

Раздел 3

ГИДРОЛОГИЯ. КЛИМАТ

Section 3

HYDROLOGY. CLIMATE

УДК [550.46+556.51]: 004.94

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СТОКА
С ГОРНЫХ ЛАНДШАФТОВ**

Ю.Б. Кирста, И.А. Трошкова

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,

E-mail: kirsta@iwep.ru, puzanov@iwep.ru, rtamara@iwep.ru, egorka_iren@mail.ru

Экспериментальные исследования процессов формирования гидрохимических стоков горных рек при всей своей актуальности крайне затруднены. Качество речных вод, активно используемых живущим вдоль рек населением, значительно влияет на здоровье людей и хозяйственную деятельность в целом. На примере 34 речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны с помощью системно-аналитического моделирования разработана универсальная математическая модель сезонной и многолетней динамики гидрохимических стоков с ландшафтов в реки. При расчете ландшафтных стоков (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Fe, минерального и взвешенного веществ) учтены следующие основные факторы среды: месячные осадки, среднемесячные температуры воздуха, площадь, высота ландшафтов и пашен, общие уклоны речных бассейнов, а также рассчитываемые водные стоки. Разработанная модель характеризуется критерием Нэша-Сатклиффа NSE, достигающим 0.7–0.8, что соответствует ее хорошему и очень хорошему качеству. Она может быть легко включена в систему постоянного мониторинга качества речных вод и способна обеспечить целенаправленное проведение мероприятий по поддержанию этого качества на высоком уровне.

Ключевые слова: математическая модель; горные ландшафты; гидрохимический сток; Алтай; Саяны.

DOI: 10.24412/2410-1192-2023-17003

Дата поступления: 14.06.2023. Принята к печати :10.07.2023

Рациональное использование водных ресурсов речных бассейнов требует разработки адекватных математических моделей, количественно характеризующих качество этих ресурсов. Гидрохимический сток с больших и малых водосборов является одной из важнейших характеристик качества грунтовых и поверхностных вод, влияющих на питьевое и хозяйственное водоснабжение населения. Он заметно отличается для разных ландшафтов, так как зависит от протекающих в водосборных бассейнах биогеохимических процессов, ветровой эрозии, атмосферного переноса и выпадения химических веществ, включая океанические соли, а также от антропогенных факторов. Анализ закономерностей формирования гидрохимического стока особенно трудоемок для горных территорий из-за их сложного гидрогеологического

строения, разнообразного почвенно-растительного покрова и больших материальных затрат на экспериментальные исследования таких закономерностей. Поэтому здесь крайне затруднена количественная оценка воздействия на сток разнообразных факторов среды. Решение этой сложной задачи нами выполняется на примере речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны путем разработки его математической модели. Для этого используется системный подход и успешно зарекомендовавший себя метод системно-аналитического моделирования (САМ) с привлечением ГИС-технологий [Kirsta, 2006; Кирста, Кирста, 2014].

Материалы и методы

Территория Алтае-Саянской горной страны, расположенная между 49° и 56° с.ш., 82° и 90° в.д., представляет собой часть мирового водораздела между гумидной областью Северного Ледовитого океана и аридной бессточной областью Центральной Азии. Высоты хребтов горных систем Саян достигают 3000–3500 м, а Алтай – 3500–4500 м. Климат является умеренно континентальным с холодной зимой и теплым летом. На территорию легко проникают атлантические циклоны. Согласно наблюдениям редких метеостанций, годовое количество осадков меняется в широких пределах. Например, северные склоны гор на высотах более 3000 м получают 1200–2500 мм осадков за год, средние части – до 600 мм и нижние – около 200 мм. Для всех рек страны наибольший водный сток наблюдается в теплый период года и составляет до 80–90% годового. Последний формируется более чем на 50% за счет таяния снега.

Для выполнения САМ гидрохимического стока с ландшафтов, взяты 34 бассейна (рис.), для которых ранее была разработана имитационная модель водного стока [Кирста и др., 2012а]. Динамика водного и гидрохимического стоков рассчитывалась по 4 характерным 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).

Для характеристики гидрохимического стока нами были выбраны: три минеральные формы азота (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+), фосфаты (PO_4^{3-}), ионы (минерализация воды), общее растворенное железо (Fe), взвешенное вещество. В каждом выделенном сезоне имелось одно и более экспериментальных значений концентраций веществ (в мг/л).

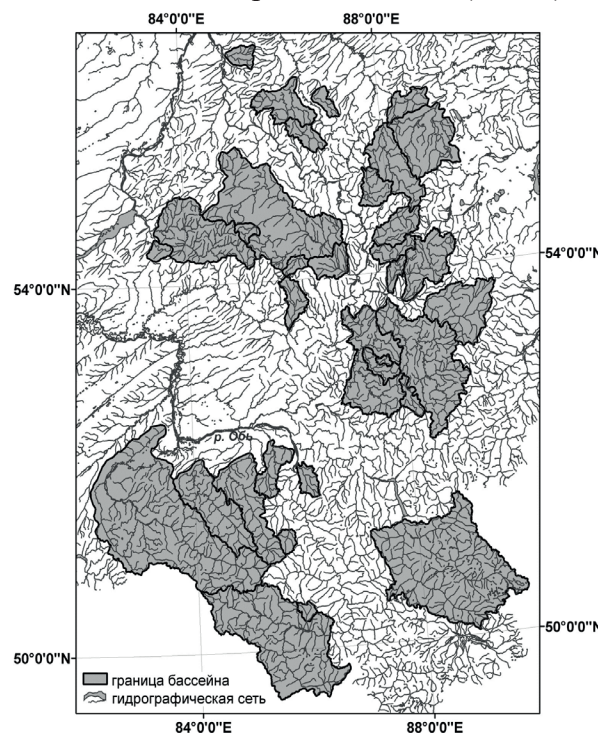


Рис. Карта-схема расположения 34 модельных речных бассейнов

Fig. Schematic map of 34 studied river basins

Измерения осуществлялись государственным Управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. После усреднения данных по сезонам были получены по четыре среднесезонных концентрации для каждого года наблюдений. Экспериментальные значения концентраций делились на среднесезонные для перехода к безразмерным единицам измерения.

Температуры воздуха и осадки также характеризовались через доли/проценты от их среднесезонных месячных значений. Для таких нормированных температур и осадков с помощью разработанного метода обобщения получена единая для Алтае-Саянской горной страны их многолетняя помесечная динамика. Показано, что эта динамика является адекватной площадной характеристикой изменения метеорологических полей всей территории [Кирста и др., 2011].

Для рассматриваемых 34 речных бассейнов выделено 13 типологических групп геосистем (ландшафтов) [Кирста и др., 2011]. По модели водного стока были рассчитаны формируемые ландшафтами вклады в водный сток с каждого бассейна [Кирста и др., 2012а].

Результаты и их обсуждение

САМ основывается на определении структуры и параметров имитационных балансовых моделей сложных природных процессов путем решения оптимизационными методами обратной математической задачи [Кирста, 1986; Kirsta, 2006; Кирста и др., 2012б; Кирста, Кирста, 2014]. Путем последовательной проверки различных

физико-химических непротиворечивых зависимостей, описывающих формирование гидрохимического стока под воздействием факторов среды, определена система уравнений, которая имела наименьшую невязку (сумму квадратов разностей) между рассчитанными и наблюдаемыми концентрациями веществ в речных водных стоках. Построение модели гидрохимического стока выполнено в среде программирования MATLAB.

Для описания нетривиальных зависимостей процессов от факторов среды в САМ применяется универсальная функция H , задаваемая выражением:

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) = \begin{cases} Y1 + Z1 \cdot (X - X1), 5.4 \cdot 8 & X < X1 \\ \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1} (X - X1) + Y1, 5.4 \cdot 8 & \begin{cases} X1 \leq X < X2 \\ X1 \neq X2 \end{cases} \\ Y2 + Z2 \cdot (X - X2), 5.4 \cdot 8 & X \geq X2 \end{cases}, (1)$$

где $X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2$ – подбираемые в САМ параметры; 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.

В результате САМ гидрохимического стока получены универсальные балансовые уравнения, описывающие этот сток [Кирста и др., 2012б; Кирста, Пузанов, 2018]:

для первого гидрологического сезона –

$$\text{Сток} = \sum_k \{a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P) \times \\ \times H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i)\} + bq^i + dS^i Q^i, (2a)$$

для второго, третьего и четвертого сезонов –

$$\text{Сток} = \sum_k \{a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P) \times \\ \times H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i)\} + bq^i + dS^i Q^{(i)}, \quad (26)$$

где P – обобщенные по территории Алтае-Саянской горной страны нормированные осадки [Кирста, 2011] за IX–XI месяцы предшествующего года для 1го сезона или за IV–VI, VII–VIII, IX–XI месяцы для 2, 3, 4го сезонов соответственно; a_k – параметры, отвечающие стабильной среднесезонной концентрации рассматриваемого вещества в расчетном водном стоке Q_k^i , формируемом k -м ландшафтом в бассейне i за счет осадков P , $k=1\div 13$; 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 бассейна i , рассчитываемый по картографическим данным как тангенс угла наклона склонов относительно горизонтали [Кирста и др., 2012б]; H – кусочно-линейная функция (1); c_{1-6} – параметры, отражающие влияние на сток вещества осадков P и уклона K^i ; d – параметр, характеризующий увеличение концентрации вещества от каждого процента площади S^i в расчетном водном стоке Q^i ; S^i – относительная площадь пахотных земель (в долях/процентах от площади бассейна i).

В правой части (2а), (2б) суммируются вклады в сезонный сток конкретного вещества от каждого ландшафта, обеспечиваемые его поверхностным, внутрипочвенным и подземным водными стоками.

Значения параметров a_k , где $k=1\div 13$, характеризуют стабильные среднесезонные концентрации веществ в водных стоках от каждого ландшафта. Через функцию $H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P)$ учитывается влияние осадков P текущего гидрологического сезона, а через $H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i)$ – поперечного уклона K^i речных бассейнов. Тем самым по уравнениям (2а), (2б) рассчитывается посезонная и многолетняя динамика гидрохимического стока как для каждого ландшафта в каждом бассейне, так и всего бассейна реки. В уравнениях отражен также вклад пашни. Слагаемое bq^i учитывает приток или отток вещества при положительном или отрицательном q^i , рассчитываемом по модели водного стока. Значение q^i зависит от осадков предыдущего и текущего сезонов, а также обмена влагой с почвенно-грунтовыми водами и водами зон трещиноватых пород [Кирста и др., 2012б].

Вместе с моделью пространственного обобщения и нормировки среднемесячных температур и месячных осадков [Кирста, 2011], моделью водного стока [Кирста и др., 2012а] уравнения (2а), (2б) составляют пакет имитационных моделей климата, водного и гидрохимического стоков с ландшафтов горных речных бассейнов. Параметры a_1 – a_{13} , b , c_1 – c_6 , d уравнений (2а), (2б) определены в ходе САМ через решение обратной математической задачи по ежегодно наблюдаемым среднесезонным стокам вещества, 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, который рассчитывается по модели водного стока и нормируется на свое среднемноголетнее

наблюдаемое значение в бассейне i [Кирста и др., 2012а]. C^i представляет собой наблюдаемую концентрацию вещества в речном стоке для бассейна i , нормированную на ее среднюю по 34 бассейнам величину за

конкретный сезон. Умножением на последнюю среднесезонные концентрации вещества a_k в ландшафтных водных стоках Q_k^i переводятся из нормированных величин в мг/литр (Табл.).

Таблица

Среднесезонные концентрации веществ (a_k) в ландшафтных водных стоках [Kirsta et.al., 2020]

Table

Average seasonal concentrations of analytes (a_k) in landscape runoff [Kirsta et.al., 2020]

Ландшафты	Концентрации веществ в ландшафтах для 1/2/3/4 сезонов, мг/л						
	Нитриты, NO_2^-	Нитраты, NO_3^-	Аммоний, NH_4^+	Фосфаты, PO_4^{3-}	Минерализация	Растворенное железо, Fe	Взвешенное вещество
1	0/0/0.03/0	0/0/0.67/0	0.42/0.63/0/0	0.02/0/0.01/0	0/0/0/0	0/0/0/0	0.20/0/0/0
2	0/0/0.01/0	0/0.31/0/0.09	0/0/0/0	0/0/0/0	0/0/0/0	0/0/0/0.04	0.78/0/0/0
3	0/0/0/0	0/0/0/0	0.35/1.70/0/0.50	0.02/0/0.05/0	0/494.4/0/0	0/0.20/0/0	20.0/23.2/0/0
4	0.01/0/0/0.01	0.91/0.48/0.056/0.18	0.13/0.45/0.11/0.24	0/0.01/0/0.01	124.2/73.8/43.6/36.4	0.11/0.89/0.10/0.13	4.02/74.2/10.7/7.17
5	0.06/0.02/0.03/0	0/0/0.79/0	0.55/0.68/0.87/0	0.02/0.01/0/0	0.52/141.0/0/0	0.01/1.08/0.01/0	29.0/230.5/18.1/0
6	0.01/0.03/0/0	1.59/1.48/0.43/0.39	0.35/0.64/0.24/0.26	0/0.14/0.01/0.01	133.7/239.8/277.5/178.9	0.33/0.34/0.14/0.13	4.16/204.5/21.8/10.2
7	0.03/0/0/0	0.48/0/0/0	0.44/0.11/0.80/0.97	0/0.15/0.07/0.08	466.0/172.2/291.6/722.5	0/0/0/0	5.44/0/6.93/1.97
8	0.04/0.05/0.01/0.02	3.21/1.02/0.30/0.78	0.41/0.21/0.23/0.62	0.09/0.09/0.04/0.02	501.9/167.1/298.2/281.4	0.32/0/0.08/0.17	30.9/16.5/11.4/0
9	0/0/0.02/0.01	0/0/0.87/0.07	0/0/0/0	0/0/0/0	0/0/0/0	0/0/0/0	0/0/0/0
10	0.05/0/0.01/0.02	2.97/0/0.18/0.78	0/0.91/0/0	0/0.07/0.07/0.02	735.3/408.0/1075/1206	0/0/0/0	16.1/0/34.3/20.0
11	0.03/0.02/0.03/0	0.31/0/0.12/0.16	0.68/0.69/0.61/0	0/0.11/0.01/0.01	1351/188.2/1192/665.1	0.33/0.07/0.31/0.11	31.5/230.6/30.6/11.5
12	0.05/0/0/0	0/0/0.18/0.40	0.47/0/0.38/0	0/0/0/0	118.8/188.7/0/0	0/0/0/0.19	0.20/0/0.68/1.70
13	0/0/0/0.02	0/0/0/0	0.06/1.08/0/0	0.01/0/0/0	0/0/0/0	0/1.08/0/0	16.6/213.4/0/0

Примечание: 1–Гляциально-нивальные высокогорья; 2–Гольцово-альпинотипные высокогорья и среднегорья, псевдогольцовые низкогорья; 3–Тундрово-степные и крио-фитно-степные высокогорья; 4–Лесные высокогорья, среднегорья и низкогорья; 5–Экспозиционно-лесостепные и степные высокогорья и среднегорья; 6–Лесостепные, степные низкогорья и предгорья; 7–Межгорные котловины с вариантами степей и лесостепей; 8–Степные и лесостепные подгорные и возвышенные аккумулятивные равнины; 9–Недренируемые слабопроточные интразональные и интрапоясные ландшафты; 10–Долины горных рек; 11–Долины равнинных рек; 12–Лесные возвышенные и подгорные равнины; 13–Аквальные ландшафты.

Таким образом, уравнения (2а), (2б) обеспечивают расчет гидрохимических стоков с различных ландшафтов Алтае-Саянской горной страны. Для каждого из 7 характеризуемых веществ рассчитаны показатель качества моделей RSR (RMSE-Standard deviation Ratio) и критерий Нэша–Сатклиффа NSE (Nash-Sutcliffe model Efficiency coefficient, $NSE=1-RSR^2$) [Moriassi et. al., 2007; Koch, Cherie, 2013]. Полученные значения $RSR \approx 0.4-0.5$ и $NSE \approx 0.7-0.8$ соответствуют хорошему и очень хорошему качеству разработанной модели. Следует отметить, что экспериментальные исследования гидрохимических стоков крайне затруднены, так как требуют трудоемких измерений поверхностного, внутрипочвенного и подземного водных стоков по всей площади ландшафтов, как и концентраций веществ в них.

Выводы

1. На примере 34 речных бассейнов Алтае-Саянской горной страны выполнен

системный анализ формирования сезонных гидрохимических стоков с различных горных ландшафтов в зависимости от факторов среды.

2. С помощью системно-аналитического моделирования построена универсальная имитационная модель гидрохимических стоков с ландшафтов на примере нитритов NO_2^- , нитратов NO_3^- , аммония NH_4^+ , фосфатов PO_4^{3-} , ионов (минерального стока), растворенного железа Fe, взвешенного вещества.

3. Установленные концентрации веществ в ландшафтных водных стоках и количественные зависимости гидрохимических стоков от месячных осадков, площадей ландшафтов и пашни, уклона поверхности и рассчитываемых водных стоков обеспечили высокую адекватность разработанной модели, характеризующейся критерием Нэша–Сатклиффа $NSE = 0.7-0.8$.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declares that he has no conflict of interest.

Авторы выражают благодарность А.В. Пузанову и Т.А. Рождественской за содействие при выполнении исследований и ценные замечания при подготовке статьи.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН по проекту FUFZ-2021-0003 «Оценка эколого-биогеохимической обстановки в речных бассейнах Сибири в условиях изменения климата и антропогенного воздействия».

Список литературы

- Кирста Ю.Б. Моделирование пустынных экосистем. Ашхабад: Ылым, 1986. 144 с.
- Кирста Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // Мир науки, культуры, образования. 2011. № 3(28). С. 330–337.
- 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.
- 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 тер-

риторий // Известия Самарского научного центра РАН. 2012а. Т. 14, № 1(9). С. 2334–2342.

Кирста Ю.Б., Пузанов А.В., Ловцкая О.В., Лубенец Л.Ф. Универсальная математическая модель стока взвешенных веществ для бассейнов горных рек // Устойчивое развитие горных территорий. 2012б. № 3–4 (13-14). С. 46–53.

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.

Кирста Ю.Б., Пузанов А.В. Системно-аналитическое моделирование ионного стока горных рек // Ползуновский альманах. 2018. №4. С. 113–117.

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.

Kirsta Y.B., Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A. Models for Describing Landscape Hydrochemical Discharge in Mountain Countries // In: Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research / Ed. W. Mirschel, V. Terleev, K.O. Wenkel. Cham: Springer, 2020. P. 163–178.

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 (June 3–7, 2013). Koblenz, Germany, 2013. P. 428–523.

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.

References

Kirsta Yu.B. Modelirovaniye pustynnykh ekosistem [Modeling of desert ecosystems] Ashkhabad: Ylym. 1986. 144 p. (in Russian).

Kirsta Yu.B. Prostranstvennoye obobshcheniye klimaticheskikh kharakteristik dlya gornykh territoriy [Spatial generalization of climatic characteristics in mountain areas] // Mir nauki, kultury, obrazovaniya [The World of Science, Culture, Education]. 2011. No. 3(28). P. 330–337. (in Russian).

Kirsta Yu.B., Lubenets L.F., Chernykh D.V. Tipizatsiya landshaftov dlya otsenki rechnogo stoka v Altaye-Sayanskoy gornoy strane [Typological classification of landscapes for river flow estimation in Altai-Sayan mountainous country] // Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy [Sustainable Development of Mountain Territories]. 2011. no. 2(8). P. 51–56. (in Russian).

Kirsta Yu.B., Puzanov A.V., Lovckaya O.V., Lubenec L.F., Kuznyak Ya.E., Pahotnova A.Yu. Imitacionnaya matematicheskaya model' stoka srednih i malyyh rek dlya gornyyh territoriy [Imitating mathematical model of middle and small rivers drain for mountain territories] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Acad-

emy of Sciences]. 2012. Vol. 14, no. 1(9). P. 2334–2342. (in Russian).

Kirsta Yu.B., Puzanov A.V., Lovckaya O.V., Lubenec L.F. Universal'naya matematicheskaya model' stoka vzveshennykh veshchestv dlya bassejnov gornyh rek [The universal mathematical model for suspended solids runoff in mountain river basins] // Ustojchivoe razvitie gornyh territorij [Sustainable Development of Mountain Territories]. 2012. No. 3–4 (13–14). P. 46–53. (in Russian).

Kirsta Yu.B., Kirsta B.Yu. Informatsionno-fizicheskiy zakon postroyeniya evolyutsionnykh sistem. Sistemno-analiticheskoye modelirovaniye ekosistem [The Information-Physical Principle of Evolutionary Systems Formation, System-Analytical Modeling of Ecosystems]. Barnaul: Izd-vo Alt. gos. un-ta. 2014. 283 p. (in Russian).

Kirsta Yu.B., Puzanov A.V. Sistemno-analiticheskoye modelirovaniye ionnogo stoka gornyh rek [System-analytical modeling of the ion runoff of mountain rivers] // Polzunovskiy al'manakh [Polzunovskiy Almanakh]. 2018. No. 4. P. 113–117. (in Russian).

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.

Kirsta Y.B., Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A. Models for Describing Landscape Hydrochemical Discharge in Mountain Countries // In: Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research / Ed. W. Mirschel, V. Terleev, K.O. Wenkel. Cham: Springer, 2020. P. 163–178.

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 (June 3–7, 2013). Koblenz, Germany, 2013. P. 428–523.

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.

MODELING HYDROCHEMICAL RUNOFF FROM MOUNTAIN LANDSCAPES

Y.B. Kirsta, I.A. Troshkova

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,

E-mail: kirsta@iwep.ru, puzanov@iwep.ru, rtamara@iwep.ru, egorka_iren@mail.ru

Experimental studies of hydrochemical runoff formation in mountain rivers, for all their relevance, are extremely difficult. The quality of river water, actively used by the population living along the rivers, significantly affects human health and economic activity in general. Based on the example of 34 river basins of the Altai-Sayan mountain country, the universal mathematical model of seasonal and long-term dynamics of hydrochemical runoffs from landscapes to rivers

was developed. When calculating landscape runoffs (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Fe, mineral and suspended matter) we use the following main environmental factors: monthly precipitation, mean monthly air temperature, the area and altitude of landscapes and arable lands, general slope of river basins, and calculated water runoff. The developed model has the Nash-Sutcliffe performance criterion $NSE=0.7-0.8$ that is evidence of its good and very good quality. It can be easily integrated into the system of ongoing monitoring of river water quality and ensure the targeted implementation of measures to maintain this quality at a high level.

Keywords: mathematical model; mountain landscapes; hydrochemical runoff; Altai; Sayan.

Received June 14, 2023. Accepted: July 10, 2023

Сведения об авторах

Кирста Юрий Богданович – профессор, доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0001-8990-3190. E-mail: kirsta2007@mail.ru.

Трошкова Ирина Александровна – младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-2809-8022. E-mail: egorka_iren@mail.ru.

Information about the authors

Kirsta Yuri Bogdanovich – Dr Sc. in Biology, Associate Professor, Chief Researcher, Laboratory of Biogeochemistry of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0001-8990-3190 E-mail: kirsta2007@mail.ru.

Troshkova Irina Aleksandrovna – Junior Researcher, Laboratory of Biogeochemistry of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-2809-8022. E-mail: egorka_iren@mail.ru.