

УДК [550.46+556.51]: 004.94

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СТОКА ГОРНЫХ РЕК К ФАКТОРАМ СРЕДЫ

© 2017 Ю.Б. Кирста^{1,2}, А.В. Пузанов¹

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

² Алтайский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 16.05.2017

На примере 34 малых и средних рек Алтае-Саянской горной страны с помощью системно-аналитического моделирования разработаны адекватные балансовые модели для 7 компонент гидрохимического стока: трех форм минерального азота (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+), фосфатов (PO_4^{3-}), ионов, общего растворенного железа и взвешенного вещества. Расчет сезонной и многолетней динамики гидрохимического стока ведется по 4 выделенным гидрологическим периодам года. Оценена чувствительность моделей к вариациям их входных факторов. Чувствительность выражается как вклад отдельного фактора в дисперсию значений гидрохимического стока. Получена количественная оценка чувствительности гидрохимического стока по каждой из рассмотренных 7 компонент для следующих факторов: ландшафтной структуры речных бассейнов, крутизны склонов бассейнов, осадков, пахотных площадей.

Ключевые слова: системно-аналитическое моделирование, горная река, гидрохимический сток, чувствительность моделей, Алтай, Саяны

Задачи управления водными ресурсами в условиях современного меняющегося климата приобретают все большее значение [1]. Их успешное решение зависит от создания адекватных математических моделей, дающих количественную оценку гидрологических и гидрохимических процессов в речных бассейнах. Модели должны отражать влияние на эти процессы природных и антропогенных факторов, как во времени, так и в пространстве [2, 3]. Сложная орографическая структура горных территорий и пространственно-временная пестрота климатических полей [4], очевидно, значительно усложняют указанные задачи.

Гидрохимический сток представляет особый интерес в управлении качеством водных ресурсов. При его оценке обычно учитываются морфометрические и гидрографические особенности водосборных бассейнов [5–7]. Применение ГИС-технологий дает возможность в большей или меньшей степени автоматизировать необходимые вычисления. Например, ГИС-технологии используются для расчета пространственного распределения таких факторов как осадков, температуры, влажности воздуха и др., которые важны для оценки гидрохимического стока, но наблюдаются только на отдельных участках территории. В случае гор именно расчет пространственного распределения метеорологических показателей дает основной вклад в погрешность расчетов по любым моделям водного и гидрохимического стоков.

Для построения адекватных математических моделей гидрохимических процессов нами используется системно-аналитическое моделирование (САМ). Последнее базируется на системном подходе к анализу сложноорганизованных природных

систем и решении обратной математической задачи для уравнений модели с целью определения как форм связей между переменными, так и значений параметров [8, 9]. С помощью САМ построены балансовые модели водного и гидрохимического стоков [10–13], высокое качество/адекватность которых обусловлено полученным для них показателем $\text{RSR} < 0,60$, определяемым как отношение среднеквадратической ошибки расчетов переменной к стандартному отклонению ее наблюдаемых значений [14, 15], и критерием Нэша–Сатклиффа $\text{NSE} = (1 - \text{RSR}^2) > 0,65$ [15].

При моделировании и управлении на этой основе гидрохимическим стоком большое значение придается его чувствительности к вариациям влияющих на него факторов. Обзоры различных методов оценки чувствительности можно найти, например, в публикациях [16–18]. В предлагаемой работе оценена чувствительность стоков минеральных соединений азота (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+), фосфатов (PO_4^{3-}), ионов, общего растворенного железа и взвешенного вещества по разработанным для рек Алтае-Саянской горной страны адекватным балансовым моделям. Для этого разработан простой метод количественной оценки чувствительности к естественным вариациям факторов среды [11].

Исходные материалы. Для исследований нами выбрана Алтае-Саянская горная страна ($50\text{--}56^\circ$ с.ш. и $83\text{--}100^\circ$ в.д.). На ее территорию легко проникают атлантические циклоны. Климат здесь резко континентален, с холодными зимами и холодным летом [4]. Согласно наблюдениям редких метеостанций годовое количество осадков значительно варьирует от 2500 мм за год на северных склонах при высоте более 3000 м до 200 мм у их подножия. Страна представляет интерес для анализа условий формирования гидрохимического стока из-за наблюдаемой дестабилизации климата с возрастанием числа критических гидрометеорологических явлений. Дестабилизация подтверждена

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

Пузанов Александр Васильевич, доктор биологических наук, директор. E-mail: puzanov@iwep.ru

выполненной кластеризацией континентальных метеорологических полей [19]. Анализ межгодовой динамики температур воздуха и осадков позволил выделить области, имеющие наибольшие отклонения от эволюционно выработанных статистических закономерностей данной динамики. В Евразии были обнаружены 2 типа пространственных кластеров – с относительно стабильным и стабильным климатом, соответственно (рис. 1). Первый тип

сформирован в результате стабилизирующего влияния природной растительности, а второй – воздействия антропогенной деятельности. Рассматриваемая Алтае-Саянская горная страна попадает в зону климатической дестабилизации Евразии, что требует построения высокоадекватных моделей водного и гидрохимического стоков, которые смогли бы обеспечить эффективное управление водными ресурсами этой территории.

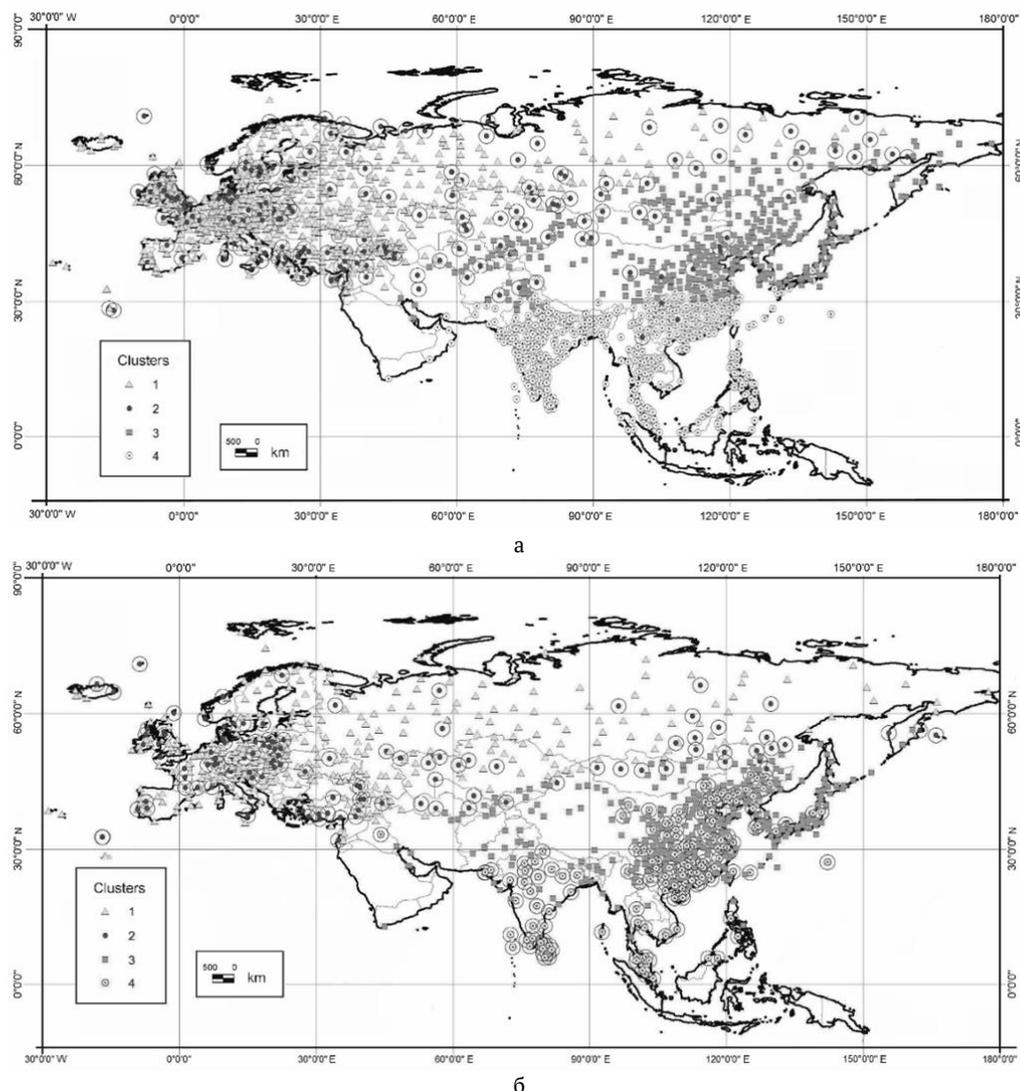


Рис. 1. Территории дестабилизированного климата Евразии (см. метеостанции, отмеченные большой окружностью), выделенные путем пространственной кластеризации наблюдаемых осадков (а) и температур воздуха (б) [19].

В ходе САМ гидрохимического стока использованы около 20000 тысяч наблюдений за сезонной и многолетней динамикой его компонентов (трех форм минерального азота NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , фосфатов PO_4^{3-} , ионов, общего растворенного железа и взвешенного вещества) по 34 речным бассейнам Алтае-Саянской горной страны в 1951–2003 гг. Используются также значения месячных осадков и среднемесячных температур воздуха по территории за указанный период, данные о ландшафтной структуре бассейнов, площади и высоты расположения ландшафтов (13 групп геосистем), площади пашни и другие показатели [12]. Все картографические

характеристики рассчитывались в программной среде ArcGIS 9.2. Морфометрия ландшафтов определялась по TIN-моделям, построенных с помощью 3D Analyst extension of ArcGIS. В целом площади анализируемых водосборных бассейнов составляли от 177 до 21000 км², что позволяет отнести тестируемые модели к универсальным.

С учетом внутригодовых особенностей речного стока на рассматриваемой территории 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). Наблюдения за гидрохимическим стоком были нерегулярны, и их данных усреднялись по сезону каждого года для каждого речного бассейна.

Тестируемые модели гидрохимического стока. Тестируемые в настоящей работе модели гидрохимического стока характеризуют последний как функцию следующих факторов: осадков и температур воздуха (влияющих на расчет водного стока [10]), ландшафтной структуры территории, крутизны склонов речных бассейнов, имеющих

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

где $X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2$ – параметры, определяемые в ходе САМ путем решения обратной задачи; X – какая-либо переменная моделей.

Расчет каждого из 7 рассмотренных компонентов гидрохимического стока осуществляется по уравнениям [12]:

$$\begin{aligned} \text{Сток} = \\ = \sum_k \{ a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i) \} + \\ + b q^i + d S^i Q^i, \end{aligned} \quad (2a)$$

для второго, третьего и четвертого гидрологических сезонов

$$\begin{aligned} \text{Сток} = \\ \sum_k \{ a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i) \} + \\ + b q^i + d \sqrt{S^i} Q^i, \end{aligned} \quad (2b)$$

где P – обобщенные по всей территории нормированные осадки [10] за IX-XI месяцы предшествующего года для 1-го сезона или за IV-VI, VII-VIII, IX-XI месяцы для 2, 3, 4-го сезонов соответственно; a_k – параметры, отвечающие постоянной среднесезонной концентрации вещества в расчетном водном стоке Q_k^i , формируемом k -й группой геосистем за счет осадков P , $k=1-13$; b – параметр, сопоставляемый с постоянной среднесезонной концентрацией вещества в расчетном приходящем (или уходящем) среднесезонном подземном водном стоке q^i , который формируется в бассейне i почвенно-грунтовыми водами и водами зон трещиноватых пород; K^i – средний поперечный уклон (крутизна склонов) бассейна i , рассчитываемый по картографическим данным как тангенс угла наклона склонов относительно горизонтали [12]; H – кусочно-линейная функция (1); c_1, c_2, \dots, c_6 – параметры, отражающие влияние на гидрохимический сток осадков P и уклона K^i ; d – параметр, характеризующий добавку к концентрации вещества от каждого процента площади S^i в расчетном водном стоке Q^i ; S^i – относительная площадь пахотных земель (в процентах от площади бассейна i).

Все параметры уравнений (1) и (2) определены в ходе САМ через решение обратной задачи по ежегодно наблюдаемым среднесезонным стокам 7 рассмотренных компонентов, найденным как $Q^i C^i$. Величина Q^i характеризует среднесезонный водный сток для замыкающего створа бассейна с номером $i=1 \div 34$ в текущем году и рассчитывается по

площадей пашни. При этом осадки и температуры выражаются в процентах/долях от их среднесезонных значений за определенные месяцы, что позволило исключить их зависимость от высоты и обобщить/усреднить по всей территории Алтае-Саянской горной страны [20]. Для описания зависимости гидрохимических процессов от факторов среды в САМ используется кусочно-линейная функция H , состоящая из трех линейных фрагментов:

подмодели водного стока [10], а C^i представляет собой наблюдаемые концентрации вещества в речном стоке.

Оценка чувствительности моделей к факторам среды. Оценка чувствительности разработанных моделей основывается на предложенном универсальном критерии, характеризующим степень адекватности расчетных методов и моделей [11, 20]:

$$A = S_{\text{разн}} / \sqrt{2} S_{\text{набл}}, \quad (3)$$

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

Согласно (3) 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 $A=0$. Критерий A подобен показателю качества моделей RSR и критерию Нэша–Сатклиффа NSE, с которыми связан зависимостями $RSR=A\sqrt{2}$, $NSE=1-RSR^2=1-2A^2$.

Чувствительность FS рассчитывается на основе A по формуле [11]:

$$\begin{aligned} FS = (A')^2 - (A)^2 = \frac{(S'_{\text{разн}})^2 - (S_{\text{разн}})^2}{2(S_{\text{набл}})^2} = \\ = \frac{2(S_{\text{факт}})^2}{2(S_{\text{набл}})^2} = \frac{(S_{\text{факт}})^2}{(S_{\text{набл}})^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где FS – чувствительность модели к естественным вариациям какого-либо входного фактора модели; A – критерий (3); A' – значение A , получаемое при подстановке перепутанных случайным образом наблюдаемых значений выбранного входного фактора (имеющих, очевидно, прежнее статистическое распределение и дисперсию); $(S_{\text{разн}})^2$ – дисперсия для разности расчетного и наблюдаемого значений выходной переменной (гидрохимического стока),

рассчитываемая по уравнениям (2) с использованием в них наблюдаемых значений фактора; $(S'_{\text{разн}})^2$ – эта же дисперсия при подстановке в (2) случайно перепутанных значений фактора; $(S_{\text{факт}})^2$ – вклад естественных вариаций входного фактора в дисперсию выходной переменной (рассчитываемого стока); $(S_{\text{набл}})^2$ – дисперсия наблюдаемых значений выходной переменной, используемая для нормировки FS .

В уравнении (4) 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 выражения (4)

[11]. Тем самым FS оценивает чувствительность модели непосредственно к естественным вариациям входного фактора, исключая ошибки его наблюдений.

Учитывая высокое качество/адекватность разработанных моделей с показателем $RSR < 0.60$ и критерием Нэша–Сатклиффа $NSE > 0.65$ [14, 15], чувствительность FS характеризует также **реальную значимость факторов среды** для рассмотренных компонентов гидрохимического стока. Поскольку чувствительность FS согласно (4) выражается в долях от $(S_{\text{набл}})^2$, то ее можно выражать в процентах, умножая на 100. Выполненные для нее оценки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Чувствительность моделей гидрохимического стока к вариациям факторов среды

Фактор среды	Чувствительность FS компонентов гидрохимического стока для 1/ 2/ 3/ 4-го гидрологических сезонов, % ¹						
	NO_2^-	NO_3^-	NH_4^+	PO_4^{3-}	Ионы	Fe	Взвешенное вещество
ландшафтная структура речных бассейнов ²	52	22	41	>100	8	12	98
	9	19	3	52	4	33	13
	88	46	55	55	7	64	21
	19	31	9	48	6	69	12
крутизна склонов бассейнов	6	14	9	15	18	10	5
	5	9	2	14	5	4	3
	2	0.5	9	5	7	6	0.8
	10	15	19	7	2	9	2
осадки	5	1	3	9	2	11	5
	0.3	1	2	0	1	0	2
	3	0.4	6	5	6	6	2
	5	1	11	16	6	8	5
площадь пахотных земель ³	4	2	0.1	4	12	0	1
	5	0	5	16	33	21	20
	0.3	0	0	16	7	0	9
	3	0	0	16	9	0	4

Примечание: ¹ - оценивается по уравнению (4) и выражается в процентах от дисперсии $(S_{\text{набл}})^2$ у наблюдаемых значений соответствующего компонента гидрохимического стока; ² - значения площадей ландшафтов перепутывались согласно (4) случайным образом в каждом из 34 речных бассейнов; ³ - значения площадей пахотных земель перепутывались согласно (4) случайным образом по всем бассейнам.

Из значений чувствительности моделей к факторам среды в табл. 1 видно, что основное влияние на гидрохимический сток оказывает ландшафтная структура речных бассейнов, в соответствии с которой формируются водные стоки Q_k с отдельных ландшафтов. Меньшую роль играет крутизна склонов бассейнов. Согласно табл. 1 гидрохимический сток зависит от осадков в достаточно слабой степени. Влияние осадков непосредственно на вынос растворимых минеральных соединений азота учитывается в уравнениях (2) через ландшафтные водные стоки Q_k , к которым модели чувствительны в наибольшей степени. Собственно чувствительность FS к осадками в табл. 1 характеризует, видимо, влияние уже содержащихся в них соответствующих минеральных соединений [21]. Низкая чувствительность к площадям пашни объясняется незначительностью таких площадей в рассмотренных речных бассейнах Алтае-Саянской горной страны.

Выводы: предложен достаточно простой метод для оценки чувствительности математических моделей природных процессов к естественным вариациям факторов среды. Он основан на статистически случайном перепутывании данных в рядах наблюдений за конкретным входным фактором и последующей подстановкой в модель его перепутанных значений. Метод не требует каких-либо специальных математических процедур и может быть применен к любым математическим моделям, построение которых основано на рядах наблюдений за исследуемым процессом. Метод позволил охарактеризовать чувствительность стока трех форм минерального азота (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+), фосфатов (PO_4^{3-}), ионов, общего растворенного железа и взвешенного вещества для рек Алтае-Саянской горной страны. Он обеспечивает эффективное применение разработанных моделей для управления качеством водных ресурсов страны. При дополнительной идентификации (уточнении значений параметров) моделей они могут использоваться для других горных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Deng, X. Water use efficiency and integrated water resource management for river basin / X. Deng, R.B. Singh, J. Liu, B. Güneralp // Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C. 2015. No 89-90. P. 1-2.
- Loucks, D.P. Water Resources Systems. Planning and Management. An Introduction to Methods, Models and Applications / D.P. Loucks, E. van Beek with contributions from J.R. Stedinger, J.P.M. Dijkman, M.T. Villars. – Paris: UNESCO Publishing, 2005. 680 p.
- Singh, M. Landscape Ecology and Water Management / M. Singh, R.B. Singh, M.I. Hasan // Proceedings of IGU Rohtak Conference, Vol. 2. – Tokyo: Springer, 2014. P. 43-50.
- Севастьянов, В.В. Климат высокогорных районов Алтая и Саян. – Томск: изд-во Томского университета, 1998. 201 с.
- Jarrett, R.D. Hydrologic and hydraulic research in mountain rivers // Water Resour. Bull. 1990. V. 26. P. 419-429.
- Koren, V. Hydrology laboratory research modeling system (HL-RMS) of the US National Weather Service / V. Koren, S. Reed, M. Smith et al. // J. Hydrol. 2004. V. 291. P. 297-318.
- Sene, K. Flood Warning, Forecasting and Emergency Response. – Berlin, London: Springer, 2008. 303p.
- 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.
- Кирста, Ю.Б. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем / Ю.Б. Кирста, Б.Ю. Кирста. – Барнаул: изд-во Алт. гос. ун-та, 2014. 283 с.
- Кирста, Ю.Б. Имитационная математическая модель стока средних и малых рек для горных территорий / Ю.Б. Кирста, А.В. Пузанов, О.В. Ловцкая и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. №1(9). С. 2334-2342.
- Кирста, Ю.Б. Чувствительность моделей речного стока к факторам среды и ее количественная оценка // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. №6. С. 97-103.
- Кирста, Ю.Б. Моделирование гидрохимического стока горных рек: 1. Сток минеральных соединений азота / Ю.Б. Кирста, А.В. Пузанов // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т.18. №2(1). С. 96-100.
- Kirsta, Yu.B. System-analytical modeling of water quality for mountain river runoff / Yu.B. Kirsta, A.V. Puzanov // Водный форум БРИКС: Междунар. науч.-практ. конф. – М., 29-30 сент. 2016 г. – http://bricswater.org/data/2016/10/20/1107835601/%D0%A1%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%20_%20%D0%A6%D0%B5%D0%BB%D1%8B%D0%B9.pdf
- Moriasi, D.N. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation / D.N. Moriasi, J.G. Arnold, M.W. Van Liew et al. // Transactions of the ASABE. 2007. V. 50(3). P. 885-900.
- Koch, M. SWAT-modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper blue Nile river basin, Ethiopia / M. Koch, N. Cherie // Proceedings of the 6-th Intern. Conf. on Water Resources and Environment Research, ICWRER 2013. – Koblenz, Germany, June 3-7, 2013. P. 428-523.
- Skahill, B.E. Practice driven and state-of-the-art methods to quantify hydrologic model uncertainty. ERDC/CHL CHETN-IV-87. – Vicksburg, MS, U.S.: Army Engineer Research and Development Center, 2013. 19 p.
- Iooss, B. A review on global sensitivity analysis methods / B. Iooss, P. Lemaitre // In: Uncertainty management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications, C. Meloni and G. Dellino (Eds.). – Springer US, 2015. 264 p.
- Song, X. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications / X. Song, J. Zhang, C. Zhan et al. // Journal of Hydrology. 2015. V. 523. P. 739-757.
- Кирста, Ю.Б. Декомпозиция метеорологических полей Северного полушария Земли: 2. Выделение зон наибольшей дестабилизации климата / Ю.Б. Кирста, Н.Ю. Курепина, О.В. Ловцкая // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 5-1. С. 63-68.
- Кирста, Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // Мир науки, культуры, образования. 2011. №3(28). С. 330-337.
- Савичев, О.Г. Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек / О.Г. Савичев, А.О. Иванов // Известия РАН. Сер. геогр. 2010. №1. С. 63-70.

THE SENSITIVITY OF HYDROCHEMICAL RUNOFF OF MOUNTAIN RIVERS TO ENVIRONMENTAL FACTORS

© 2017 Yu.B. Kirsta^{1,2}, A.V. Puzanov¹

¹Institute for Water and Ecological Problems SB RAS, Barnaul

²Altai State Technical University

The method of system-analytical modeling of complex natural systems is proposed to construct the simulation balance models for hydrochemical runoff of mountain rivers. Basing on the example of 34 mid-size and small rivers of the Altai-Sayan mountain country as a regional case study, we developed the balance models of 7 hydrochemical runoff components: three nitrogen mineral forms (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+), phosphates (PO_4^{3-}), ions, total dissolved iron, and suspended matter. To calculate the seasonal and long-term hydrochemical runoff, four hydrological periods/seasons were specified. The sensitivity of models to variations of their input factors was evaluated. The sensitivity is expressed as a contribution of a particular factor to the variance of hydrochemical runoff values. A quantitative assessment of the hydrochemical runoff sensitivity (for each of 7 components) was obtained for the following factors: landscape structure of river basins, basin lateral slope, precipitation, arable land area.

Key words: system-analytical modeling, mountain river, hydrochemical runoff, model sensitivity, Altai, Sayan