

УДК [556.51+911.5]:519.85

ИМИТАЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТОКА СРЕДНИХ И МАЛЫХ РЕК ДЛЯ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2012 Ю.Б. Кирста, А.В. Пузанов, О.В. Ловцкая, Л.Ф. Лубенец, Я.Э. Кузьяк,
А.Ю. Пахотнова

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул

Поступила в редакцию 17.05.2012

Предложен метод построения имитационных математических моделей водного стока горных рек. На примере средних и малых рек Алтае-Саянской горной страны получена универсальная модель сезонной и межгодовой динамики стока. Для расчета сезонной динамики стока выделены четыре гидрологических периода: зимняя межень (XII-III месяцы), весенне-летнее половодье (IV-VI), летняя (VII-VIII) и осенняя (IX-XI) межени. Модель применима для произвольных речных бассейнов, в том числе, где недостаточна или отсутствует гидрометеорологическая информация. Используется обобщенная по всей горной стране помесечная динамика температур воздуха и осадков, нормированных на соответствующие среднемноголетние значения. Используется картографическая информация о рельефе и ландшафтной структуре бассейнов. Предложен удобный критерий для оценки адекватности математических моделей.

Ключевые слова: *водный сток, горные реки, моделирование, половодье, межень, Алтай, Саяны*

Рассматриваемая в настоящей работе территория Алтае-Саянской горной страны расположена между 50° и 56° с.ш., 83° и 100° в.д. Страна представляет собой часть мирового водо-раздела между гумидной областью Северного Ледовитого океана и аридной бессточной областью Центральной Азии. Преобладающие высоты хребтов горных систем составляют 2000-2500 м, достигая на Алтае 3500-4500 м. У всех рек страны наибольший сток наблюдается в теплый период года. Режим стока зависит весной от таяния снежного покрова, а в летне-осенний период – от количества выпадающих осадков. Доля снеговой составляющей в годовом стоке достигает 50% и более. При наличии в речных бассейнах ледников сток зависит еще от интенсивности их таяния. Решение проблем рационального использования водных ресурсов, и речного стока в частности, в современных условиях требует разработки адекватных математических моделей, позволяющих количественно характеризовать протекающие в речных бассейнах гидрологические процессы. Модели должны учитывать как временные, так и пространственные аспекты воздействия на гидрологический режим рек основных природных и антропогенных факторов. Такая задача резко осложняется для горных территорий вследствие

их сложного орографического строения и не менее сложной пространственно-временной структуры климатических полей.

Сток является одной из главных гидрологических характеристик рек. Для его оценки разработаны различные методы, учитывающие физико-географические и гидрографические особенности водосборных бассейнов. Сейчас эти оценки выполняются с привлечением ГИС-технологий, позволяющих в большей или меньшей степени автоматизировать расчеты. В частности, ГИС-технологии используются для расчета пространственного (площадного) распределения таких необходимых для оценки стока климатических элементов как осадки, температура, влажность воздуха и другие, наблюдения за которыми выполняются лишь в отдельных точках анализируемой территории. При этом применяются различные методы интерполяции данных, часто имеющие погрешность, близкую к погрешности традиционных статистических оценок [1]. То же относится и к методам оценки непосредственно гидрологических характеристик [2]. В условиях гор именно погрешность расчета площадных метеорологических характеристик определяет точность математических моделей стока.

В современном моделировании ГИС-средства и собственно физически обоснованные модели гидрологических процессов объединяются в одно целое. ГИС используются для учета пространственно распределенных входных данных, визуализации результатов расчетов, моделирования отдельных процессов и других целей. В свою очередь модели основаны на дифференциальных уравнениях гидродинамики и математической физики, дополняемых по мере необходимости имитационными уравнениями [3, 4]. Дифференциальные уравнения требуют подробной

Кирста Юрий Богданович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник. E-mail: kirsta@iwer.ru

Пузанов Александр Васильевич, доктор биологических наук, заместитель директора. E-mail: puzanov@iwer.ru

Ловцкая Ольга Вольфовна, старший научный сотрудник. E-mail: lov@iwer.ru

Лубенец Лилия Федоровна, кандидат географических наук, научный сотрудник. E-mail: lilia@iwer.ru

Кузьяк Яна Эдуардовна, аспирантка. E-mail: kuznyak@iwer.ru

Пахотнова Анна Юрьевна, ведущий инженер. E-mail: pahotnova@iwer.ru

пространственно распределенной информации об осадках, температурах воздуха, испаряемости, подземных водоносных горизонтах, морфометрии, уклонах, свойствах водонасыщенных почв и пород, показателях сопротивлению течения на склонах и в русловой сети, и т.д. и т.п. Например, в горном речном бассейне, но на разных его участках, могут одновременно идти дождь, снег или отсутствовать осадки, может таять или нет снежный покров, значительно меняется по высоте испарение. В условиях гор подобная информация практически отсутствует, что приводит физическую обоснованность модели в свою полную противоположность [3].

Системно-аналитическое моделирование. Предлагаемый метод системно-аналитического моделирования (САМ) [5, 6] позволяет обойти изложенные выше проблемы и построить имитационные модели с адекватным описанием реальных физических и гидрологических процессов. Адекватность мы будем понимать аналогично К. Beven [7] как соответствие модели физическим принципам и законам, дополненным принятыми в их рамках допущениями. При этом мы не будем требовать обязательного описания указанных процессов через дифференциальные уравнения математической физики, характеризующие потоки массы, импульса и различных форм энергии, как это делает J. Refsgaard [8]. САМ позволяет выявить и количественно охарактеризовать совокупность основных процессов и их связей с факторами среды (то есть структурно-функциональную организацию объекта) у недостаточно изученных природных систем. Например, с помощью САМ были обнаружены короткие 1-3-дневные периоды в цикле ежегодного развития растения, не зависящие от температуры, а также оценены условия формирования и количество подвешенной влаги в почвах [5, 9]. САМ опирается на системно-иерархический подход и выполняется как специальный математический анализ уравнений, имитирующих внутригодовую и многолетнюю динамику основных показателей природных систем (подробнее см. [5, 6]). В нашем случае это внутригодовая динамика стока, которая рассчитывается и сравнивается с экспериментальными данными по каждому году из имеющихся многолетних рядов наблюдений. В настоящей работе метод САМ применяется для поиска и количественной характеристики функциональных связей речного стока с метеорологическими факторами, морфометрией и ландшафтной структурой речных бассейнов. САМ позволяет выделить информацию об этих связях из рядов экспериментальных данных подобно экспертно-аналитическому методу Y. Tardy [10]. Имитационная модель водного стока строится из алгебраических уравнений, поскольку, как указано выше, применение дифференциальных уравнений для описания гидрологических процессов в условиях гор невозможно. Определение характера функциональных зависимостей между процессами и факторами производится

через гидрологически обоснованный подбор и корректировку системы уравнений для минимизации расхождений (квадратичной невязки) между рассчитываемыми и наблюдаемыми динамическими характеристиками. Использование в качестве левых частей уравнений собственно наблюдаемых значений стока позволяет через решение обратной задачи (с привлечением оптимизационных методов) найти параметры уравнений и оценить квадратичную невязку для тестируемого варианта модели. Модель считается построенной, когда найдена такая система уравнений, которая обеспечивает наименьшее значение невязки.

Одной из особенностей САМ является сниженная чувствительность к погрешности исходных данных. Большая погрешность обуславливает только увеличение невязки, не приводя к изменению ни вида искомых уравнений, ни значений их параметров. Вторая особенность САМ – это отсутствие фиксации формы искомых зависимостей от факторов среды. Отметим, что в случае дифференциальных уравнений эта форма достаточно жестко фиксирована самим выбором тех или иных уравнений. С этой целью нами применяется универсальная функция H , задаваемая выражением:

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

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). Из рис. 1 видно, что функция может использоваться для аппроксимации различных зависимостей между переменными, если изменять значения ее параметров в (1). Укажем, что применение H близко к методу автоматического моделирования [11].

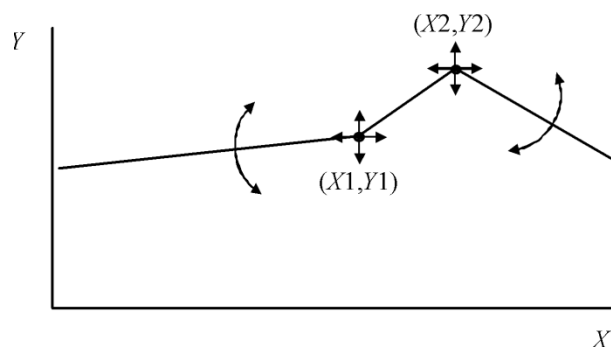


Рис. 1. Непрерывная кусочно-линейная функция $H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X)$ из трех линейных фрагментов с произвольно меняемыми параметрами (см. (1))

Третья особенность выполняемого САМ связана с указанной выше недостаточностью данных о закономерностях гидрологических процессов, а также о климатических, геологических, почвенных и других характеристиках территории. Разнообразные природно-климатические условия Алтае-Саянской горной страны обуславливают заметные различия в условиях формирования речного стока, как во временном, так и пространственном аспектах. При большом количестве анализируемых створов (всего 34) САМ позволяет нивелировать уникальные особенности бассейнов, отвечающие конкретным створам, и определить в процессе моделирования общие для этих бассейнов закономерности гидрологических процессов.

Любая математическая модель требует проверки ее адекватности. С этой целью нами предложен удобный универсальный критерий, позволяющий оценивать адекватность любых расчетных методов и моделей путем сравнения рядов наблюдаемых и рассчитанных характеристик [12]:

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

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

В соответствии с правилами сложения дисперсий случайных величин значения A могут меняться от нуля до единицы и выше:

- близкие к 0 – это идентичность рядов и абсолютная адекватность модели;
- $1/\sqrt{2} = 0,71$ – пороговое значение, при превышении которого модель становится неадекватной и ее целесообразно заменить просто на среднее значение характеристики;
- приближающиеся к 1 – (а) дисперсия расчетного ряда больше, чем у наблюдаемого при положительной ковариации рядов; (б) одинаковые дисперсии рядов при нулевой ковариации – в этом случае модель перестает отражать какие-либо закономерности, присущие наблюдаемому ряду, и эквивалентна случайным вариациям характеристики около ее среднего значения с той же дисперсией, что и у наблюдаемого ряда;
- больше 1 – большая дисперсия расчетного ряда по сравнению с наблюдаемым, то есть использование модели становится неразумным и ее лучше заменить на случайные вариации характеристики около среднего значения с дисперсией, меньшей или равной наблюдаемой.

Из (2) видно, что критерий A по сути представляет собой погрешность модели, нормированную на стандартное отклонение для наблюдаемого ряда данных.

Исходные материалы. Выполнение САМ опиралось на наблюдения за речным стоком,

проведенные на территории Алтае-Саянской горной страны Гидрометеорологической службой СССР и России в 1951-2003 гг. Наблюдения за стоком были дополнены данными о месячных осадках, среднемесечных температурах воздуха, ландшафтной структуре, высоте и уклонам территории. Имея в виду моделирование в дальнейшем гидрохимического стока, было выбрано 33 речных створа с параллельными наблюдениями за водным и гидрохимическим стоками [13], а также один дополнительный створ (р. Майма, с. Майма) для возможной более детальной проработки уравнений водного стока с проведением натурных исследований в будущем. Как уже сказано, количество выбранных створов, которые одновременно анализируются в САМ, позволяет охарактеризовать общие для территории закономерности формирования речного стока.

Наблюдения за гидрохимическим стоком Гидрометеорологической службой проводятся несколько раз в году, что не позволяет выбрать помесечный шаг описания процессов. Действительно, исходя из требований САМ [6] описание и гидрологических, и гидрохимических процессов в модели гидрохимического стока должно иметь одинаковую дискретизацию во времени. В результате, учитывая особенности внутригодовой динамики речного стока, для САМ водного стока были выделены 4 гидрологических периода/сезона: первый (зимняя межень, XII-III месяцы), второй (весенне-летнее половодье, IV-VI), третий (летняя межень, VII-VIII), четвертый (осенняя межень с возможными паводками при сильных дождях, IX-XI). Таким образом, данные ежедневных наблюдений за водным стоком на каждом из 34 створов усреднялись по выбранным сезонам, и в дальнейшем использовались его четыре значения по каждому году наблюдений. В среднем по створам сток составлял порядка 10, 140, 50, 30 м³/с для 1, 2, 3, 4-го сезонов соответственно.

Для учета ландшафтной структуры речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны была выполнена типизация ландшафтных выделов, отражающая условия формирования гидрологического и гидрохимического речных стоков, в том числе высотно-поясную и структурно-ярусную неоднородность территории [13]. Всего выделено 12 типологических групп геосистем и отдельно 13-я для аквальных ландшафтов, имеющих незначительную площадь (табл. 1). Для всех 34 створов определены границы отвечающих створам речных бассейнов (рис. 2), рассчитаны высоты и площади, занимаемые выделенными группами геосистем. Исходным картографическим материалом служили карта «Ландшафты Алтая (Алтайский край и Республика Алтай)», разработанная Д. Черных и Г. Самойловой [14], «Ландшафтная карта Алтайского края», специальное содержание которой составлено Ю. Цимбалей [15] масштаба 1:500000, а также топографические карты масштаба 1:200000. Данные картографические источники были использованы

для создания цифровых версий карт в программной среде ArcGIS 9.2. Геостатистические характеристики ландшафтной структуры речных бассейнов, в частности: средняя высота бассейна,

средняя высота и относительная площадь групп геосистем в речном бассейне, вычислялись на основе TIN и GRID моделей, построенных с помощью модуля 3D Analyst.

Таблица 1. Средние высота, относительная площадь и вклад в речной сток выделенных групп геосистем Алтае-Саянской горной страны

Группа геосистем (ландшафтов)	Средняя высота, м БС	Средняя относительная площадь % ¹	Доля осадков, уходящая в сток по 4-м гидрологическим сезонам года (XII-III, IV-VI, VII-VIII, IX-XI мес.) ²			
			1	2	3	4
1. Гляциально-нивальные высокогорья	2448	1,2	0,30	0,23	0,45	0,00
2. Гольцово-альпинотипные высокогорья и среднегорья, псевдогольцовые низкогорья	1446	9,5	0,09	0,35	0,61	0,28
3. Тундрово-степные и криофитно-степные высокогорья	2329	0,4	0,30	0,56	0,02	0,00
4. Лесные высокогорья, среднегорья и низкогорья	742	44,1	0,29	0,33	0,69	0,91
5. Экспозиционно-лесостепные и степные высокогорья и среднегорья	1213	1,8	0,14	0,69	0,75	0,00
6. Лесостепные, степные низкогорья и предгорья	415	15,9	0,36	0,24	0,62	0,70
7. Межгорные котловины с различными вариантами степей и лесостепей	720	5,2	0,33	0,31	0,85	0,44
8. Степные и лесостепные подгорные и возвышенные аккумулятивные равнины	268	8,8	0,06	0,31	0,42	0,31
9. Недренируемые слабопроточные интразональные и интрапоясные ландшафты	1501	1,3	0,72	0,93	0,00	0,22
10. Долины горных рек	563	9,0	0,22	0,00	0,63	0,52
11. Долины равнинных рек	229	2,0	0,08	0,37	0,61	0,99
12. Лесные возвышенные и подгорные равнины	263	0,7	0,02	0,36	0,77	0,42
13. Аквальные ландшафты	1400	0,03	0,58	0,69	0,01	1,00

Примечание: ¹ - в % от общей площади речных бассейнов; ² - результаты расчетов (см. Результаты и обсуждение).

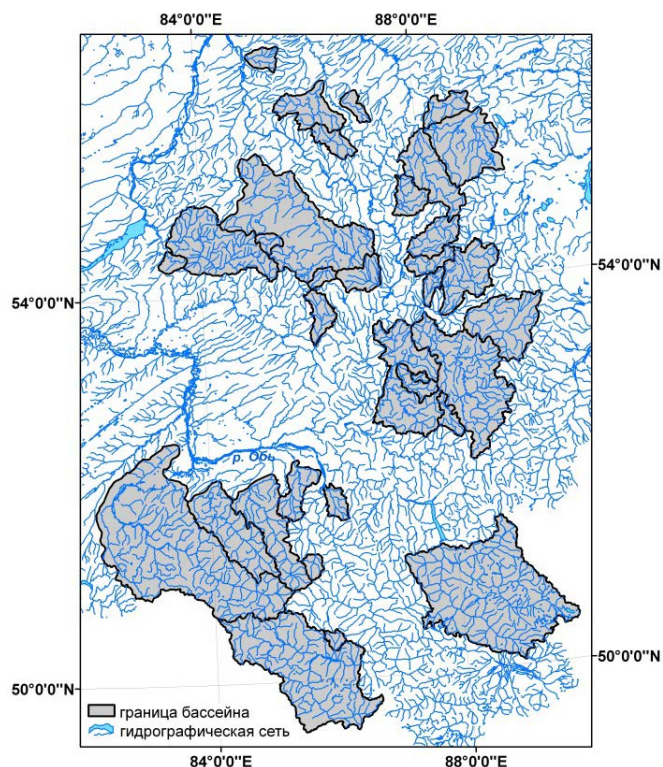


Рис. 2. Карта-схема расположения 34 модельных речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны

Перейдем к метеорологическим данным. Саянской горной страны приведена в табл. 2. Общая климатическая характеристика Алтае-

Таблица 2. Среднемноголетние (1951-2008 гг.) значения температур воздуха и осадков

Климатическая характеристика	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
температура, °С	-16,0	-14,6	-8,0	2,2	10,5	15,7	17,8	15,3	9,6	2,1	-7,3	-13,3
осадки, мм	21,9	19,5	22,3	40,7	58,3	71,1	81,9	73,0	50,9	49,4	39,5	30,6

На территории большинства бассейнов, отвечающих 34 выбранным речным створам, регулярные метеорологические наблюдения отсутствовали. Ранее с помощью САМ было установлено существование общих для больших пространств (например, для территории России или США) трендов температур воздуха и осадков, если их выражать в процентах/долях от соответствующих среднемноголетних месячных значений [9, 16]. На этой основе для Алтае-Саянской горной страны выявлена единая по территории многолетняя помесечная динамика температур и осадков [12]. Эта многолетняя помесечная динамика рассчитана за 1951-2008 гг. по 11 реперным метеостанциям с помощью разработанного метода обобщения климатических факторов. Последние выражены в процентах/долях от соответствующих среднемноголетних значений и не зависят от высоты расположения метеостанций. Отсутствие зависимости от меняющейся по территории высоты над уровнем моря было особенно важным, так как позволило характеризовать динамику нормированных указанным образом температур воздуха и осадков сразу по всей площади каждого бассейна, перепад высот в которых достигал 2000 м. Кроме того, эта динамика была одинаковой для всех речных бассейнов.

Была оценена адекватность указанных расчетов климатических характеристик. Сравнение расчетных и наблюдаемых многолетних рядов данных по критерию A в (2) для случая произвольных (не реперных) метеостанций дало $A=0,39$ для температур воздуха и $A=0,62$ для осадков [12]. Эти значения A мы используем позже при оценке адекватности модели речного стока. Отметим, что для перехода к описанию многолетней помесечной динамики температур и осадков непосредственно в градусах Цельсия и мм достаточно знать только их среднемноголетние месячные значения. Таким образом, созданная база данных для САМ речного стока включала следующие характеристики речных бассейнов: гидрологические (5300 среднесезонных величин стока), метеорологические ($636+636=1272$ нормированных месячных значений температур воздуха и осадков), ландшафтные (352 значения площадей и высот).

Построение имитационной модели речного стока. Поскольку в числе входных факторов модели использовались нормированные значения температур воздуха и осадков, необходимо

было аналогичным образом нормировать и речной сток. Для этого все наблюдаемые величины стока были разделены на отвечающие им среднемноголетние сезонные значения в каждом бассейне. Тем самым от единиц измерения стока в $\text{м}^3/\text{с}$ мы перешли к безразмерным единицам **относительного стока**. Аналогично, площади групп геосистем в каждом бассейне (км^2) были переведены в доли/проценты делением на площадь этого бассейна. Подобно правилам регрессионного анализа для успешного применения САМ необходимо, чтобы массив фактических данных о динамике анализируемого процесса на порядок превышал число параметров в уравнениях модели [6]. В нашем случае это 5300 среднесезонных значений речного стока, что теоретически позволяет вводить в модель до 500 параметров или $500/4=125$ для каждого из 4-х сезонов. В то же время число речных бассейнов составляет 34, что допускает только 3 параметра, если мы описываем влияние конкретной характеристики бассейнов на сток, например, влияния площади или высоты расположения ландшафтов. Ограничение тремя параметрами для кусочно-линейной функции H означает, что она должна включать уже не три (рис. 1), а только два линейных фрагмента. Такое условие реализовано согласно (1) как зависимость $H(X_1, X_1, 1, 1, Z_1, Z_2, X)$.

Выполнение САМ с проверкой различных вариантов системы уравнений, описывающих формирование речного стока под воздействием различных факторов среды, позволили определить наилучшую по квадратичной невязке модель. Последняя учитывает ландшафтную структуру речных бассейнов и имеет по 36 параметров для каждого из четырех выделенных гидрологических периодов/сезонов, рассчитываемых независимо друг от друга. Ее блочная структура приведена на рис. 3.

В первом блоке (сопоставление и обработка данных) обеспечивается систематизация входных факторов модели и исключение из расчетов данных, сопутствующих пропускам в наблюдениях за стоком или случайным ошибкам, приводящим к значительному расхождению расчетного и наблюдаемого стоков. Расхождение может возникать для отдельных бассейнов в конкретный сезон конкретного года из-за (а) значительного отличия между обобщенным значением метеорологического фактора и реально имеющими место флуктуациями этого фактора, (б)

технических ошибок записи данных и других. Обнаружение случайных ошибок в блоке осуществляется 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 обычно имеет место для адекватных математических моделей. Ошибкой формально считаются те наблюдения за стоком в конкретном бассейне, году и сезоне, которые выходили за пределы утроенного среднего квадратичного отклонения

(утроенного квадратного корня из квадратичной невязки) от расчетной величины. Данным образом исключалось от 2% до 4% данных. Отметим, что исключенные данные, по сути, могут быть достоверными, отвечая реальным случайным флуктуациям температур воздуха или осадков в данном бассейне. В то же время их исключение не влияет на САМ вследствие их небольшого количества. После исключения ошибок определение параметров путем решения обратной задачи и расчет невязки для тестируемого варианта уравнений модели начинаются заново.

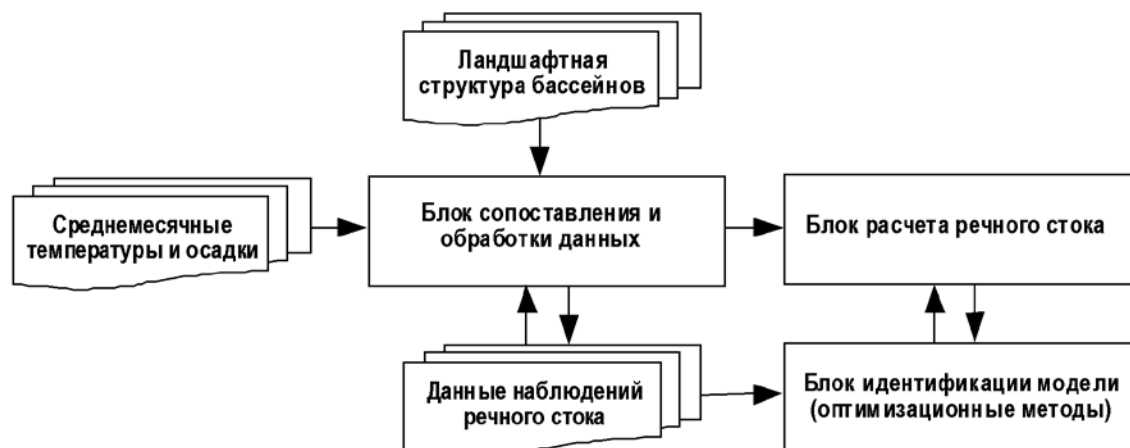


Рис. 3. Схема расчетов в модели речного стока

Во втором блоке выполняется расчет водного стока для каждого бассейна, года и гидрологического сезона по уравнениям:

$$Q^i = \sum_k a_k \times S_k^i \times P_1 \times H(c_1, c_2, T_1) \times H(c_4, c_5, h_k^i) + \sum_k b_k \times S_k^i \times P_2 \times H(c_7, c_8, T_2) \times H(c_4, c_5, h_k^i) + c_{10}, \quad (3)$$

где Q^i – относительный среднесезонный водный сток для створа бассейна $i=1 \div 34$; первое и второе слагаемые в (3) отвечают вкладу предшествующего и рассматриваемого сезонов года соответственно, а при расчете 1-го сезона (зимняя межень) – отвечают 3- и 4-му сезонам предшествующего года; a_k , b_k – параметры, характеризующие вклад k -ой группы геосистем для указанных сезонов, $k=1 \div 13$; S_k^i – относительная площадь k -ой группы геосистем в бассейне i ; h_k^i – средняя высота этой же группы в бассейне i , м БС; P_1 , P_2 – нормированные значения осадков в среднем за соответствующий сезон; T_1 , T_2 – отклонения нормированных температур воздуха от единицы (это среднесезонное значение нормированной характеристики) в среднем за соответствующий сезон; H – кусочно-линейная функция (1); $c_{1 \div 9}$ – параметры, отражающие влияние

на сток температур T_1 , T_2 и высоты геосистем h_k^i в бассейне; c_{10} – параметр, характеризующий постоянное пополнение ($c_{10} > 0$) или потери ($c_{10} < 0$) стока в грунтовые воды и воды зон трещиноватых пород.

В правой части (3) суммируются вклады в сток Q^i бассейна i от каждой группы геосистем. Вклад k -ой группы геосистем в первом слагаемом (3) формируется осадками P_1 предшествующего гидрологического сезона и зависит: от особенностей движения в почвах и различных потерь влаги в этой группе прежде, чем она достигнет русла (параметр a_k), от занимаемой группой площади S_k^i , условий испарения влаги (от температур T_1), от высоты расположения геосистем h_k^i . Вклад k -ой группы геосистем во втором слагаемом (3) осуществляется за счет осадков P_2 текущего гидрологического сезона и зависит от вышеперечисленных факторов, поверхностного и приповерхностного стока (параметр b_k), а также от S_k^i , T_2 , h_k^i .

В третьем блоке (идентификация модели) отдельно для каждого гидрологического сезона решается обратная задача по определению 36 параметров, обеспечивающих минимальные отклонения рассчитываемого по (3) водного стока от его наблюдаемых значений. Для этого по имеющейся для сезона выборке Q^i , состоящей из 1300 среднесезонных значений речного стока, с помощью оптимизационных методов пакета

программ MATLAB находятся все параметры (3). Тем самым для расчета водного стока по 4 выделенным сезонам идентифицируются $36 \times 4 = 144$ параметра. Количество последних удовлетворяет требованию САМ о десятикратном превышении над ними количества фактических данных (5300). Оценим адекватность модели с помощью критерия A в (2). Определяя его по рассчитанному и наблюдаемому относительным водным стокам, получаем:

Гидрологические сезоны	1	2	3	4
Критерий A	0,65	0,56	0,58	0,59

Мы видим, что полученные значения A меньше пороговой величины 0,71 (см. уравнение 2), отвечающей простейшей модели из одного среднего значения характеристики. Таким образом, полученная модель речного стока достаточно адекватно отражает основные гидрологические процессы, идущие в речных бассейнах Алтае-Саянской горной страны.

Результаты и обсуждение. Важнейшим входным фактором модели служат обобщенные по всей территории месячные осадки. Согласно (3) сток им пропорционален, поэтому они дают основной вклад в погрешность расчетов. Учитывая правила сложения дисперсий, погрешность модели не должна быть меньше погрешности расчета обобщенных осадков. В нашем случае у модели в среднем $A \approx 0,6$, что даже меньше, чем $A = 0,62$ у осадков (см. Исходные материалы). Отсюда следует два вывода:

- уравнения (3) адекватно описывают интегральные гидрологические процессы в речных бассейнах и поэтому дают малый собственный вклад в общую погрешность расчетов стока,
- обобщенные по территории осадки [12] более адекватно отражают их площадное выпадение и обеспечивают более точные расчеты речного стока по сравнению с точечными наблюдениями на отдельных метеостанциях. Очевидно, этот вывод важен для любых гидрологических расчетов, использующих площадные метеорологические характеристики.

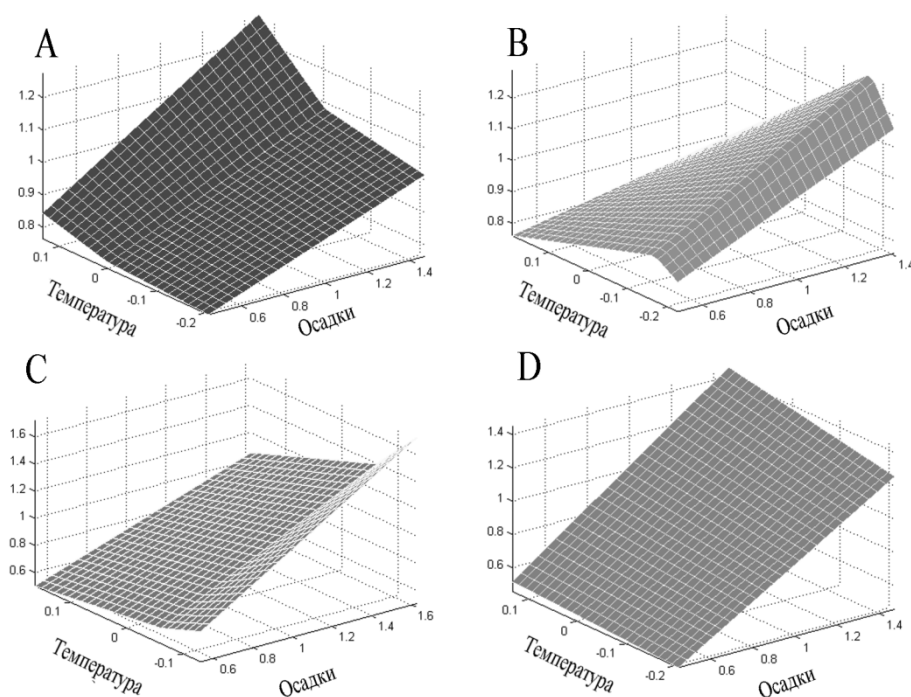


Рис. 4. Зависимость речного стока от температур и осадков по территории Алтае-Саянской горной страны (переменные измеряются в долях от их среднемноголетних значений):

А – 1 гидрологический период/сезон (зимняя межень, XII-III месяцы), температуры и осадки за IX-XI месяцы предшествующего года; В – 2 сезон (весенне-летнее половодье, IV-VI), температуры и осадки за IV-VI; С – 3 сезон (летняя межень, VII-VIII), температуры и осадки за VII-VIII; D – 4 сезон (осенняя межень, IX-XI), температуры и осадки за IX-XI.

Рассмотрим в качестве примера створ р. Майма. На рис. 4 для четырех выделенных гидрологических сезонов приведены полученные зависимости среднесезонного речного стока от двух из пяти (P_1 , P_2 , T_1 , T_2 , h_k^i), используемых в уравнении (3) входных факторов: температур воздуха и осадков. Мы видим:

- уменьшение речного стока в зимнюю межень (рис. 4А) при снижении осенних температур воздуха; здесь, очевидно, при снижении температур все большая доля осадков остается на склонах гор в виде снежного покрова и поэтому происходит меньшая «зарядка» почвогрунтов влагой на зиму;

- увеличение стока с понижением температур в весенне-летнее половодье (рис. 4В), так как все меньшая доля осадков теряется на испарение в атмосферу; его заметное уменьшение при очень низких температурах вызвано задержкой таяния снежного покрова высоко в горах и смещением этого таяния, а значит и доли стока, в 3-й сезон (на июль).
- увеличение стока с понижением температур в летнюю межень (рис. 4С), так как все меньшая доля осадков уходит на суммарное испарение в атмосферу;
- некоторое уменьшение стока с понижением температур в осеннюю межень (рис. 4Д), поскольку, как и в случае рис. 4А, все больше осадков остается на склонах гор в виде снега.

Разработанная модель имеет большое число параметров, в отличие от моделей речного стока, использующих традиционные подходы математического моделирования, как например, [17]. В традиционных моделях возможность введения дополнительных параметров ограничена, так как определение их значений требует специальных, обычно трудоемких натурных исследований. Вслед за этим становится необходимой более подробная информация о климатических, орографических и гидрогеологических характеристиках речного бассейна, почвенно-растительном покрове, ледниках, гидрографическом строении речной сети и прочее. Все это сразу приводит к непропорционально большим затратам материальных и трудовых ресурсов. У САМ такой проблемы не существует, поскольку используется информация, содержащаяся в неявном виде непосредственно в длинных рядах данных по динамике исследуемой характеристики, в нашем случае – архивных данных по речному стоку. По этой информации нами оценена, например, роль различных ландшафтов в формировании речного стока.

Следует отметить, что большинство математических моделей водного стока создаются по данным, полученным для одного конкретного речного бассейна. В подобных случаях проанализировать и количественно охарактеризовать влияние на сток непосредственно ландшафтной структуры крайне затруднительно. Действительно, каждому ландшафту (группе геосистем в нашем случае) будет отвечать одно значение площади (или высоты, или иной характеристики), которую он занимает в бассейне. Построение же функции зависимости стока от площади ландшафта лишь по одной точке (имеющемуся значению площади) невозможно. Из модели будет невозможно исключить и индивидуальные особенности анализируемого бассейна, что ограничивает ее применение для других бассейнов. В таблице 1 приведены полученные в ходе САМ значения b_k . По сути, они приблизительно равны доле выпавших за гидрологический сезон осадков, которая попадает от каждой группы

геосистем в речной сток в этом же сезоне. Эти коэффициенты косвенно учитывают и изменение реальных осадков (в мм) с высотой. Так, рост жидких осадков на высотах 1600-1900 м над уровнем моря [18] соответственно увеличивает вклад в сток у расположенных на этих высотах групп геосистем. В таблице 1 сразу отмечается малый вклад высокогорий в речной сток осенью (группы геосистем 1-3, 5, сезон 4), когда выпадающие осадки остаются на поверхности в виде снежного покрова. Также виден значительный вклад в сток от лесных и лесостепных высокогорий, среднегорий и низкогорий в летнюю и осеннюю межень (группы 4, 6, сезоны 3, 4). В целом значения b_k показывают, что в речной сток попадает более половины выпавших осадков в летнюю межень и несколько меньше в осеннюю. В свою очередь, значения параметра c_{10} , характеризующего в (3) постоянное пополнение или потери стока в грунтовые и трещиноватые воды, составляют с 1 по 4-й сезоны соответственно: +0,27; +0,40; -0,02; -0,38 или +27%, +40%, -2%, -38% от среднееголетнего значения стока для конкретного речного бассейна. Обращает на себя внимание небольшой отток влаги в грунтовые воды летом (-2%), то есть питание рек Алтае-Саянской горной страны в этот период года обеспечивается преимущественно осадками предшествующего и текущего гидрологического сезонов. Значения параметров модели характеризуют одновременно 34 бассейна, значительно отличающихся по своей орографии, водовмещающим горным породам, климату. Тем самым модель является достаточно универсальной и может применяться для расчета стока в различных речных бассейнах Алтае-Саянской горной страны.

Выводы: у разработанной модели водного стока особенно ценно то, что она применима для любых произвольно взятых речных створов, поскольку вся требующаяся для расчетов входная информация находится из имеющихся ландшафтных и топографических карт с добавлением обобщенных по территории Алтае-Саянской горной страны нормированных температур и осадков. Полученная многолетняя динамика относительного стока (за каждый гидрологический сезон) легко переводится в динамику реального стока (в $\text{м}^3/\text{с}$). Необходимый для этого коэффициент перехода определяется из сопоставления рассчитанных относительных значений стока с реальными за 1-2 года наблюдений. Вслед за этим из правой части (3) легко находится динамика водного стока в $\text{м}^3/\text{с}$, сформированного в каждой группе геосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Коновалова, Н.В. Интерполирование климатических данных при помощи ГИС-технологий / Н.В. Коновалова, В.Б. Коробов, Л.Ю. Васильев // Метеорология и климатология. 2006. № 5. С. 46-53.

2. Brus, D.J. Incorporating models of spatial variations in sampling strategies for soil: PhD thesis. – The Netherlands: Wageningen University, 1993. 211 p.
3. Виноградов, Ю.Б. Математическое моделирование в гидрологии: Учебное пособие для студентов учреждений высш. проф. образования / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. 304 с.
4. Румынин, В.Г. Геомиграционные модели в гидрологии. – СПб: Наука, 2011. 1158 с.
5. Kirsta, Yu.B. System-analytical modeling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems // *Ecol. Modelling*. 2006. Vol. 191. P. 315-330.
6. Кирста, Ю.Б. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем: монография / Ю.Б. Кирста, Б.Ю. Кирста. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2009. 270 с.
7. Beven, K. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system // *Hydrological Processes*. 2002. Vol. 16. P. 189-206.
8. Refsgaard, J. Terminology, modelling protocol and classification of hydrological model codes // *Water Science and Technology Library*, Vol. 22. Distributed hydrological modeling / M.B. Abbott and J.C. Refsgaard (eds.). – Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 17-39.
9. Kirsta, Yu.B. System-analytical modeling – 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. Vol. 191. P. 331-345.
10. Tardy, Y. Geochemistry applied to the watershed survey: hydrograph separation, erosion and soil dynamics: A case study: the basin of the Niger River, Africa / Y. Tardy, V. Bustillo, J.-L. Boeglin // *Applied Geochemistry*. 2004. Vol. 19, P. 469-518.
11. Todorovski, L. Using equation discovery to revise an Earth ecosystem model of the carbon net production / L. Todorovski et al. // *Ecol. Model*. 2003. Vol. 170. P. 141-154.
12. Кирста, Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // *Мир науки, культуры, образования*. 2011. № 3 (28). С. 330-337.
13. Кирста, Ю.Б. Типизация ландшафтов для оценки речного стока в Алтае-Саянской горной стране / Ю.Б. Кирста, Л.Ф. Лубенец, Д.В. Черных // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2011. №2(8). С. 51-56.
14. Черных, Д.В. Ландшафты Алтая (Алтайский край и Республика Алтай). Карта / Д.В. Черных, Г.С. Самойлова. – Новосибирск: ФГУП Новосибирская картографическая фабрика, 2011.
15. Цимбалей, Ю.М. Ландшафтная карта Алтайского края. Карты / Ю.М. Цимбалей с использованием материалов Л.Н. Пурдика, В.И. Булатова, А.А. Ковановой при участии Д.В. Черных, С.Б. Смирнова и О.М. Винокуровой // *Фондовые материалы ИВЭП СО РАН*, 2011.
16. Кирста, Ю.Б. Прогноз климата и агроклиматического потенциала Сибирского федерального округа до 2020 года // *Проблемы региональной экологии*. 2011. №3. С. 22-30.
17. Агальцева, Н.А. Оценка гидрологических характеристик в бассейне Амударьи в условиях изменения климата / Н.А. Агальцева, М.В. Болгов, Т.Ю. Спекторман и др. // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 10. С. 58-69.
18. Селегей, В.В. Телецкое озеро / В.В. Селегей, Т.С. Селегей. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. 143 с.

IMITATING MATHEMATICAL MODEL OF MIDDLE AND SMALL RIVERS DRAIN FOR MOUNTAIN TERRITORIES

© 2012 Yu.B. Kirsta, A.V. Puzanov, O.V. Lovtskaya, L.F. Lubenets, Ya.E. Kuznyak, A.Yu. Pakhotnova

Institute of Water and Ecological Problems SB RAS, Barnaul

The method of creation the imitating mathematical models of water drain for mountain rivers is offered. On an example of middle and small rivers at Altai-Sayany highland the universal model of seasonal and interannual dynamics of a drain is received. For calculation the seasonal dynamics of a drain four hydrological periods are allocated: winter low water (XII-III months), spring-and-summer high water (IV-VI), summer (VII-VIII) and autumn (IX-XI) low waters. The model is applicable for the voluntary river pools, including where it is insufficient or there is no hydrometeorological information. Monthly dynamics of air temperatures generalized on all highland and precipitation normalized on the corresponding mean annual values is used. Cartographical information on relief and landscape structure of pools is used. The convenient criterion for estimation the adequacy of mathematical models is offered.

Key words: water drain, mountain rivers, modeling, high water, low water, Altai, Sayany Mountains

Yuriy Kirsta, Doctor of Biology, Main Research Fellow. E-mail: kirsta@iwep.ru
Alexander Puzanov, Doctor of Biology, Deputy Directora. E-mail: puzanov@iwep.ru
Olga Lovtskaya, Senior research Fellow. E-mail: lov@iwep.ru
Liliya Lubenets, Candidate of Geography, Research Fellow. E-mail: lilia@iwep.ru
Yana Kuznyak, Post-graduate Student. E-mail: kuznyak@iwep.ru
Anna Pakhotnova, Leading Engineer. E-mail: pakhotnova@iwep.ru