

LONG-TERM FORECASTING METHODOLOGY FOR WATER AND HYDROCHEMICAL RUNOFF OF MOUNTAIN RIVERS

Yury B. Kirsta¹, Alexander V. Puzanov²

¹Institute for Water and Environmental Problems,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

²Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Abstract

We propose the method of system-analytical modeling in combination with GIS to construct prognostic simulation models of complex natural systems. The structure and parameters of models are determined via the inverse problem solution for system of equations by optimization technique. Using mid-size and small rivers of Altai-Sayan mountain country as a case study, we have developed the complex of universal high quality models for spatial generalization of air temperature and precipitation, and calculating the seasonal and long-term dynamics of water runoff and hydrochemical runoff of rivers.

Keywords: system-analytical modeling, river runoff, hydrochemical runoff, mountain rivers, Altai, Sayan

МЕТОДОЛОГИЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ВОДНОГО И ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СТОКОВ ГОРНЫХ РЕК

Кирста Ю.Б.⁽¹⁾⁽²⁾, Пузанов А.В.⁽¹⁾

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул

² Алтайский государственный политехнический университет, г. Барнаул

Предлагается совмещенный с ГИС метод системно-аналитического моделирования для создания прогнозных имитационных моделей сложноорганизованных природных систем. Структура и параметры моделей определяются путем решения обратной задачи для систем уравнений оптимизационными методами. На примере 34 средних и малых рек Алтае-Саянской горной страны разработан комплекс универсальных моделей высокого качества: пространственного обобщения температур воздуха и осадков, расчета сезонной и межгодовой динамики водного и гидрохимического стоков рек.

Ключевые слова: системно-аналитическое моделирование, речной сток, гидрохимический сток, горные реки, Алтай, Саяны

Введение. Прогноз водного и гидрохимического стоков рек является важнейшей составляющей мониторинга водных ресурсов. Для прогноза стоков разработаны различные методы, в том числе учитывающие физико-географические, гидрографические и гидрохимические особенности речных бассейнов. Серьезную проблему здесь представляют горные территории, имеющие сложную орографию и пеструю пространственно-временную структуру климатических полей.

Современные динамические модели водного и/или гидрохимического стоков рек как правило объединяются в одно целое с ГИС-средствами. ГИС используются для учета пространственно распределенных входных данных, визуализации результатов расчетов и других целей. Обычно модели основаны на дифференциальных уравнениях гидродинамики и математической физики, дополняемых имитационными зависимостями [1, 2]. Дифференциальные уравнения требуют подробной 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. В условиях гор подобная информация практически отсутствует, что значительно снижает прогнозную ценность таких моделей.

Метод системно-аналитического моделирования. Нами предлагается метод системно-аналитического моделирования (САМ), совмещенный с ГИС и обеспечивающий построение эффективных прогнозных моделей водного и гидрохимического стоков горных рек [3–6]. Основой методологии САМ является определение структуры и параметров имитационных моделей сложноорганизованных природных систем путем решения обратной математической задачи оптимизационными методами. Модели представляют собой системы балансовых уравнений, решаемых в программной среде MATLAB, и дают проверяемое адекватное описание основных физических, гидрологических и гидрохимических процессов, формирующих указанные стоки. Эти уравнения обеспечивают значительно меньшую дисперсию расхождений между прогнозными и фактическими значениями водного и гидрохимического стоков по сравнению с прогнозом по их среднегодовым значениям.

В нашем случае САМ используется для поиска и количественной характеристики функциональных связей водного и гидрохимического стоков с метеорологическими факторами, морфометрией и ландшафтной структурой речных бассейнов. Имитационные модели водного и гидрохимического стоков строятся из алгебраических уравнений, поскольку, как указано выше, применение дифференциальных уравнений для описания гидрологических и гидрохимических процессов в условиях гор крайне затруднительно. Определение характера функциональных связей между процессами и факторами производится через гидрологически и гидрохимически обоснованный подбор и корректировку системы уравнений для минимизации расхождений (квадратичной невязки) между рассчитываемыми и наблюдаемыми динамическими характеристиками. Использование в качестве левых частей уравнений наблюдаемых значений

водного или гидрохимического стока позволяет через решение обратной задачи найти параметры уравнений и оценить квадратичную невязку для тестируемого варианта модели. Модель считается построенной, когда найдена такая система уравнений, которая обеспечивает наименьшее значение невязки. В среде программирования MATLAB нами создан комплекс программ, обеспечивающий выбраковку недостоверных экспериментальных данных и идентификацию более 100 параметров проверяемых моделей через оптимизационное решение систем из 1500 алгебраических уравнений.

В САМ также отсутствует первоначальная фиксация формы искомых зависимостей от факторов среды в ходе решения обратной задачи. Отметим, что в случае дифференциальных уравнений эта форма жестко фиксирована самим выбором тех или иных уравнений. С этой целью нами применяется пробная функция H , задаваемая выражением:

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

где $X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2$ – параметры, определяемые в процессе решения обратной задачи; X – какая-либо переменная модели. Функция H является непрерывной кусочно-линейной функцией из трех произвольных линейных фрагментов и позволяет аппроксимировать широкий спектр различных зависимостей между переменными и факторами среды путем изменения значений своих параметров (рис. 1).

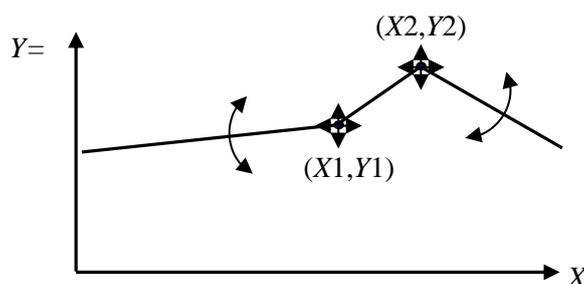


Рис. 1. Непрерывная кусочно-линейная функция $Y = H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X)$ из трех линейных фрагментов с произвольно меняемыми параметрами (см. уравнение (1)).

Модели требуют проверки их адекватности. Нами предложен удобный универсальный критерий, позволяющий оценивать адекватность любых расчетных методов и моделей путем сравнения рассчитанных и наблюдаемых значений характеристики [7]:

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

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

Согласно (2), критерий A представляет собой погрешность модели, нормированную на стандартное отклонение данных наблюдений. Интервал значений $A=0 \div 0.71$ характеризует различную степень адекватности/идентичности расчетных и наблюдаемых значений переменной с их наилучшим совпадением при $A \sim 0$. Критерий A подобен известным показателям качества моделей: RSR (RMSE-Standard deviation Ratio [8, 9]) и NSE (Nash-Sutcliffe model Efficiency coefficient – коэффициент Нэша–Сатклиффа [9]), с которыми связан зависимостями $RSR = A\sqrt{2}$ и $NSE = 1 - RSR^2 = 1 - 2A^2$.

В САМ рассчитывается также чувствительность моделей к вариациям входных факторов, выраженная как вклад конкретного фактора в дисперсию наблюдаемых значений водного или гидрохимического стока [10]. Чувствительность является важным показателем, который необходим для эффективного управления водными ресурсам. По критерию A и чувствительности осуществляется полный компонентный анализ дисперсии невязки моделей (дисперсии

разностей между рассчитанными и наблюдаемыми значениями выходных переменных). Такой анализ позволяет адекватно рассчитать критерии RSR и NSE и оценить качество прогноза.

Исходные материалы. Исследования выполнены на примере Алтае-Саянской горной страны, являющейся частью мирового водораздела между гумидной областью Северного Ледовитого океана и аридной бессточной областью Центральной Азии. Для всех рек страны наибольший водный сток (до 80-90% годового) отвечает теплому периоду года. Режим водного стока зависит, в основном, от таяния снега весной и количества осадков летом и осенью. За счет таяния снега обычно формируется более 50% годового стока.

САМ водного и гидрохимического стоков выполнялось для 34 бассейнов средних и малых рек указанной страны. Для учета ландшафтной структуры бассейнов выполнена типизация ландшафтных выделов, отражающая условия формирования водного и гидрохимического речных стоков, в том числе высотно-поясную и структурно-ярусную неоднородность территории. Нами выделено 12 типологических групп геосистем и отдельно 13-я для аквальных ландшафтов, имеющих незначительную площадь [11]. Для характеристики гидрохимического стока были выбраны его следующие компоненты: три минеральные формы азота NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , фосфаты PO_4^{3-} , общее растворенное железо, минерализация вод, взвешенные вещества. Годовая и межгодовая динамика водного и гидрохимического стоков рассчитывалась для 1951–2003 гг. по 4 гидрологическим периодам/сезонам: 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).

Разработка моделей осуществлялась по данным Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды о водном (~5000 значений) и гидрохимическом (~10000) стоках, осадках и температурах воздуха (11 реперных метеостанций). Температуры воздуха и осадки характеризовались нами через доли/проценты от их среднемноголетних месячных значений [7]. Помимо указанных данных использовалась картографическая информация о рельефе и ландшафтной структуре бассейнов, в том числе площадь и средняя высота каждого ландшафта в каждом бассейне, площади пашни, уклоны бассейнов и высоты их замыкающих створов, длины речных русел (от истока до створа). Весь картографический материал обрабатывался в программной среде ArcGIS 9.2 с модулем 3D Analyst.

Результаты моделирования. Нами разработан комплекс универсальных балансовых моделей сезонной и многолетней динамики водного и гидрохимического стоков для средних и малых рек страны. Комплекс включает климатическую модель, модель водного стока и семь моделей гидрохимического стока (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , ионов, общего растворенного железа, взвешенного вещества). Полученные для всех моделей стоков критерии $\text{RSR} < 0.60$ и $\text{NSE} > 0.65$ означают их хорошее и очень хорошее качество (см., например, [10]).

Климатическая модель отражает единообразие внутригодовой и многолетней динамики месячных осадков и среднемесячных температур воздуха по всей территории Алтае-Саянской горной страны при условии нормировки осадков на их среднемноголетнее значение за июль «in situ», а температур – на их среднемноголетнее значение за январь (для X-IV месяцев) и июль (для V-IX) «in situ». Такие пространственно обобщенные нормированные характеристики уже не зависели от координат или высоты расположения характеризуемых участков, были одинаковы для всех речных бассейнов и, поэтому, применялись в дальнейших расчетах как адекватные площадные характеристики метеорологических полей указанной страны.

Модель водного стока представлена балансовым уравнением, учитывающим осадки, температуры воздуха, площадь и высоту ландшафтов:

$$Q^i = \sum_k \{a_k S_k^i P_1 H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, T_1) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, h_k^i)\} + \sum_k \{b_k S_k^i P_2 H(c_7, c_7, 1, 1, c_8, c_9, T_2) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, h_k^i)\} + c_{10} \quad (3)$$

где Q^i – нормированный на среднемноголетнее значение сезонного стока для замыкающего створа бассейна i , $i=1, 2, \dots, 34$; первое и второе слагаемые уравнения отвечают вкладам предшествующего и текущего гидрологического сезона 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 -го ландшафта, $k=1-13$; S_k^i, h_k^i – относительная площадь и высота k -го ландшафта в бассейне i ; c_1-c_9 – параметры, отражающие влияние температур T_1, T_2 и высоты h_k^i ; P_1, P_2 – нормированные месячные осадки в среднем за сезон; T_1, T_2 – отклонения нормированных температур от 1 в среднем за сезон; c_{10} – параметр для постоянного пополнения ($c_{10}>0$) или потерь ($c_{10}<0$) стока в грунтовые воды и воды зон трещиноватых пород (подземный сток); H – кусочно-линейная функция (1). Все параметры уравнения (3) определяются с помощью оптимизационных методов пакета программ MATLAB по имеющимся ~1300 наблюдаемым значениям стока за соответствующий гидрологический сезон.

Модели гидрохимического стока представлены двумя уравнениями, учитывающими рассчитанные по (3) водные стоки, осадки, поперечный уклон бассейна, площадь пашни:

для 1-го гидрологического сезона (зимняя межень) –

$$HR^i = \sum_k \{a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i)\} + b q^i + d S^i Q^i, \quad (4a)$$

для остальных сезонов –

$$HR^i = \sum_k \{a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i)\} + b q^i + d \sqrt{S^i} Q^i, \quad (4б)$$

где HR^i – сток соответствующего компонента гидрохимического стока; P – среднесезонные нормированные месячные осадки (за предыдущие IX-XI мес. для 1-го сезона или за IV-VI, VII-VIII, IX-XI мес. для 2, 3, 4-го сезонов); Q_k^i – расчетный водный сток с k -го ландшафта бассейна i , $k=1-13$, $i=1-34$; a_k – параметры, соответствующие постоянной сезонной концентрации вещества в расчетном водном стоке k -го ландшафта; K^i – средний поперечный уклон бассейна i , рассчитываемый как средний тангенс угла наклона склонов относительно горизонтали [6]; c_1-c_6 – параметры, отражающие влияние на сток вещества осадков P и уклона K^i ; b – параметр, характеризующий сезонную концентрацию соответствующего вещества в расчетном приходящем (или уходящем) сезонном подземном водном стоке q^i бассейна i ; S^i – относительная площадь пахотных земель в бассейне i ; d – параметр, характеризующий зависимость концентрации вещества от площади S^i в расчетном водном стоке Q^i бассейна i .

Каждое исследуемое вещество в конкретном сезоне характеризуется своими значениями параметров. Все параметры найдены путем решения обратной задачи для систем (4а) или (4б) из 1200–1500 уравнений, характеризующих сезонные стоки исследуемого вещества за отдельные годы с каждого речного бассейна. В итоге уравнения (4а) и (4б) позволяют рассчитывать стоки вещества с отдельных ландшафтов и пашни, его общий сток с речного бассейна и концентрацию этого вещества в водном стоке реки.

Заключение. По моделям водного и гидрохимического стоков легко выполняется их прогноз на следующий гидрологический сезон при подстановке в (3), (4а), (4б) среднесезонных значений метеорологических факторов этого сезона вместо фактических. Тем самым стоки предсказываются за 3–4 месяца вперед, причем с вдвое уменьшенной дисперсией невязки по сравнению с тривиальным прогнозом по их среднесезонному значению.

Помимо экологического и водно-ресурсного мониторинга прогнозы важны для управления рисками. Например, прогноз водного стока необходим для регуляции попусков воды из водохранилищ горных ГЭС в период весенне-летнего половодья, когда в водохранилища поступает основной объем годового стока. Объединенная с прогнозом оценка чувствительности водного и гидрохимического стоков к изменениям факторов среды (ландшафтной структуре, площадям пашни и др. [12]) может использоваться для практической регуляции качества речных вод через соответствующее управление землепользованием.

Разработанный комплекс моделей позволяет количественно характеризовать и прогнозировать сезонную и многолетнюю динамику водного режима и режима качества речных вод для произвольно выбранного речного бассейна Алтае-Саянской горной страны. Для идентификации моделей требуются цифровые картографические данные о ландшафтной структуре бассейна, данные о температурах воздуха и осадках, а также 1–2 года наблюдений за характеризуемым стоком. Модели могут быть применены к любой горной территории после ее ландшафтной типизации с новой оценкой параметров через решение обратной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии: Учебное пособие для студентов учреждений высш. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 304 с.
- [2] Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрологии. СПб: Наука, 2011. 1158 с.
- [3] 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. Vol. 191. P. 315–330.
- [4] 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.
- [5] Кирста Ю.Б., Пузанов А.В., Ловцкая О.В., Лубенец Л.Ф., Кузник Я.Э., Пахотнова А.Ю. Имитационная математическая модель стока средних и малых рек для горных территорий // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2012. Т.14, №1(9). С. 2334-2342.
- [6] Кирста Ю.Б., Пузанов А.В. Моделирование гидрохимического стока горных рек: 1. Модель стока фосфатов // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2016. №6 (140). С. 78-84.
- [7] Кирста Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // *Мир науки, культуры, образования*. 2011. № 3 (28). С. 330-337.
- [8] Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation // *Transactions of the ASABE*. 2007. Vol. 50(3). P. 885-900.
- [9] 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 International Conference on Water Resources and Environment Research, ICWRER 2013*. Koblenz, Germany, June 3-7, 2013. P. 428-523.
- [10] Кирста Ю.Б. Моделирование гидрохимического стока горных рек: 2. Оценка качества модели стока фосфатов // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2016. №6 (140). С. 85-91.
- [11] 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). С. 51-56.
- [12] Kirsta Yu.B., Puzanov A.V. System-analytical modeling of water quality for mountain river runoff // *Водный форум БРИКС: Международная научно-практическая конференция, Москва, 29-30 сент. 2016 г.* http://bricswater.org/data/2016/10/20/1107835601/Секция%204_%20Целый.pdf (дата обращения 9.06.2017).