летнего половодья. Согласно данным гидрологических наблюдений половодье составляет более половины годового объема стока горных рек, и его прогноз имеет крайне важное значение для борьбы с наводнениями и управления водными ресурсами горных территорий в целом.

Большинство современных прогнозных моделей половодья и речных паводков разработаны для конкретной реки и дают краткосрочный оперативный прогноз с заблаговременностью в несколько дней. Они могут использовать статистические методы обработки метеорологических или гидрологических данных, системы физически обоснованных уравнений гидрологических процессов, ГИС-технологии или все методы одновременно [8-15]. ГИС применяется для учета пространственного распределения данных, визуализации результатов расчетов, моделирования отдельных процессов и других целей. Статистические методы в отдельности не обеспечивают точность, требующуюся для современного управления вод-

ными ресурсами. Поэтому, для характеристики гидрологических процессов в речных бассейнах привлекаются дифференциальные уравнения гидродинамики и математической физики, дополняемые по мере необходимости имитационными уравнениями [16]. Дифференциальные уравнения требуют подробной пространственно распределенной информации об осадках, температурах воздуха, испаряемости, подземных водоносных горизонтах, морфометрии, уклонах, свойствах водонасыщенных почв и трещиноватых пород, показателях сопротивлению течения на склонах и в русловой сети, и т.д. и т.п. Из-за отсутствия подобной информации для горных территорий использование дифференциальных уравнений препятствует увеличению заблаговременности и хорошему качеству прогнозов, а поэтому становится нецелесообразным.

Применяемый нами метод системно-аналитического моделирования [17-19] позволяет обойти изложенные выше проблемы и построить имитационные балансовые модели с адекватным описанием реальных гидрологических процессов. Адекватность будем понимать аналогично [20] как соответствие модели физическим принципам и законам, дополненным принятыми в их рамках допущениями. При этом не будем описывать процессы через дифференциальные уравнения математической физики, характеризующие потоки массы, импульса и различных форм энергии.

Системно-аналитическое моделирование

Метод системно-аналитического моделирования (САМ) позволяет выявить и количественно описать основные процессы и их связь с факторами среды в различных природных системах [17, 19, 21-22]. В настоящей работе САМ применяется для поиска и количественной оценки связей речного стока с метеорологическими факторами, морфометрией и ландшафтной структурой речных бассейнов. САМ позволяет выделить ин-

формацию об этих связях из рядов экспериментальных данных подобно экспертно-аналитическому методу [23].

Имитационная балансовая модель для долгосрочного прогноза весенне-летнего половодья строится в виде системы алгебраических уравнений. Функциональные зависимости между речным стоком и факторами среды находятся через гидрологически обоснованные подбор и корректировку уравнений, обеспечивающих минимальное расхождение (минимальную квадратичную невязку) между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями стока за многолетний период. Параметры модели (ее идентификация) находятся через решение обратной математической задачи с помощью оптимизационных методов пакета программ MATLAB путем подстановки в уравнения данных наблюдений за стоком. При этом у тестируемого варианта модели оценивается получаемая для него квадратичная невязка. Модель считается построенной, когда найдена такая система уравнений, которая обеспечивает наименьшее значение невязки.

В САМ форма искомым зависимостей от факторов среды заранее не фиксируется. Отметим, что у дифференциальных уравнений эта форма фиксирована самим выбором тех или иных уравнений. С этой целью применяли универсальную тестовую функцию H , задаваемую выражением:

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) = \begin{cases} Y1 + Z1(X - X1), & \text{если } X < X1 \\ \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}(X - X1) + Y1, & \text{если } X1 \leq X < X2 \\ Y2 + Z2(X - X2), & \text{если } X \geq X2 \end{cases}, (1)$$

где $X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2$ – параметры; X – какая-либо переменная модели. Функция H является непрерывной кусочно-линейной функцией, состоящей из трех произвольных линейных фрагментов (рис. 1).

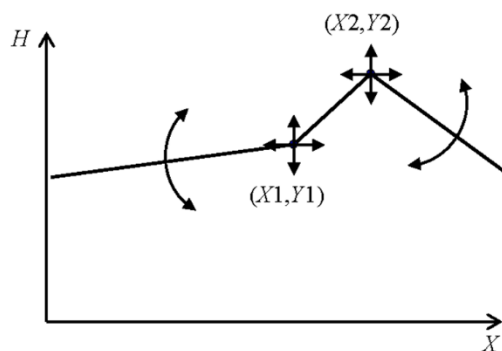


Рис. 1. Непрерывная кусочно-линейная функция $H(X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2, X)$ из трех линейных фрагментов с произвольно изменяемыми параметрами (1)

Из рисунка 1 видно, что функция может использоваться для аппроксимации различных зависимостей между переменными, если изменять значения ее параметров в (1). Любые математические модели, включая прогнозные, требуют проверки их точности. С этой целью нами предложен универсальный критерий, позволяющий оценивать адекватность любых расчетных методов и моделей путем сравнения рядов наблюдаемых и рассчитанных характеристик [22, 24-25]:

$$A = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{S_{\text{разн}}}{S_{\text{набл}}}, \quad (2)$$

где A – критерий адекватности; $S_{\text{разн}}$ – стандартное (среднеквадратичное) отклонение для разности сравниваемых расчетного/прогнозного и наблюдаемого рядов, $S_{\text{набл}}$ – стандартное отклонение для наблюдаемого ряда, $\frac{1}{\sqrt{2}}$ – введенный множитель.

Согласно (2) критерий A представляет собой погрешность модели, нормированную на стандартное отклонение наблюдаемого ряда данных. Для адекватных математических моделей и прогнозных методов среднее значение невязки между прогнозируемыми и наблюдаемыми данными можно считать равным нулю из-за его малости по сравнению с $S_{\text{разн}}$. Значения A могут меняться от нуля до единицы и выше:

– близкие к 0 – это идентичность сравниваемых рядов и абсолютная точность прогноза;

– $1/\sqrt{2} = 0,71$ – пороговое значение, при превышении которого метод/модель становится неадекватным и для прогноза лучше использовать среднее значение характеристики;

– близкие к 1 – сравниваемые ряды имеют одинаковые дисперсии и нулевую ковариацию, что дает $S_{\text{разн}} \approx \sqrt{2}S_{\text{набл}}$ согласно правилам сложения дисперсий случайных величин; это означает, что прогноз эквивалентен случайным вариациям характеристики около ее средней величины с дисперсией и стандартным отклонением, соответствующими наблюдаемому ряду; метод случайных вариаций нередко применяется в математических моделях для создания «естественного» разброса значений входных факторов;

– больше 1 – дисперсия расчетного ряда больше чем у наблюдаемого при их нулевой ковариации, т.е. использовать проверяемый метод/модель не целесообразно.

Критерий A в (2) аналогичен известным показателям качества моделей RSR (RMSE-observation Standard deviation Ratio, где RMSE – Root Mean Square Error [26-27]) и NSE (*Nash-Sutcliffe model Efficiency coefficient* – коэффициент Нэша-Сатклиффа [27]). Величина A связана с RSR и NSE зависимостями $RSR = A\sqrt{2}$ и $NSE = 1 - RSR^2 = 1 - 2A^2$. По сравнению с RSR и NSE, диапазон применения критерия A более широк и дополнительно включает оценку адекватности прогнозов по статистически средней величине [28].

У математических моделей есть другая важная характеристика – это их чувствительность к вариациям факторов среды [29-30]. Например, при известной чувствительности речного стока к температурам воздуха и осадкам можно спрогнозировать многолетние изменения этого стока в условиях глобального потепления климата. Нами предложен про-

стой метод количественной оценки чувствительности моделей с использованием критерия адекватности A [25, 31]:

$$FS = (A')^2 - (A)^2 = \frac{(S'_{\text{разн}})^2 - (S_{\text{разн}})^2}{2(S_{\text{набл}})^2} = \frac{2(S_{\text{факт}})^2}{2(S_{\text{набл}})^2} = \frac{(S_{\text{факт}})^2}{(S_{\text{набл}})^2}, \quad (3)$$

где FS – чувствительность модели к естественным вариациям выбранного входного фактора; A – критерий (2); A' – значение A , получаемое при подстановке наблюдаемых значений этого фактора, перемешанных между собой случайным образом и, очевидно, имеющих прежнее статистическое распределение и дисперсию; $(S_{\text{разн}})^2$ – дисперсия для разности расчетного и наблюдаемого значений выходной переменной (речного стока); $(S'_{\text{разн}})^2$ – эта же дисперсия при подстановке в прогнозную модель наблюдаемых значений входного фактора, перемешанных между собой случайным образом; $(S_{\text{факт}})^2$ – вклад естественных вариаций этого фактора в дисперсию выходной переменной (речного стока); $(S_{\text{набл}})^2$ – дисперсия наблюдаемых значений выходной переменной, используемая для нормировки FS .

Чувствительность FS близка по смыслу к известной статистической характеристике «процент объясненной дисперсии», а также коэффициенту детерминации R^2 . В уравнении (3) дисперсия, обусловленная ошибками наблюдений за входным фактором, будет присутствовать и в $(S'_{\text{разн}})^2$ и в $(S_{\text{разн}})^2$. Поэтому она не будет влиять на значение FS из-за ее взаимного вычитания в числителе (3) [31]. Тем самым FS оценивает чувствительность модели непосредственно к природным вариациям входного фактора, исключая ошибки его наблюдений. Очевидно, FS характеризует также относительную значимость факторов среды для модели. Как и критерий A , FS может быть выражена через показатели RSR и NSE . Учитывая равенство $RSR = A\sqrt{2}$, имеем $FS = [(RSR')^2 - (RSR)^2]/2$. Аналогичным образом получаем $FS = (NSE - NSE')/2$. Подобно A' в (3), показатели RSR' и

NSE' равны соответственно RSR и NSE , полученным через использование перемешанных случайным образом наблюдаемых значений выбранного входного фактора вместо их первоначального порядка.

Исходные материалы

Рассматриваемая в настоящей работе Алтае-Саянская горная страна расположена между 50° и 56° с.ш., 82° и 104° в.д. [32]. Она представляет собой часть мирового водораздела между гумидной областью Северного Ледовитого океана и аридной бессточной областью Центральной Азии. Ее площадь превышает 2 млн км². Преобладающие высоты хребтов горных систем составляют 200–2500 м, достигая на Алтае 3500–4500 м. Режим стока рек зависит весной от таяния снежного покрова, а в летне-осенний период – от количества выпадающих осадков. Доля снеговой составляющей в стоке половодья достигает 50 % и более. Страна отличается большим разнообразием климатических условий, определяющих многообразие ее ландшафтов: гляциально-нивальных, тундровых, альпийских и субальпийских лугов, лесных, степных и полупустынных [33]. Например, годовое количество осадков на северных склонах гор на высотах более 3000 м составляет 1200–2500 мм, на середине склонов – до 600 мм, а у подножья – около 200 мм.

Выполнение САМ опиралось на наблюдения за речными стоками, проведенные на территории Алтае-Саянской горной страны Гидрометеорологической службой СССР и России в 1951–2016 гг. Для исследования было выбраны 34 средние и малые реки, для которых были определены границы водосборных бассейнов (рис. 2). Большое количество одновременно анализируемых в ходе САМ бассейнов позволило нивелировать их специфические особенности и определить общие (универсальные) для всей горной территории

закономерности гидрологических процессов.

Учитывая особенности внутригодовой динамики метеорологических факторов и речного стока, мы выделили четыре гидрологических периода/сезона: зимняя межень (XII-III месяцы), весенне-летнее половодье (IV-VI), летняя межень (VII-VIII), осенняя межень с возможными паводками при сильных дождях (IX-XI). Ежедневные данные о

водном стоке на каждом из 34 речных створов усреднялись по периоду весенне-летнего половодья (второй сезон) для каждого года, когда проводились наблюдения. В среднем по створам сток в половодье составлял порядка $140 \text{ м}^3/\text{с}$ и значительно превышал сток в остальные сезоны года ($10, 50, 30 \text{ м}^3/\text{с}$ – для первого, третьего и четвертого сезонов, соответственно).

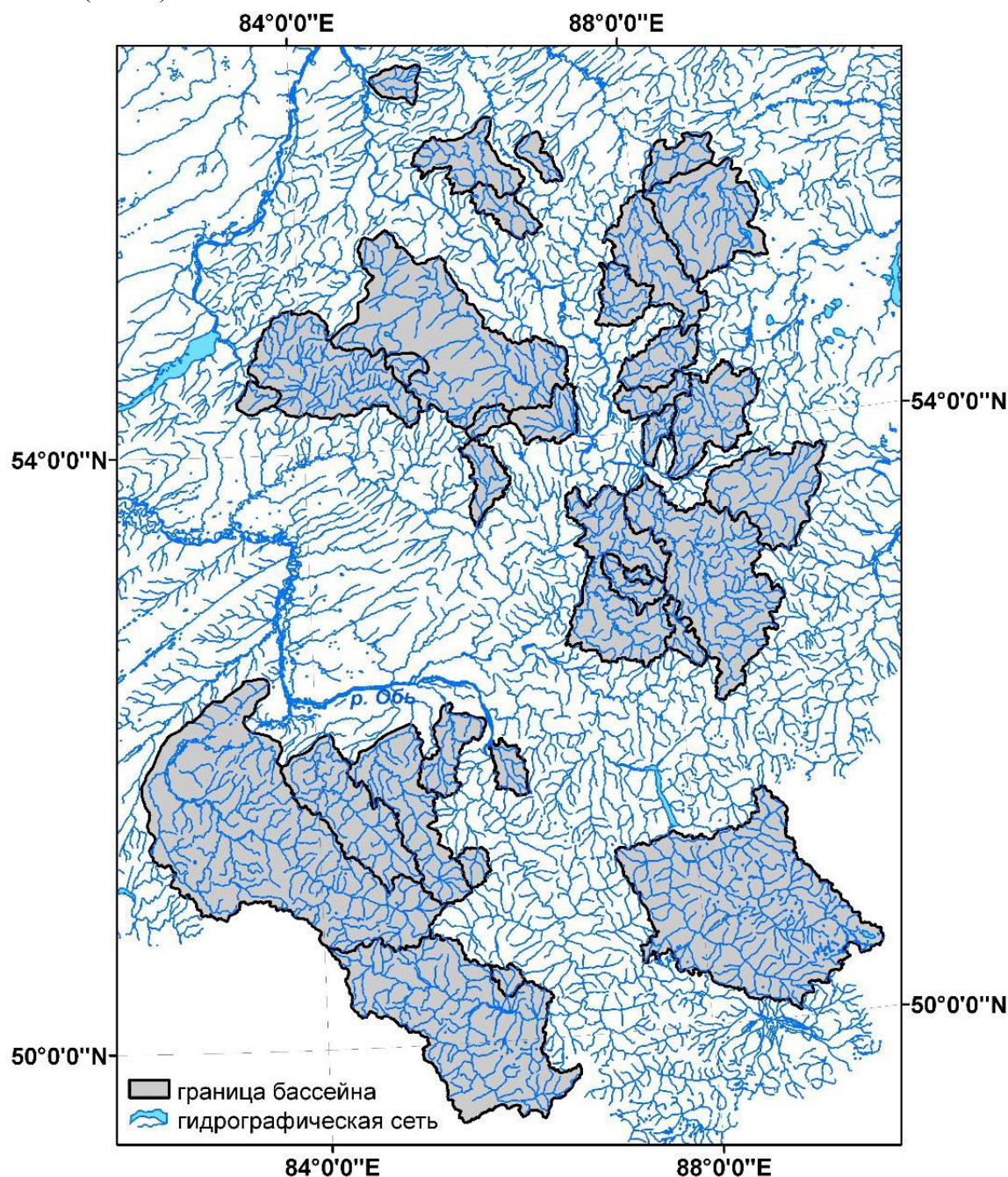


Рис. 2. Карта-схема расположения 34 модельных речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны [18]

Для учета ландшафтной структуры речных бассейнов Алтайе-Саянской горной страны выполнена типизация ландшафтных выделов, отражающая условия формирования гидрологического и гидрохимического речных стоков, в т.ч. высотно-поясную и структурно-ярусную неоднородность территории [34]. Всего выделено 12 типов ландшафтов и отдельно 13-й аквальный ландшафт, имеющий незначительную площадь (табл. 1). Каждый ландшафт рассматривался как самостоятельная типологическая группа геосистем со своими гидрологическими характеристиками, дающая определенный вклад в общий сток с речного бассейна.

Для всех 34 речных бассейнов рассчитаны высоты и площади выделенных ландшафтов. Исходным картографическим материалом служили карта «Ландшафты Алтая (Алтайский край и Республика Алтай)» [35], «Ландшафтная карта Алтайского края» масштаба 1:500 000 [36], а также топографические карты масштаба 1:200 000. Перечисленные картографические источники использованы для создания цифровых версий карт в программной среде ArcGIS 10.2. Характеристики ланд-

шафтной структуры речных бассейнов, в частности, площадь бассейнов, средняя высота и относительная площадь ландшафтов в каждом речном бассейне, вычислялись на основе TIN моделей, построенных с помощью модуля 3D Analyst.

Общая климатическая характеристика Алтайе-Саянской горной страны приведена в таблице 2. Более детальные статистические характеристики климата можно найти в [37]. На территории большинства анализируемых речных бассейнов регулярные метеорологические наблюдения отсутствовали. Нами показано, что многолетняя динамика среднемесячных температур воздуха, как и месячных осадков, будет одинакова для больших пространств, если эти факторы выражать в процентах/долях от среднеемноголетних значений соответствующих месяцев [38-39]. Такая динамика относительных/нормированных значений факторов оказалась одинаковой также для всей территории Алтайе-Саянской горной страны [24, 28]. Для ее расчета мы использовали данные 11 реперных метеостанций (табл. 3) за 1951-2016 гг.

Таблица 1

Высота и относительная площадь ландшафтов Алтайе-Саянской горной страны с вкладом текущих осадков в речной сток весенне-летнего половодья

Ландшафт (типологическая группа геосистем)	Средняя высота, м БС	Средняя относительная площадь ¹	Доля ² текущих осадков в весенне-летнем половодье
Гляциально-нивальные высокогорья	2448	1,2	0,23
Гольцово-альпийно-типные высокогорья и среднегорья, псевдогольцовые низкогорья	1446	9,5	0,35
Тундрово-степные и криофитно-степные высокогорья	2329	0,4	0,56
Лесные высокогорья, среднегорья и низкогорья	742	44,1	0,33
Экспозиционно-лесостепные и степные высокогорья и среднегорья	1213	1,8	0,69
Лесостепные, степные низкогорья и предгорья	415	15,9	0,24
Межгорные котловины с различными вариантами степей и лесостепей	720	5,2	0,31
Степные и лесостепные подгорные и возвышенные аккумулятивные равнины	268	8,8	0,31
Недренируемые слабопроточные интразональные и интрапоясные ландшафты	1501	1,3	0,93
Долины горных рек	563	9,0	0,00
Долины равнинных рек	229	2,0	0,37
Лесные возвышенные и подгорные равнины	263	0,7	0,36
Аквальные ландшафты	1400	0,03	0,69

Примечание: 1 – от площади речного бассейна (%); 2 – для осадков (IV-VI) в стоке половодья [18, 22].

Сначала рассчитали многолетнюю помесечную динамику относительных значений температур воздуха и осадков для каждой станции в отдельности. Для холодного периода года наименьшее различие относительных среднемесячных температур между 11 станциями имело место при их выражении в процентах относительно средне многолетних температур за январь, а для теплого – за июль. У относительных значений осадков для всех месяцев года это оказался июль. Взяв затем средние по 11 станциям, получили пространственно усредненную помесечную динамику указанных факторов. Последняя адекватно отражала реальную метеорологическую обстановку на любом участке Алтае-Саянской горной страны, независимо от координат и высоты станций над уровнем моря (табл. 3). Отсутствие зависимости от меняющейся по территории высоты было особенно важным, т.к. позволило охарактеризовать динамику относительных среднемесячных температур и месячных осадков сразу

по всей площади каждого бассейна, перепад высот в которых достигал 2000 м. Более того, эта динамика была одинаковой для всех речных бассейнов. Таким образом, для периода 1951-2016 гг. были рассчитаны $66 \times 12 = 792$ относительных значения для температур и столько же для осадков. Отметим, что для перехода к описанию многолетней помесечной динамики температур и осадков в градусах Цельсия и миллиметрах соответственно достаточно знать только их средне многолетние месячные значения для характеризуемого участка.

Адекватность относительных климатических характеристик была оценена с помощью критерия А. Сравнение их рассчитанных (по реперным станциям) и наблюдаемых (по другим, не реперным станциям) многолетних помесечных рядов по критерию (2) дало $A_T=0,39$ для температур воздуха и $A_P=0,62$ для осадков в среднем по всем месяцам года [24, 28]. Значениями А воспользуемся позже при оценке адекватности прогнозной модели половодья.

Таблица 2

Средне многолетние значения температур воздуха и осадков
Алтае-Саянской горной страны, 1951-2016 гг.

Климатическая характеристика	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °C	-16,1	-14,7	-7,7	2,6	10,4	15,8	17,8	15,4	9,6	2,1	-7,2	-13,3
Осадки, мм	21,7	19,5	22,9	40,6	59,4	70,6	83,5	72,5	50,0	51,0	41,0	30,3

Таблица 3

Географические характеристики реперных метеостанций

Метеостанция	Индекс ВМО	Широта	Долгота	Высота, м БС
Бийск-Зональная ¹	29939	52° 41'	84° 56'	222
Змеиногорск ²	36038	51° 09'	82° 10'	354
Камень-на-Оби ¹	29822	53° 49'	81° 16'	127
Кара-Тюрек ²	36442	50° 02'	86° 27'	2601
Кузедеево ³	29849	53° 20'	87° 11'	293
Кызыл-Озек ²	36055	51° 54'	86° 00'	324
Ребриха ¹	29923	53° 05'	82° 20'	218
Славгород ¹	29915	52° 58'	78° 39'	125
Солонешное ²	36045	51° 38'	84° 20'	409
Усть-Кокса ²	36229	50° 16'	85° 37'	977
Яйлю ²	36064	51° 46'	87° 36'	482

Примечание: 1 – прилегающие к Горному Алтаю равнины; 2 – Горный Алтай;
3 – Кузнецкая межгорная котловина.

Поскольку в качестве входных метеорологических факторов модели использовались относительные значения температур воздуха и осадков, необходимо было выполнить аналогичную процедуру и с речным стоком. Для этого наблюдаемые величины стока были разделены на отвечающие им средне-многолетние значения в каждом бассейне. Тем самым от единиц измерения стока в м³/с перешли к безразмерным единицам относительного/нормированного стока. Такая нормировка позволила создать единую однородную выборку данных по стокам всех 34 речных бассейнов, пригодную для САМ. Аналогично, площади ландшафтов в каждом бассейне (км²) были переведены в доли/проценты делением на площадь этого бассейна. Высоты расположения ландшафтов нами не изменялись.

В целом, имеющаяся база данных для САМ половодья включала следующие характеристики 34 речных бассейнов: гидрологические (1630 величин нормированного речного стока в среднем за весенне-летнее половодье), метеорологические (792+792=1584 относительных месячных значений температур воздуха и осадков), ландшафтные (352 значения площадей и высот).

Построение прогнозной модели половодья

Подобно регрессионному анализу, для успешного применения САМ необходимо, чтобы массив фактических данных о динамике анализируемого процесса значительно превышал число параметров в уравнениях конструируемой модели [19]. Тогда имеем 1630 значений речного стока, что позволяет ввести в модель порядка 150 параметров. В то же время число речных бассейнов составляет 34. Тогда имеем 1630 значений речного стока, что позволяет ввести в модель порядка 1630/10≈160 параметров. В то же время число речных бассейнов составляет 34. Поэтому, при описании конкретной зависимости стока от какой-либо характеристики бас-

сейнов, например, от высоты расположения их ландшафтов, можно использовать только 34/10≈3 параметра. То же самое касается зависимости стока от температуры и осадков, если идентификацию параметров модели проводить, например, по 33-летнему периоду наблюдений. Ограничение тремя параметрами для кусочно-линейной функции H (рис. 1) означает, что она должна включать только два линейных фрагмента. Такое условие реализовано согласно (1) как зависимость $H(X1, X1, 1, 1, Z1, Z2, X)$.

Прогноз среднего речного стока в течение весенне-летнего половодья (IV-VI) выполнялся для каждого года периода 1984-2016 гг. по данным о температурах воздуха и осадков за предшествующие половодью IX-III месяцы. Параметры прогнозной модели определялись через решение обратной математической задачи с помощью оптимизационных методов. Для их расчета использовались наблюдаемые относительные стоки одновременно всех 34 рек за скользящий 33-летний идентификационный период, предшествующий прогнозируемым годам. Найденные параметры применялись для прогноза стока в течение следующих трех лет. Для последующих лет их значения рассчитывались заново уже по следующему идентификационному периоду, сдвинутому на три года вперед.

В ходе САМ были проверены различные варианты уравнений, описывающих формирование стока в половодье под воздействием факторов среды. В результате построена прогнозная модель половодья с 39 параметрами, дающая наименьшую квадратичную невязку между прогнозируемыми и наблюдаемыми стоками. Ее общее/универсальное для всех речных бассейнов, имитационное балансовое уравнение имеет вид:

$$Q^i = (c_1, c_2, 1, 1, c_3, c_4, P_1) \times \{ \sum_k a_k S_k^i P_1 H(c_9, c_{10}, 1, 1, c_{11}, c_{12}, h_k^i) + \sum_k b_k S_k^i P_2 H(c_5, c_6, 1, 1, c_7, c_8, T_2) \times H(c_9, c_{10}, 1, 1, c_{11}, c_{12}, h_k^i) \} + d, \quad (4)$$

где Q^i – средний нормированный сток за весенне-летний гидрологический сезон (половодье, IV-VI) для замыкающего створа бассейна $i = 1-34$; первая и вторая суммы в правой части (4) отвечают вкладу осеннего сезона предыдущего года и зимнего сезона текущего года соответственно; a_k, b_k – параметры, характеризующие вклады k -го ландшафта в речной сток за соответствующие сезоны, $k=1-13$ (табл. 1); S_k^i – относительная площадь k -го ландшафта в бассейне i ; h_k^i – высота этого же ландшафта, м БС; P_1, P_2 – отклонения относительных значений месячных осадков от их среднеемноголетних значений в среднем за осенний сезон предыдущего года и зимний сезон текущего года, соответственно; T_2 – отклонение относительной среднемесячной температуры воздуха от ее среднеемноголетнего значения в среднем за зимний сезон; H – кусочно-линейная функция (1); $c_{1-4}, c_{5-8}, c_{9-12}$ – параметры, характеризующие соответственно влияние осенних осадков P_1 и зимних температур T_2 на величину стока в половодье, и влияние высоты ландшафтов h_k^i на количество выпадающих осадков; d – постоянная доля нормированного стока ($d \leq 1$), одинаковая для всех речных бассейнов.

В правой части (4) суммируются вклады каждого ландшафта в сток Q^i речного бассейна i . В первом слагаемом (4) вклад k -го ландшафта формируется осадками P_1 осеннего сезона предыдущего года и зависит от его гидрологических особенностей (параметр a_k), площади S_k^i и высоты h_k^i (влияющей на количество осадков). Во втором слагаемом (4) вклад k -го ландшафта формируется осадками P_2 зимнего сезона и зависит от особенностей этого ландшафта (параметр b_k), его площади S_k^i , температуры T_2 (определяющей испарение с поверхности снежного покрова) и высоты расположения ландшафтов h_k^i . Множитель $H(c_1, c_2, 1, 1, c_3, c_4, P_1)$ характеризует влагообмен между почвой и снежным

покровом зимой, который зависит от формирования сплошной ледяной прослойки в верхнем слое почвы осенью при обильных осадках P_1 [19].

Для расчета параметров через решение обратной задачи использовали данные наблюдений за речными стоками 1951-2016 гг. Левая часть (4) заменялась на наблюдаемые значения стоков, отвечающие очередному скользящему 33-летнему идентификационному периоду. Эти значения, количеством от 200 до 1000, давали систему из того же числа уравнений, которая решалась оптимизационными методами MATLAB для определения значений параметров как неизвестных переменных. При решении указанной системы определялась идентификационная квадратичная невязка, характеризующая расхождение между рассчитываемыми и наблюдаемыми в 33-летнем идентификационном периоде стоками. Данные о стоках, приводящие к значительному расхождению расчетного и наблюдаемого значений, исключались из этой невязки. Случайные расхождения могли возникать для отдельных речных бассейнов в конкретный год из-за (а) значительного отличия между усредненным по метеостанциям значением метеорологического фактора и реально имеющими место флуктуациями этого фактора, (б) технических ошибок записи данных или других подобных причин. Обнаружение случайных расхождений осуществлялось путем сравнения расчетного и наблюдаемого стоков по известному «правилу трех сигм» для нормального распределения. Отметим, что для САМ отклонение расчетных характеристик от экспериментальных/наблюдаемых значений близко к нормальному, как это имеет место для адекватных математических моделей. Ошибкой формально считались те наблюдения за стоком в отдельные годы в том или ином бассейне, которые выходили за пределы утроенного среднего квадратичного отклонения (утроенного квадратного корня из квад-

ратичной невязки) от расчетной величины. Данным образом исключалось до 4 % данных. Очевидно, что исключенные данные могли быть достоверными и отвечать реальным флуктуациям температур воздуха или осадков в бассейне. В то же время их исключение не влияло на САМ вследствие их незначительного количества. Из изложенного следует, что, выполняемые прогнозы речного стока имеют достоверность не хуже $100-4=96\%$, т.е. не хуже общепринятой 95 % достоверности статистических оценок.

Качество прогнозной модели стока весенне-летнего половодья (4) оценивалось по периоду 1984-2016 гг. с помощью критерия адекватности A в (2). Данный период был разделен на короткие трехлетние интервалы. Для каждого из них выполнялся свой прогноз по модели (4) с параметрами, найденными по предшествующему (скользящему) 33-летнему идентификационному периоду. При расчете критерия A использовалось стандартное отклонение $S_{\text{разн}}$, характеризующее невязку между прогнозируемыми и наблюдаемыми нормированными речными стоками. Для прогнозов по периоду 1984-2016 гг. было доступно 381 нормированных значений наблюдаемых стоков по всем 34 речным бассейнам. Очевидно, что такая выборка, вместе с аналогичной выборкой прогнозных стоков, достаточна для достоверных статистических оценок. Согласно расчетам адекватность модели (4) составила $A=0,65$. Отметим, что таким же значением A характеризовался прогноз речных стоков в зимнем сезоне, который осуществлялся по метеорологическим данным предшествующих летнего и осеннего сезонов [18, 22]. Полученное значение $A=0,65$ меньше пороговой величины 0,71 (см. разъяснения к уравнению (2)), отвечающей тривиальной прогнозной модели из статистически среднего значения характеристики. Таким образом, нам удалось учесть в (4) предшествующие метеорологические усло-

вия, влияющие на объем стока половодья в речных бассейнах Алтае-Саянской горной страны. Отметим, что прогноз речных стоков выполнялся по пространственно усредненным данным метеостанций, находящихся вне речных бассейнов. Ниже проанализирована возможность более точного прогноза весенне-летнего половодья по метеорологическим наблюдениям непосредственно в бассейнах.

Обсуждение результатов моделирования

Большинство математических моделей водного стока создаются по данным, полученным для одного речного бассейна. В подобных случаях охарактеризовать влияние на сток каждого ландшафта бассейна как отдельной природной гидрологической системы крайне затруднительно. Каждому ландшафту будет отвечать по одному значению высоты или иной характеристики. Построение же функции зависимости стока от этой характеристики лишь по одной точке невозможно. Кроме того, из модели будет невозможно исключить индивидуальные особенности анализируемого бассейна, что ограничивает ее применение для другой территории. В нашем случае значения параметров модели (4) характеризуют одновременно 34 бассейна, синхронно анализируемых в САМ и значительно отличающихся по орографии, почвенно-растительному покрову и климату. Иначе говоря, разработанная модель является универсальной и может применяться для прогнозов половодья рек по всей Алтае-Саянской горной стране. Отметим, что прогнозируемые по модели (4) стоки с 34 речных бассейнов (табл. 1) нормированы на свои среднемноголетние значения в бассейнах. Умножая стоки на эти значения, мы легко их переводим в $\text{м}^3/\text{с}$. Также отметим, что из уравнения (4) легко рассчитать стоки с отдельных ландшафтов в каждом бассейне.

Зависимость половодья от метеорологических факторов. На рисунке 3

представлена типичная зависимость речного стока в весенне-летнее половодье от входных климатических факторов модели (4), полученная в ходе САМ. Мы видим естественную пропорциональность стока Q количеству зимних осадков P_2 . Также видим достаточно сложную зависимость стока от осенних осадков P_1 и зимних температур T_2 .

Рассмотрим сначала поведение стока Q при незначительных зимних осадках $P_2 < 0$. Существенное уменьшение осенних осадков $P_1 < -0,3$ (рис. 3а) или снижение зимней температуры $T_2 < 0$ (рис. 3б) ведет к увеличению стока Q . Это объясняется все более глубоким промерзанием почв (до двух-трех метров [40]) в течение зимы из-за небольшого снежного покрова ($P_2 < 0$). Весной при таянии снега глубокое промерзание способствует формированию в верхних слоях почв ледяной прослойки, препятствующей инфильтрации талой воды в почву [19, 40]. В результате вода без задержки скатывается со склонов гор в реки и увеличивает объем половодья. При росте осенних осадков $P_1 > -0,3$ (рис. 3а) ледяная прослойка образуется уже в переходной период осень-зима и захватывает все большую площадь почв. За зиму она нарастает за счет

диффузии парообразной влаги вверх из глубоких слоев почв [19]. Весной она опять препятствует инфильтрации талых вод и увеличивает сток Q . В свою очередь, при повышении зимних температур $T_2 > 0$ (рис. 3б) рост стока Q может объясняться двумя причинами: (а) более активным таянием снежного покрова на всех высотах из-за слабо промерзших почв, (б) большей влажностью последних из-за их меньшего иссушения зимой вследствие уменьшенного градиента температур между теплой почвой и воздухом.

При больших зимних осадках $P_2 > 0$ снижение зимней температуры $T_2 < 0$ (рис. 3б) ведет к уменьшению стока Q . Это связано с тем, что температура снежной толщи и почвогрунтов понижается, что ведет к задержке таяния снега весной и смещению части стока половодья на лето. При повышении $T_2 > 0$ сток Q опять уменьшается вследствие: (а) более медленного промерзания почвогрунтов, ведущего к оттоку почвенной влаги в нижние слои почвогрунтов [41] и далее ее уходу в зимний речной сток, (б) увеличивающихся потерь влаги на испарение с поверхности снежного покрова.

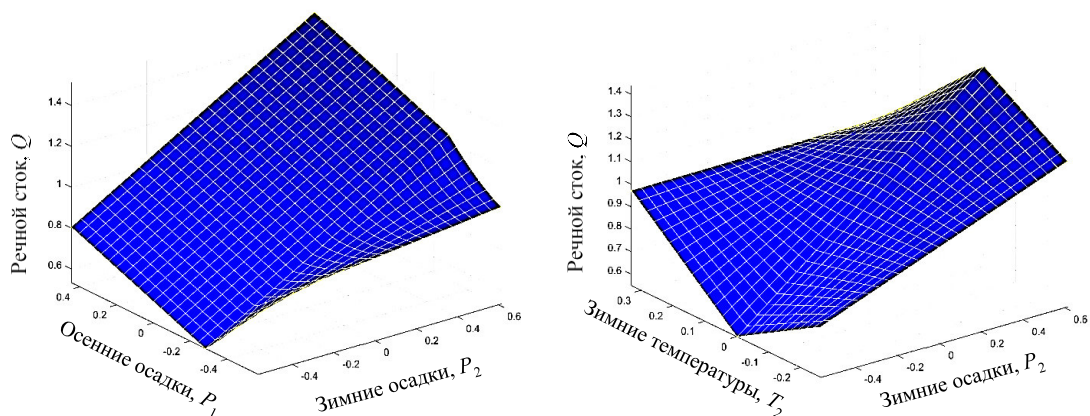


Рис. 3. Зависимость стока р. Катунь в весенне-летнее половодье от температур воздуха и осадков за предшествующие сезоны года:

показаны отклонения характеристик в долях от их среднемноголетних значений согласно уравнению (4);

а – сток Q (IV-VI мес.) как функция осадков P_1 (IX-XI) и P_2 (XII-III),

б – сток Q как функция температур T_2 (XII-III) и осадков P_2 .

Чувствительность прогнозной модели к вариациям факторов. Другая важная характеристика прогнозной модели (4) – ее чувствительность FS к вариациям факторов среды – позволяет количественно оценить значимость этих факторов для выполняемых прогнозов весенне-летнего половодья. Поскольку FS в (3) выражается в долях от дисперсии наблюдаемых значений выходной переменной $(S_{набл})^2$, то FS можно выражать в процентах через ее умножение на 100. Оценка чувствительности стоков половодья, выполненная по рядам рассчитанных и наблюдаемых речных стоков Q^i в (4), дана в таблице 4.

Согласно таблице 4 чувствительность разработанной модели стока (4) к вариациям факторов среды уменьшается в ряде: все осадки, осенние осадки P_1 , гидрологические характеристики ландшафтов a_k, b_k , зимние осадки P_2 , температура воздуха T_2 , высота расположения ландшафтов. Как и следовало ожидать, наибольшую чувствительность модель имеет к двум факторам – осадкам и гидрологическим особенностям ландшафтов. Наименьшую чувствительность она имеет к высотам расположения ландшафтов, хотя зависимость количества осадков (мм) от высоты весьма значительна [42]. Это независимым образом подтверждает адекватность описания метеорологической обстановки по территории Алтае-Саян-

ской горной страны с помощью относительных значений осадков и температур воздуха.

Особо остановимся на малом значении чувствительности половодья $FS_T = 1,1\%$ к вариациям зимних температур T_2 (табл. 4). Величина T_2 рассчитывается как отклонение относительных среднемесячных температур от среднегодовой нормы в среднем за четыре месяца (XII-III). Поэтому межгодовые вариации T_2 весьма малы, а значит, будет мало и их влияние на сток половодья. С другой стороны, в редкие годы отклонения T_2 могут быть значительны и существенно менять этот сток (рис. 3б).

5.3. Оценка точности прогнозов половодья в одном речном бассейне. При выполнении прогнозов весенне-летнего половодья в одном речном бассейне его ландшафтная структура, высоты и площади ландшафтов постоянны, а значит, могут быть исключены из модели (4). Тогда уравнение (4) примет упрощенный вид:

$$Q = H(c_1, c_2, 1, 1, c_3, c_4, P_1) \{aP_1 + bP_2 H(c_5, c_6, 1, 1, c_7, c_8, T_2)\} + d, \quad (5)$$

где используются те же обозначения, что и в (4), но уже для одного речного бассейна. Параметры c_{1-4}, c_{5-8} имеют прежние значения, установленные для (4) в ходе САМ.

Таблица 4
Чувствительность прогнозной модели половодья (4) к природным вариациям факторов

Характеристика	Значение
Адекватность A модели (4) в долях единицы согласно уравнению (2)	0,65
Стандартное отклонение ¹ $S_{набл}$ наблюдаемых речных стоков Q	0,30
Чувствительность ² FS_P к вариациям осадков P_1 и одновременно P_2	34
Чувствительность FS_{P_1} к осенним осадкам P_1	21
Чувствительность FS_L к вариациям ландшафтной структуры речных бассейнов ³	16
Чувствительность FS_{P_2} к зимним осадкам P_2	10
Чувствительность FS_T к зимним температурам воздуха T_2	1,1
Чувствительность FS_h к высотам расположения ландшафтов h_k^i	0,2

Примечание: 1 – рассчитано как среднее стандартное (среднеквадратичное) отклонение для нормированных наблюдаемых стоков 34 речных бассейнов; одновременно соответствует среднему стандартному отклонению в долях (или в процентах при умножении на 100 %) от ненормированных наблюдаемых стоков; 2 – оценено согласно (3) и выражено в процентах от дисперсии наблюдаемых речных стоков $(S_{набл})^2$; 3 – рассчитано путем случайного перемешивания значений гидрологических характеристик ландшафтов a_k и независимо b_k в (4) между всеми бассейнами, $k=1-12$.

Три параметра a , b , d в (5) должны рассчитываться с помощью САМ заново по данным наблюдений половодья в анализируемом бассейне за предшествующий скользящий 33-летний идентификационный период. Эти три параметра затем используются при выполнении прогнозов половодья в течение следующих трех лет. После этого они рассчитываются заново по следующему 33-летнему идентификационному периоду.

Допустим, что имеется один речной бассейн с данными метеорологических наблюдений, выполненных непосредственно на его территории. Адекватность прогнозов половодья по модели (5), которую обозначим A_0 , будет отличаться от адекватности A (табл. 4) у модели (4). Это связано с тем, что в (5) нет влияния гидрологических особенностей ландшафтов 34 различных бассейнов, которые увеличивают дисперсию рассчитываемых и наблюдаемых стоков. В (5) также нет влияния ошибок в значениях температур воздуха и осадков, возникающих из-за их пространственного усреднения по всей территории Алтае-Саянской горной страны (рис. 2). Очевидно, A_0 является более важной характеристикой, чем A , т.к. прогноз половодья почти всегда нужен для конкретной реки – при угрозе наводнения или нарушения водоснабжения местного населения.

Чувствительность модели (4) к вариациям факторов среды (табл. 4) позволяет оценить адекватность A_0 прогнозов весенне-летнего половодья по метеорологическим наблюдениям, проводимым непосредственно в речном бассейне. Ежегодно меняющимися входными факторами модели (4) служат среднемесячные температуры воздуха и месячные осадки. Эти факторы одинаковы для всей территории Алтае-Саянской горной страны в результате их пространственного усреднения, характеризующегося критерием адекватности (2) по каждому месяцу года [24]. Рассмотрим

из чего складывается дисперсия невязки $(S_{\text{разн}})^2$ у стоков, прогнозируемых с помощью (4).

У математических моделей сложно-организованных природных систем дисперсия невязки выходной переменной складывается из дисперсий, обусловленных погрешностями наблюдений и вариациями учитываемых факторов [19, 25, 43;]. Учитывая такое сложение и уравнения (2), (3), можно выделить те компоненты дисперсии невязки $(S_{\text{разн}})^2$ у модели (4) [25, 31], которые отсутствуют в дисперсии невязки у упрощенной модели (5). Исключая их из невязки для (4), находим оставшийся компонент, характеризующий A_0 . Используя введенную в (2) и (3) нормировку как дисперсии $(S_{\text{разн}})^2$, так и чувствительности FS на $(S_{\text{набл}})^2$, получаем:

$$2A^2 = (S_{\text{разн}})^2 / (S_{\text{набл}})^2 \approx FS_L + FS_P \times 2A_P^2 + FS_T \times 2A_T^2 + 2A_0^2, \quad (6a)$$

где A – адекватность (2) для модели (4); $(S_{\text{разн}})^2$ – дисперсия невязки между прогнозируемыми и наблюдаемыми стоками; $(S_{\text{набл}})^2$ – дисперсия наблюдаемых стоков; FS_L – вклад в $(S_{\text{разн}})^2$ от вариаций гидрологических характеристик (a_k , b_k) ландшафтов (табл. 4); FS_P , FS_T – вклады в $(S_{\text{разн}})^2$ от природных вариаций осадков и температур воздуха соответственно (табл. 4); $2A_P^2$, $2A_T^2$ – доли в дисперсиях природных вариаций соответственно осадков и температур воздуха, формируемые ошибками их пространственного усреднения; A_P , A_T – адекватность (2) для этих же климатических факторов; A_0 – искомый компонент дисперсии $(S_{\text{разн}})^2$, характеризующий адекватность упрощенной модели (5) для одного речного бассейна (см. выше). Подставляя в (6a) значения в долях единицы $A = 0,65$, $FS_L = 0,16$, $FS_P = 0,34$, $FS_T = 0,011$ (табл. 4) и усредненные по своим месячным значениям для осеннего и зимнего сезонов $A_P = 0,73$, $A_T = 0,32$ [24], легко находим значение A_0 :

$$2 \times (0,65)^2 \approx 0,16 + 0,34 \times 2(0,73)^2 + 0,011 \times 2(0,32)^2 + 2A_0^2 \text{ или } A_0 \approx 0,40. \quad (6b)$$

Если рассматривается какой-либо типичный речной бассейн, то для него адекватность A_0 останется той же, что и в уравнениях (6) для всех 34 бассейнов. Это обусловлено тем, что выборки нормированных наблюдаемых стоков для типичного бассейна и для 34 бассейнов имеют одинаковые статистические характеристики ($S_{\text{набл}}$) и отличаются лишь своими объемами. Поэтому мы можем использовать значение $A_0 \approx 0,40$ из (6б) также и для оценки качества модели (5) для отдельного бассейна. A_0 рассчитано из уравнения (6а), где отброшены члены, учитывающие относительно малое влияние высот ландшафтов h_k^i на относительные осадки, а также погрешностей определения h_k^i , S_k^i , и расчета параметров c_{9-12} в модели (4). Это означает, что реальное значение A_0 будет меньше 0,40, т.е. окончательная оценка адекватности прогнозной модели (5), использующей данные метеорологических наблюдений в бассейне, $A_0 < 0,40$.

Найдем, насколько модель (5) уменьшает дисперсию $(S_{\text{разн}})^2$ у невязки прогнозируемых стоков половодья в сравнении с дисперсией $(S_{\text{разн}})^2 = (S_{\text{набл}})^2$ у тривиального прогноза по среднегодовому значению наблюдаемых стоков. Имея уравнения (2), (6а) и $A_0 < 0,40$, получаем уменьшение дисперсии невязки прогнозов более чем в три раза:

$$A_0^2 = (S_{\text{разн}})^2 / 2(S_{\text{набл}})^2 < (0,40)^2 \quad \text{или} \\ (S_{\text{разн}})^2 < 0,32(S_{\text{набл}})^2.$$

Также несложно рассчитать другую характеристику качества математических моделей – коэффициент Нэша-Сатклиффа NSE . Прогноз половодья по модели (5) в речном бассейне с выполняемыми в нем метеорологическими наблюдениями будет характеризоваться $NSE_0 = 1 - 2A_0^2$ (см. выше). Подстановка $A_0 < 0,40$ дает $NSE_0 > 0,68$. Значение $NSE_0 > 0,68$ отвечает хорошему ($0,65 < NSE \leq 0,75$) качеству «описательных» гидрологических моделей [27], а для моделей долгосрочного прогноза стока рек является уникально высоким. При этом выполняется прогноз речного

стока на весь период весенне-летнего половодья (IV-VI), т.е. на три месяца вперед.

Заключение

Предложенное системно-аналитическое моделирование (САМ) сложно-организованных природных систем является эффективным методом разработки их адекватных математических моделей. В рамках САМ осуществляются количественные оценки адекватности/точности и чувствительности моделей к вариациям факторов среды путем расчета вкладов этих вариаций в дисперсию невязки между рассчитываемыми и наблюдаемыми значениями выходной переменной модели. На основе этих оценок выделяются и анализируются отдельные компоненты указанной дисперсии. Такой анализ дает более объективную и полную характеристику качества математических моделей по сравнению с традиционным критерием RSR (отношение невязки расчетов к стандартному отклонению данных наблюдений) или коэффициентом Нэша-Сатклиффа $NSE = 1 - RSR^2$.

С помощью САМ проанализирован сток с 34 речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны, охватывающей территорию более 2 млн км². Разработана универсальная имитационная балансовая модель (4)–(5), обеспечивающая прогноз речного стока на три месяца вперед, соответствующих периоду весенне-летнего половодья. Для прогнозов используются относительные (нормированные на среднегодовое значение) среднемесячные температуры воздуха и месячные осадки за осенне-зимний период года. Относительные значения этих факторов более адекватно отражают их сложное распределение по территории горной страны и, поэтому, использованы для повышения точности гидрологических расчетов. В ходе САМ на основе данных об осенне-зимних осадках, температурах воздуха и наблюдаемых стоках количественно охарактеризовано влияние на весенне-летнее половодье осенне-зимне-весен-

него промерзания и оттаивания почвогрунтов. Чувствительность модели (4)–(5) к факторам среды уменьшается в последовательности: осенние осадки, ландшафтная структура речных бассейнов, зимние осадки, зимние температуры воздуха, высоты ландшафтов. Прогнозируемый сток половодья нормирован аналогично метеорологическим данным и переводится в $\text{м}^3/\text{с}$ путем умножения на свою среднееголетнюю величину.

Модель стока половодья (5) имеет в три раза уменьшенную дисперсию невязки прогнозов в сравнении с дисперсией тривиального прогноза по среднееголетнему значению наблюдаемых стоков. Качество прогнозов характеризу-

ется критерием Нэша-Сатклиффа $\text{NSE}_0 > 0,68$ и является весьма высоким для моделей долгосрочных гидрологических прогнозов. Достижение такого качества возможно при использовании в (5) температур воздуха и осадков, наблюдаемых непосредственно в характеризуемом речном бассейне. Универсальность модели обеспечивает возможность ее практического применения для рек Алтае-Саянской горной страны, а при дополнительной идентификации (уточнении значений ее параметров) и для рек других горных территорий, с целью прогноза наводнений, наполнения горных водохранилищ весной или водобеспеченности местного населения весной.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект № 0383-2019-0005), при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-45-220019 p_a).

Список литературы

1. Deng X., Singh R.B., Liu J., Güneralp B. Water use efficiency and integrated water resource management for river basin // Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C. – 2015. – 89-90. – P. 1-2.
2. Singh M., Singh R.B., Hasan M.I. (eds.). Landscape Ecology and Water Management: Proceedings of IGU Rohtak Conference. Vol. 2. – Tokyo: Springer, 2014. – 361 p.
3. Zhang L. Design and implementation of a mountain torrent disaster warning system based on the distributed hydrological model // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – 46. – P. 775-780.
4. Паромов В.В., Шумилова К.А., Гордеев И.Н. Условия формирования половодья большой водности и прогноз наводнения на реке Абакан // Изв. Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – 327 (11). – С. 57-67.
5. Владимиров А.М. Факторы, определяющие возникновение экстремальных расходов и уровней воды половодья // Уч. записки Российского государственного гидрометеорологического ун-та. – 2009. – 9. – С. 22-39.
6. Rössler O., Froidevaux P., Börst U., et al. Retrospective analysis of a nonforecasted rain-on-snow flood in the Alps – a matter of model limitations or unpredictable nature? // Hydrology and Earth System Sciences. – 2014. – 18. – P. 2265-2285.
7. Ruiz-Villanueva V., Badoux A., Rickenmann D., et al. Impacts of large flood along a mountain river basin: the importance of channel widening and estimating the large wood budget in the upper Emme River (Switzerland) // Earth Surface Dynamics. – 2018. – 6. – P. 1115-1137.
8. Tao J., Wu D., Gourley J., et al. Operational hydrological forecasting during the IPHEX-IOP campaign – Meet the challenge // J. of Hydrology. – 2016. – 541. – P. 434-456.
9. Corripio J.G., López-Moreno J.I. Analysis and Predictability of the Hydrological Response of Mountain Catchments to Heavy Rain on Snow Events: A Case Study in the Spanish Pyrenees // Hydrology. – 2017. – 4(2). – P. 20.
10. Casagrande L., Tomasella J., dos Santos Alvalá R.C., et al. Early flood warning in the Itajai-Acu River basin using numerical weather forecasting and hydrological modeling // Natural Hazards. – 2017. – 88. – P. 741-757.
11. Meng X.Y., Sun Z.Q., Zhao H.G., et al. Spring Flood Forecasting Based on the WRF-TSRM Mode // Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette. – 2018. – 25. – 141-151.

12. Musselman K.N., Lehner F., Ikeda K., et al. Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America // *Nature Climate Change*. – 2018. – 8(9). – 808-812.
13. Belyakova P.A., Gartsman B.I. Possibilities of flood forecasting in the West Caucasian rivers based on FCM model // *Water Resources*. – 2018. – 45. – S50-S58.
14. Yu Z., Wu J., Chen X. An approach to revising the climate forecast system reanalysis rainfall data in a sparsely-gauged mountain basin // *Atmospheric Research*. – 2019. – 220. – 194-205.
15. Zhang G., Cui P., Yin Y., et al. Real-time monitoring and estimation of the discharge of flash floods in a steep mountain catchment // *Hydrological processes*. – 2019. – 33. – 3195-3212.
16. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. – СПб, 2011. – 1158 с.
17. KIRSTA Yu.B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems // *Ecol. Modelling*. – 2006. – 191. – 315-330.
18. Кирста Ю.Б., Пузанов А.В., Ловцкая О.В. и др. Имитационная математическая модель стока средних и малых рек для горных территорий // *Изв. Самарского научн. центра РАН*. – 2012. – 14 (1). – 2334-2342.
19. Кирста Ю.Б., Кирста Б.Ю. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2014. – 283 с.
20. Beven K. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system // *Hydrological Processes*. – 2002. – 16. – 189-206.
21. Кирста Ю.Б. Моделирование пустынных экосистем. – Ашхабад: Ылым, 1986. – 144 с.
22. KIRSTA Y., PUZANOV A., ROZHDESTVENSKAYA T. Models for Describing Landscape Hydrochemical Discharge in Mountain Countries // *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*. – Cham: Springer, 2020. – P. 163-178.
23. Tardy Y., Bustillo V., Boeglin J.-L. Geochemistry applied to the watershed survey: hydrograph separation, erosion and soil dynamics: A case study: the basin of the Niger River, Africa // *Applied Geochemistry*. – 2004. – 19. – 469-518.
24. Кирста Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // *Мир науки, культуры, образования*. – 2011. – 3 (28). – 330-337.
25. KIRSTA Yu. B., PUZANOV A. V. System-analytical simulation of hydrochemical runoff of mountain rivers: Case study of dissolved iron // *Water Resources*. – 2019. – 46 (2). – 199-208.
26. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation // *Transactions of the ASABE*. – 2007. – 50 (3). – P. 885-900.
27. Koch M., Cherie N. SWAT-modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper blue Nile river basin, Ethiopia // *Proceedings of the 6th Int. Conf. on Water Resources and Environment Research, ICWRER, June 3-7, 2013*. – Koblenz, Germany, 2013. – P. 428-523.
28. KIRSTA Y.B., LOVTSKAYA O.V. Spatial year-ahead forecast of air temperature and precipitation in large mountain areas // *SN Appl. Sci*. – 2020. – 2. – Article number: 1044.
29. Iooss B., Lemaître P. A review on global sensitivity analysis methods // *Uncertainty management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications*. – Springer US, 2015. – 264 p.
30. Song X., Zhang J., Zhan C., et al. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications // *J. of Hydrology*. – 2015. – 523. – P. 739-757.
31. Кирста Ю.Б. Чувствительность моделей речного стока к факторам среды и ее количественная оценка // *Изв. Самарского научного центра РАН*. – 2015. – 17 (6). – 97-103.
32. Раковская Э.М., Давыдова М.И. Физическая география России. Ч. 2. Азиатская часть, Кавказ и Урал. – М.: ГИЦ «Владос», 2001. – 304 с.
33. Физико-географическое районирование СССР: характеристика региональных единиц. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968. – 576 с.

34. Кирста Ю.Б., Лубенец Л.Ф., Черных Д.В. Типизация ландшафтов для оценки речного стока в Алтае-Саянской горной стране // Устойчивое развитие горных территорий. – 2011. – 2 (8). – 51-56.
35. Черных Д.В., Самойлова Г.С. Ландшафты Алтая (Алтайский край и Республика Алтай). Карта. – Новосибирск: ФГУП Новосибирская картографическая фабрика, 2011.
36. Цимбалей Ю.М. Ландшафтная карта Алтайского края. Карты // Фондовые материалы ИВЭП СО РАН, 2011.
37. Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: оценочный доклад // Всемирный фонд дикой природы (WWF России). – М., 2011. – 168 с.
38. Kirsta Yu.B. System-analytical modelling – Part II: Wheat biotime run and yield formation. Agroclimatic potential, Le Chatelier principle, changes in agroclimatic potential and climate in Russia and the U.S. // *Ecol. Modelling*. – 2006. – 191. – 331-345.
39. Кирста Ю.Б. Прогноз климата и агроклиматического потенциала Сибирского федерального округа до 2020 г. // Проблемы региональной экологии. – 2011. – 3. – 22-30.
40. Танасиенко А.А., Путилин А.Ф., Артамонова В.С. Экологические аспекты эрозионных процессов: Аналит. обзор / ГПНТБ СО РАН, Ин-т почвоведения и агрохимии СО РАН. Сер. Экология. Вып. 55. – Новосибирск, 1999. – 89 с.
41. Николаев А.Н., Скачков Ю.Б. Влияние снежного покрова и температурного режима мерзлотных почв на радиальный прирост деревьев Центральной Якутии // *Журн. СФУ. Биология*. – 2012. – 5 (1). – Р. 43-51.
42. Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 143 с.
43. Миркин Б.М., Розенберг Г.С. Фитоценология. Принципы и методы. – М.: Наука, 1978. – 212 с.

References

1. Deng X., Singh R.B., Liu J., Güneralp B. Water use efficiency and integrated water resource management for river basin // *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*. – 2015. – 89-90. – P. 1-2.
2. Singh M., Singh R.B., Hasan M.I. (eds.). *Landscape Ecology and Water Management: Proceedings of IGU Rohtak Conference*. Vol. 2. – Tokyo: Springer, 2014. – 361 p.
3. Zhang L. Design and implementation of a mountain torrent disaster warning system based on the distributed hydrological model // *Chemical Engineering Transactions*. – 2015. – 46. – P. 775-780.
4. Paromov V.V., Shumilova K.A., Gordeev I.N. Usloviya formirovaniya polovod'ya bol'shoj vodnosti i prognoz navodneniya na reke Abakan // *Izv. Tomskogo politexnicheskogo un-ta. Inzhiniring georesursov*. – 2016. – 327 (11). – S. 57-67.
5. Vladimirov A.M. Faktory, opredelyayushhie vzniknovenie e'kstremal'ny'x rasxodov i urovnej vody polovod'ya // *Uch. zapiski Rossijskogo gos.gidrometeorologicheskogo un-ta*. – 2009. – 9. – S. 22-39.
6. Rössler O., Froidevaux P., Börst U., et al. Retrospective analysis of a nonforecasted rain-on-snow flood in the Alps – a matter of model limitations or unpredictable nature? // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2014. – 18. – P. 2265-2285.
7. Ruiz-Villanueva V., Badoux A., Rickenmann D., et al. Impacts of large flood along a mountain river basin: the importance of channel widening and estimating the large wood budget in the upper Emme River (Switzerland) // *Earth Surface Dynamics*. – 2018. – 6. – P. 1115-1137.
8. Tao J., Wu D., Gourley J., et al. Operational hydrological forecasting during the IPHEX-IOP campaign – Meet the challenge // *J. of Hydrology*. – 2016. – 541. – P. 434-456.
9. Corripio J.G., López-Moreno J.I. Analysis and Predictability of the Hydrological Response of Mountain Catchments to Heavy Rain on Snow Events: A Case Study in the Spanish Pyrenees // *Hydrology*. – 2017. – 4(2). – P. 20.
10. Casagrande L., Tomasella J., dos Santos Alvalá R.C., et al. Early flood warning in the Itajai-Açu River basin using numerical weather forecasting and hydrological modeling // *Natural Hazards*. – 2017. – 88. – P. 741-757.

11. Meng X.Y., Sun Z.Q., Zhao H.G., et al. Spring Flood Forecasting Based on the WRF-TSRM Mode // *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*. – 2018. – 25. – 141-151.
12. Musselman K.N., Lehner F., Ikeda K., et al. Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America // *Nature Climate Change*. – 2018. – 8(9). – 808-812.
13. Belyakova P.A., Gartsman B.I. Possibilities of flood forecasting in the West Caucasian rivers based on FCM model // *Water Resources*. – 2018. – 45. – S50-S58.
14. Yu Z., Wu J., Chen X. An approach to revising the climate forecast system reanalysis rainfall data in a sparsely-gauged mountain basin // *Atmospheric Research*. – 2019. – 220. – 194-205.
15. Zhang G., Cui P., Yin Y., et al. Real-time monitoring and estimation of the discharge of flash floods in a steep mountain catchment // *Hydrological processes*. – 2019. – 33. – 3195-3212.
16. Rumynin V.G. *Geomigracionny`e modeli v gidrogeologii*. – SPb: Nauka, 2011. – 1158 s.
17. Kirsta Yu.B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems // *Ecol. Modelling*. – 2006. – 191. – 315-330.
18. Kirsta Yu.B., Puzanov A.V., Lovczkaya O.V. i dr. Imitacionnaya matematicheskaya model` stoka srednix i malyx rek dlya gornyx territorij // *Izv. Samarskogo nauchn. centra RAN*. – 2012. – 14 (1). – 2334-2342.
19. Kirsta Yu.B., Kirsta B.Yu. Informacionno-fizicheskij zakon postroeniya e`volyucionny`x sistem. Sistemno-analiticheskoe modelirovanie e`kosistem. – Barnaul: Izd-vo Alt. gos. un-ta, 2014. – 283 s.
20. Beven K. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system // *Hydrological Processes*. – 2002. – 16. – 189-206.
21. Kirsta Yu.B. Modelirovanie pustynny`x e`kosistem. – Ashxabad: Y`ly`m, 1986. – 144 s.
22. Kirsta Y., Puzanov A., Rozhdestvenskaya T. Models for Describing Landscape Hydrochemical Discharge in Mountain Countries // *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*. – Cham: Springer, 2020. – P. 163-178.
23. Tardy Y., Bustillo V., Boeglin J.-L. Geochemistry applied to the watershed survey: hydrograph separation, erosion and soil dynamics: A case study: the basin of the Niger River, Africa // *Applied Geochemistry*. – 2004. – 19. – 469-518.
24. Kirsta Yu.B. Prostranstvennoe obobshhenie klimaticheskix xarakteristik dlya gornyx territorij // *Mir nauki, kul`tury`, obrazovaniya*. – 2011. – 3 (28). – 330-337.
25. Kirsta Yu. B., Puzanov A. V. System-analytical simulation of hydrochemical runoff of mountain rivers: Case study of dissolved iron // *Water Resources*. – 2019. – 46 (2). – 199-208.
26. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation // *Transactions of the ASABE*. – 2007. – 50 (3). – P. 885-900.
27. Koch M., Cherie N. SWAT-modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper blue Nile river basin, Ethiopia // *Proceedings of the 6th Int. Conf. on Water Resources and Environment Research, ICWRER, June 3-7, 2013*. – Koblenz, Germany, 2013. – P. 428-523.
28. Kirsta, Y.B., Lovtskaya, O.V. Spatial year-ahead forecast of air temperature and precipitation in large mountain areas // *SN Appl. Sci*. – 2020. – 2. – Article number: 1044.
29. Iooss B., Lemaître P. A review on global sensitivity analysis methods // *Uncertainty management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications*. – Springer US, 2015. – 264 p.
30. Song X., Zhang J., Zhan C., et al. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications // *J. of Hydrology*. – 2015. – 523. – P. 739-757.
31. Kirsta Yu.B. Chuvstvitel`nost` modelej rechnogo stoka k faktoram sredy` i ee kolichestvennaya ocenka // *Izv. Samarskogo nauchnogo centra RAN*. – 2015. – 17 (6). – 97-103.
32. Rakovskaya E.M., Davydova M.I. *Fizicheskaya geografiya Rossii. Ch. 2. Aziatskaya chast`, Kavkaz i Ural*. – M.: GICz «Vlados», 2001. – 304 s.

33. Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie SSSR: xarakteristika regional'ny'x edinic. – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1968. – 576 s.
34. Kirsta Yu.B., Lubenecz L.F., Cherny'x D.V. Tipizaciya landshaftov dlya ocenki rechnogo stoka v Altae-Sayanskoj gornoj strane // Ustojchivoe razvitie gorny'x territorij. – 2011. – 2 (8). – 51-56.
35. Cherny'x D.V., Samojlova G.S. Landshafty' Altaya (Altajskij kraj i Respublika Altaj). Karta. – Novosibirsk: FGUP Novosibirskaya kartograficheskaya fabrika, 2011.
36. Cimbalej Yu.M. Landshaftnaya karta Altajskogo kraja. Karty' // Fondovy'e materialy' IVE'P SO RAN, 2011.
37. Izmenenie klimata i ego vozdejstvie na e'kosistemy', naselenie i xozyajstvo rossijskoj chasti Altae-Sayanskogo e'koregiona: ocenochny'j doklad // Vsemirny'j fond dikoj prirody' (WWF Rossii). – M., 2011. – 168 s.
38. Kirsta Yu.B. System-analytical modelling – Part II: Wheat biotime run and yield formation. Agroclimatic potential, Le Chatelier principle, changes in agroclimatic potential and climate in Russia and the U.S. // Ecol. Modelling. – 2006. – 191. – 331-345.
39. Kirsta Yu.B. Prognoz klimata i agroklimaticheskogo potenciala Sibirskogo federal'nogo okruga do 2020 g. // Problemy' regional'noj e'kologii. – 2011. – 3. – 22-30.
40. Tanasienko A.A., Putilin A.F., Artamonova V.S. E'kologicheskie aspekty' e'rozionny'x processov: Analit. obzor / GPNTB SO RAN, In-t pochvovedeniya i agroximii SO RAN. Ser. E'kologiya. Vy'p. 55. – Novosibirsk, 1999. – 89 s.
41. Nikolaev A.N., Skachkov Yu.B. Vliyanie snezhnogo pokrova i temperaturnogo rezhima merzlotny'x pochv na radial'ny'j prirost derev'ev Central'noj Yakutii // Zhurn. SFU. Biologiya. – J. of Siberian Federal University. Biology. – 2012. – 5 (1). – R. 43-51.
42. Selegej V.V., Selegej T.S. Teleczkoe ozero. – L.: Gidrometeoizdat, 1978. – 143 s.
43. Mirkin B.M., Rozenberg G.S. Fitocenologiya. Principy' i metody'. – M., 1978. – 212 s.

UNIVERSAL SIMULATION MODEL OF LONG-TERM FLOOD

FORECAST FOR MOUNTAIN RIVERS

Y.B. Kirsta, O.V. Lovtskaya

Institute for Water and Environmental Problems of the SB RAS, Barnaul, E-mail: kirsta@iwep.ru, lov@iwep.ru

The universal simulation model for forecasting streamflow during high water has been developed by the example of 34 medium and small rivers of the Altai-Sayan mountain country. The input factors of the model are monthly precipitation and average monthly air temperatures. Meteorological parameters are calculated as a percentage of their long-term average values with further averaging for the whole study area. We predict streamflow for 3 months ahead with three times less variance than that for forecasting the average long-term value. The forecast quality is characterized by the Nash-Sutcliffe index $NSE > 0,68$ that is very high for long-term flood predictions.

Key words: system-analytical modeling, snowmelt flood, forecast, mountain rivers, Altai, Sayan.

Received March 3, 2020