

Раздел 2 ГИДРОЛОГИЯ СУШИ, ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ГИДРОХИМИЯ Section 2 HYDROLOGY OF LAND, WATER RESOURCES, HYDROCHEMISTRY

УДК [556.51+911.5]: 519.85

СИСТЕМНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕЖЕГОДНЫХ МАКСИМУМОВ ВЕСЕННИХ ПОЛОВОДИЙ НА ГОРНЫХ РЕКАХ

Ю.Б. Кирста, А.В. Пузанов, И.А. Трошкова

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,

E-mail: kirsta@iwep.ru, puzanov@iwep.ru, egorka iren@mail.ru

Весенние половодья на горных реках представляют серьезную угрозу хозяйственной деятельности местного населения. Они характеризуются максимальными значениями речного стока и наибольшим, хотя и кратковременным затоплением территорий близ рек. Используя методологию системно-аналитической обработки больших выборок гидрометеорологических данных, мы проанализировали формирование половодий на 34 реках Алтае-Саянской горной страны за период 1951–2023 гг. Разработана математическая модель максимумов их весеннего стока и оценена ее чувствительность к факторам среды. С помощью модели количественно охарактеризовано влияние ландшафтов, зимне-весенних температур воздуха и осадков на ежегодные максимальные значения стока у каждой реки. Для этого рассчитаны вклады естественных вариаций факторов среды в дисперсию указанных значений. Вклады зимних и апрельских осадков, зимних и апрельских температур воздуха в данную дисперсию составили 34.7, 21.9, 7.8 и 6.1% соответственно. Дано объяснение полученных сложных зависимостей ежегодных максимумов весеннего стока от метеорологических факторов и приходящей солнечной радиации.

Ключевые слова: системно-аналитическое моделирование; горные реки; весеннее половодье; метеорологические факторы; ландшафты; Алтай; Саяны.

DOI: 10.24412/2410-1192-2025-17905

Дата поступления: 14.11.2025. Принята к печати: 27.11.2025

Проблема неблагоприятного воздействия речных половодий и наносимого ими ущерба становится все более острой из-за повсеместной дестабилизации метеорологических процессов в условиях меняющегося климата [Медведков, Штриплинг, 2018]. Для принятия эффективных мер по снижению такого ущерба требуется разработка прогнозных моделей, адекватно характеризующих гидрологические процессы на водосборных территориях [Brinkerhoff et al., 2020; Langhammer,

Bernsteinova, 2020; Dibike et al., 2021]. Особые сложности здесь представляют горные территории, имеющие сложную орографию и контрастную мозаику климатических зон.

Привлечение современных методов исследований – нейронных сетей и искусственного интеллекта – пока не позволяет адекватно охарактеризовать реальные физические процессы и воздействие факторов среды на половодья [Fleming et al., 2021; Bentivoglio et al., 2022; Palchevsky et al., 2023]. Одной из трудных задач является адекватный учет влияния на половодья климатических факторов [Dikshit et al., 2024]. В определенной степени помогает решению проблем объединение различных типов математических моделей в единые ансамбли [Akbarian et al., 2022; Karim et al., 2023].

Методология системно-аналитического моделирования сложноорганизованных природных систем [Кирста, Кирста, 2014] отличается от других методов анализа данных, в том числе от «intelligence methods» [Jayalakshmi, Mantha, 2021]. Она позволяет выявить и количественно охарактеризовать реальную динамику взаимосвязанных физических, биогеохимических и других процессов в изучаемых системах. При этом количественно описывается даже слабое влияние факторов среды на исследуемые процессы, в нашем случае на формирование половодий. Методология разрабатывалась около двадцати лет и в англоязычных публикациях авторов называлась как «system-analytical modeling» и «deep process-data mining» [Kirsta, 2006; Kirsta, Troshkova, 2023a]. Ее эффективность многократно проверена при разработке адек-

ватных математических моделей, описывающих многолетнюю динамику водного и гидрохимического стоков с горных водосборов под воздействием климатических факторов и условий среды [Kirsta et al., 2020; Kirsta, Troshkova, 2023a, b; Кирста, Трошкова, 2023].

Материалы и методы

Системно-аналитическое моделирование формирования весенних половодий с построением математической модели их максимального стока выполняется нами на основе многолетних рядов гидрометеорологических наблюдений. В ходе исследований рассчитывается пространственно обобщенная межгодовая динамика нормированных среднемесячных температур воздуха и месячных осадков, используемая затем при количественной оценке влияния факторов среды на указанный сток. Методология моделирования включает пять основных этапов.

На первом этапе определяются иерархически подчиненные природные системы, в которых должны анализироваться нужные процессы. В нашем случае наиболее крупной системой является Алтае-Саянская горная страна с общими для нее масштабными атмосферными процессами, метеорологические данные о которых используются в качестве входных переменных разрабатываемой модели. Подчиненными гидрологическими системами являются водосборные бассейны отдельных рек. Еще меньшие природные системы представлены отдельными ландшафтами как достаточно автономными компонентами бассейновых гидрологических систем.

На втором этапе анализа осуществляется подготовка гидрологических, метеорологических и других данных, ассоциированных со стоком рассматриваемых рек. Согласуются шаги описания исследуемых процессов по времени и пространству. Выбранный нами шаг описания гидрометеорологических процессов равняется одному месяцу, а для выделения ландшафтов и расчета их площадей применяются топографические карты масштаба 1:200000. При обработке картографических данных о рельефе и ландшафтной структуре речных бассейнов используется геоинформационная платформа ArcGIS 10.2. Для перехода от измеряемых на метеостанциях точечных метеорологических характеристик к требующимся площадным выполняется нормировка среднемесячных температур воздуха и месячных осадков на их среднееголетние значения “in situ” с последующим обобщением (усреднением) нормированных данных по пространству (метеостанциям). Полученная многолетняя динамика обобщенных таким образом характеристик принимается одинаковой для всей Алтае-Саянской горной страны. Дальнейшее использование обобщенных нормированных метеорологических данных требует нормировки и стока рек. Это выполняется делением ежегодно наблюдаемых весной максимальных расходов воды у каждой реки на их среднееголетнее значение для этой же реки. Далее вместо термина «расход воды» будет использоваться «сток», так как нами анализируются водосборные бассейны и их ландшафты, для которых словосочетания «расход воды с бассейна» или «расход воды с ландшафта» использо-

вать не принято. В результате сток всех рек выражается в единых нормированных единицах (подобны модульному коэффициенту стока), что обеспечивает последующую разработку общей системно-аналитической модели стока рек вне зависимости от его исходно большой или малой величины. Обратный переход к обычным единицам измерений метеорологических характеристик (°C, мм) и речного стока (м³/с) осуществляется простейшим умножением на их среднееголетние значения.

При выполнении третьего этапа создается сама системно-аналитическая модель, описывающая исследуемые сложноорганизованные системы – у нас это ежегодное формирование максимумов весеннего стока с речных бассейнов и их ландшафтов. Данный этап осуществляется в программной среде MATLAB. Идентификация и верификация создаваемых вариантов модели реализуются через решение обратной математической задачи по имеющимся гидрометеорологическим данным. Вариант с наименьшим расхождением между рассчитываемыми и наблюдаемыми значениями стока рек принимается в качестве окончательной модели.

Четвертый этап предназначен для оценки адекватности (точности) модели и ее чувствительности к вариациям факторов среды. Адекватность рассчитывается согласно уравнению [Kirsta, Troshkova, 2023a; Кирста, Трошкова, 2023]:

$$A = S_{dif} / \sqrt{2} S_{obs}, \quad (1)$$

где A – критерий адекватности модели; S_{dif} – стандартное (среднеквадратичное) отклонение для ее невязки (у нас это разности между нормированными рассчитываемыми

мыми и наблюдаемыми значениями стока рек); S_{obs} – стандартное отклонение у наблюдаемых данных (нормированного стока); $1\sqrt{2}$ – множитель. Критерий A связан с широко используемыми для оценки точности моделей показателями RSR и Нэша-Сатклифа NSE [Moriassi et al., 2007; Koch, Cherie, 2013] как $RSR = A\sqrt{2}$ и $NSE = 1 - RSR^2 = 1 - 2A^2$ и удобен для расчета

$$FS = (A')^2 - (A)^2 = \frac{(S'_{dif})^2 - (S_{dif})^2}{2(S_{obs})^2} = \frac{2(S_{fac})^2}{2(S_{obs})^2} = \frac{(S_{fac})^2}{(S_{obs})^2}, \quad (2)$$

где FS – чувствительность к естественным вариациям фактора среды; A' – значение A , полученное из (1) путем подстановки в модель случайным образом переставленных значений входного фактора вместо первоначально упорядоченных; $(S_{dif})^2$ – дисперсия разностей (невязки) между рассчитываемыми и наблюдаемыми величинами стока; $(S'_{dif})^2$ – эта же дисперсия, рассчитанная для случайно переставленных значений входного фактора; $(S_{obs})^2$ – дисперсия наблюдаемых величин стока; $(S_{fac})^2$ – вклад (доля) реальных вариаций этого фактора в $(S_{obs})^2$. Согласно (2) дисперсия от ошибок наблюдений за фактором входит одновременно в $(S'_{dif})^2$ и в $(S_{dif})^2$. Она вычитается в числителе (2) и не влияет на FS . При этом FS характеризует чувствительность речного стока только к реальным вариациям фактора, то есть степень его влияния на сток.

На пятом этапе создается прикладная версия разработанной математической модели, описывающая один конкретный гидрологический объект. Для этого из модели убираются все зависимости от факторов среды, изменения которых у выбранного объекта отсутствуют. Например, это изменения ландшафтной структуры выбранно-

чувствительности моделей FS к факторам среды.

Чувствительности модели к факторам среды оценивается как вклад (доля) реальных вариаций каждого фактора в дисперсию наблюдаемых максимальных значений стока. Расчет чувствительности/вкладов выполняется по уравнению [Kirsta, Troshkova, 2023b]:

го речного бассейна. Значения параметров для оставшихся факторов определяются заново через повторное решение обратной математической задачи. При этом сокращение числа параметров, очевидно, способствует повышению точности прикладной версии модели.

Регион исследований и исходные данные

Исследования выполнены на примере 34 средних и малых рек Алтае-Саянской горной страны, которая расположена в центре Азии в пределах 50–56° с.ш., 83–100° в.д. и занимает площадь около 2000000 км². Климат страны характеризуется длительной холодной зимой и коротким прохладным летом (табл.). Количество выпадающих осадков значительно меняется с высотой. На высотах 2500–3000 м северных склонов гор выпадает 1200–2500 мм осадков в год, на средних частях – до 600 мм, у подножия – около 200 мм [Гвоздецкий, Михайлов, 1987]. Контрастность климатической мозаики страны отражена в существовании на ее территории различных ландшафтно-климатических зон: ледников, гольцов, горных тундр и альпийских лугов на высокогорьях, хвойных лесов, степей и полупустынь на склонах и межгорных котловинах [Физико-географическое..., 1968].

Таблица

Среднемноголетние значения температур воздуха и осадков для Алтае-Саянской горной страны (по данным 11 реперных метеостанций за 1951–2023 гг.)

Table

Long-term average air temperatures and precipitation for the Altai-Sayan mountain country (according to 11 reference weather stations for 1951–2023)

Климатическая характеристика	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Температуры, °C	-16.0	-14.6	-7.4	2.7	10.6	15.9	17.8	15.4	9.7	2.2	-7.2	-13.3	1.3
Осадки, мм	22.1	19.8	23.7	40.1	58.3	70.2	83.1	72.1	50.0	50.8	41.2	30.5	561.9

Средние и малые реки Алтае-Саянской горной страны представляют особую сложность для системно-аналитического моделирования, так как их водосборы отличаются сложным горно-котловинным рельефом, значительными вариациями температур и неравномерным выпадением осадков. Питание рек является смешанным снегово-дождевым и ледниковым, причем снеговое питание составляет более 50% их годового стока. Согласно данным наблюдений за расходами воды на анализируемых речных створах весенние половодья растянуты по времени и длятся с апреля по июнь при максимуме расходов воды в апреле в подавляющем большинстве случаев.

В ходе исследований использовались электронные базы гидрометеорологических наблюдений и другие связанные с ними данные (координаты речных створов, сроки наблюдений, переносы метеостанций и т.д.) открытого доступа. Непосредственно гидрологические данные были взяты с сайта Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов [Федеральное..., 2025], а также выбраны из материалов наблюдений Госкомгидромета СССР и

Росгидромета, опубликованных в Гидрологических ежегодниках (1955–1979) и более поздних справочниках «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши».

Методология системно-аналитического моделирования нами реализована на примере наблюдаемых в 1951–2023 гг. максимальных расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) в весенние половодья на 34 реках Алтае-Саянской горной страны. Из-за пропуска данных общий объем гидрологической выборки составил около 300 ежегодно наблюдаемых на реках в апреле максимальных расходов, что было достаточно для разработки их математической модели.

Гидрологические данные были дополнены среднемесячными температурами воздуха и месячными осадками по 11 реперным метеостанциям за 1951–2023 гг., информацией ГИС о ландшафтной структуре, площади и высоте ландшафтов в каждом речном бассейне [Kirsta, Troshkova, 2023b]. При этом ландшафты были разделены на 13 типологических групп [Кирста и др., 2011; Kirsta et al., 2020]. Большое количество одновременно анализируемых бассейнов позволило нивелировать их индивидуальные

особенности и определить общие закономерности гидрологических процессов для всей территории горной страны.

Результаты и обсуждение

Нормировка среднемесячных температур воздуха и месячных осадков на среднемноголетние значения “in situ” и их усреднение по Алтае-Саянской горной стране позволили получить единую для всей страны динамику этих метеорологических факторов, не зависящую от высоты местности [Kirsta et al., 2020]. Влияние температур воздуха, осадков, ландшафт-

ной структуры речных бассейнов и высоты самих ландшафтов найдено путем решения обратной математической задачи для системы из 300 уравнений. Каждое уравнение рассчитывало максимальное значение апрельского стока конкретной реки в конкретный год. При решении обратной задачи рассчитываемое значение стока заменялось на наблюдаемое, а неизвестными являлись параметры модели. После проверки различных вариантов зависимости стока рек от факторов среды, получена окончательная модель для максимумов весеннего стока [Kirsta, 2020]:

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

где MRR^i – максимальный речной сток конкретного года, нормированный на свою среднемноголетнюю величину в бассейне i , $i=1-34$; первое и второе слагаемые в (3) характеризуют вклад в MRR^i от осадков за декабрь-март и апрель соответственно; параметры a_k , b_k определяют ту часть речного стока, которая формируется ландшафтом k , $k=1-13$; S_k^i – площадь ландшафта k , нормированная на площадь бассейна i ; h_k^i – средняя высота этого ландшафта, м БС;

P_1 , P_2 – отклонения нормированных месячных осадков за декабрь-март и апрель от своего среднего соответственно; T_1 , T_2 – аналогичные отклонения для температур воздуха за декабрь-март и апрель; $c_1, \dots, c_9$ – параметры, характеризующие влияние T_1 , T_2 и h_k^i на MRR^i ; c_{10} – увеличение ($c_{10} > 0$) или уменьшение ($c_{10} < 0$) MRR^i за счет подземных вод и вод трещиноватых пород; H – непрерывная кусочно-линейная функция:

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) = \begin{cases} Y1 + Z1(X - X1), & \text{if } X < X1 \\ \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}(X - X1) + Y1, & \text{if } \begin{cases} X \leq X < X2 \\ X1 \neq X2 \end{cases} \\ Y2 + Z2(X - X2), & \text{if } X \geq X2 \end{cases}, \quad (4)$$

где $X1$, $X2$, $Y1$, $Y2$, $Z1$, $Z2$ – параметры, определяемые в ходе решения обратной математической задачи; X – какая-либо переменная модели. Функция H с меняющимися значениями параметров позволяет аппроксимировать широкий спектр зависимостей между процессами и факторами среды.

На рисунке представлена полученная зависимость ежегодных максимумов весенних половодий MRR от метеорологических факторов. Мы видим естественное возрастание MRR с зимними осадками P_1 . Зависимость MRR от зимних температур воздуха T_1 более сложна.

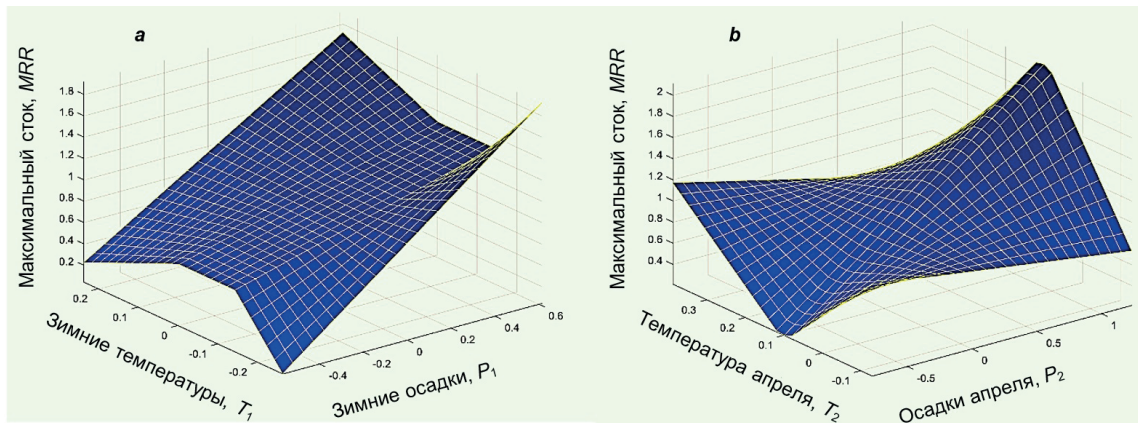


Рис. Зависимость ежегодных максимумов весенних половодий (MRR в (3)) от температур воздуха T_1 , T_2 и осадков P_1 , P_2 .

a – влияние метеоусловий декабря-марта, b – влияние метеоусловий апреля

Fig. Dependence of the annual maxima of spring runoff (MRR in (3)) on air temperatures T_1 , T_2 and precipitation P_1 , P_2 .

a – influence of December-March meteorological conditions, b – influence of April meteorological conditions

После холодных зим ($-0.25 < T_1 < 0$) и малых осадков $P_1 < 0$ величина MRR растет с температурами T_1 за счет более быстрого таяния снежного покрова под действием весенней солнечной радиации и «скатывания» талых вод с промерзших почв в реки. После теплых зим ($0 < T_1 < 0.25$) и $P_1 < 0$ величина MRR уменьшается с ростом T_1 из-за потерь талых вод на инфильтрацию в почвы, быстро оттаивающие весной. Этот же эффект имеет место после холодных зим ($-0.25 < T_1 < 0$) и $P_1 > 0$, когда значительный снежный покров препятствует глубокому промерзанию почв. В теплые зимы ($0 < T_1 < 0.25$) и $P_1 > 0$ значение MRR увеличивается с ростом T_1 из-за «скатывания» талых вод с увлажненных за зиму почв в реки.

Влияние весенних метеоусловий на ежегодные максимумы весенних половодий MRR также оказалось достаточно сложным (рис.). При невысоких весенних температурах $-0.1 < T_2 < 0.1$ и малых осадках $P_2 < 0$ (в горах выпадают в виде снега) MRR падает с увеличением T_2 из-за потерь талых вод на инфильтрацию в оттаивающие по-

чвы. При высоких температурах $0.1 < T_2 < 0.4$ и $P_2 < 0$ величина MRR увеличивается с T_2 в результате более активного таяния снежного покрова, преобладающего над промачиванием почв. Увеличение MRR с T_2 мы также видим при $-0.1 < T_2 < 0.1$ и больших осадках $P_2 > 0$, которые препятствуют оттаиванию почв, а значит, и потере талых вод на инфильтрацию. При высоких температурах $0.1 < T_2 < 0.4$ и больших осадках $P_2 > 0$ величина MRR падает с ростом T_2 из-за активного оттаивания почв и их промачивания талыми водами.

Рассмотрим значимость факторов среды, формирующих максимумы весенних половодий MRR в (3). Значимость фактора (иначе чувствительность модели) характеризуется нами как рассчитываемый по уравнениям (1) и (2) вклад (в процентах) его естественных вариаций в наблюдаемую дисперсию значений MRR . Вклады в дисперсию MRR составили:

- ✓ 34.7% от осадков P_1 за декабрь-март,
- ✓ 21.9% от осадков P_2 за апрель,
- ✓ 7.8% от температур воздуха T_1 за декабрь-март,

✓ 6.1% от температур воздуха T_2 за апрель,

✓ 0.2% от высоты местности (расчет выполнялся путем случайной перестановки высот ландшафтов h_k^i в каждом бассейне).

Таким образом, основными факторами, определяющими максимумы весенних половодий MRR в (3), оказались зимние и весенние (апрельские) осадки. Высота местности, значительно влияющая на количество выпадающих осадков в мм [Селегей, Селегей, 1978], показала себя наименее значимым фактором. Это еще раз подтвердило адекватность описания динамики метеорологических факторов через их нормированные значения.

Разработанная модель (3) для максимумов весенних половодий MRR объясняет $34.7+21.9+7.8+6.1+0.2=71\%$ наблюдаемой дисперсии MRR . Оценка её адекватности (точности) по уравнению (1) дает $A=0.41$, что соответствует критерию Нэша-Сатклиффа $NSE=1-2A^2=1-2\times 0.41^2\approx 0.66$ [Kirsta, Troshkova, 2023b]. В нашем случае $NSE\approx 0.66$ попадает в диапазон его “good” значений $0.65<NSE\leq 0.75$ [Koch, Cherie, 2013]. Полученные резуль-

таты полностью подтверждают эффективность методологии системно-аналитической обработки гидрометеорологических данных, обеспечившей построение адекватной модели формирования максимумов весенних половодий на реках Алтае-Саянской горной страны. Эта модель выгодно отличается, например от линейных регрессионных моделей, своей универсальностью и точностью, так как разработка последних для горных рек требует большой объем гидрометеорологических наблюдений и дает значительную погрешность расчетов.

В качестве пояснения рассмотрим регрессионную модель для прогноза максимумов весенних половодий MRR на конкретной горной реке. Пусть в ней используются осадки P_1 за декабрь-март или аналогичные P_1 запасы воды в снежном покрове, накопленные на речном водосборе к концу марта. Пусть также учитывается температура воздуха T_1 за декабрь-март, влияющая на испарение влаги с поверхности снега в атмосферу зимой. Связь критериев NSE , A и FS [Kirsta, Troshkova, 2023a, b], позволяет записать:

$$NSE_0 = 1 - 2A_0^2 = 1 - (S_{dif})^2 / (S_{obs})^2 \approx FS_{P_1} + FS_{T_1}, \quad (5)$$

где $2A_0^2$ – дисперсия $(S_{dif})^2/(S_{obs})^2$ для характеризуемой модели прогноза MRR с адекватностью A_0 по уравнению (1); FS_{P_1} – чувствительность MRR к естественным вариациям осадков P_1 , FS_{T_1} – чувствительность MRR к естественным вариациям температур T_1 . Подставляя в (5) указанные выше значения $FS_{P_1}=0.347$ и $FS_{T_1}=0.078$, имеем:

$$NSE_0 \approx 0.347 + 0.078 \approx 0.42.$$

Полученный для характеризуемой прогнозной регрессионной модели критерий Нэша-Сатклиффа $NSE_0\approx 0.42$ попадает в диапазон его “unsatisfactory” значений $NSE<0.50$ [Koch, Cherie, 2013]. При этом прогнозы с $NSE_0=0.42$ все равно лучше, чем простейший прогноз, осуществляемый по среднемуголетнему значению MRR и характеризующийся $NSE = 0$.

Заключение

С помощью предлагаемой методологии системно-аналитического моделирования сложноорганизованных природных систем проанализировано формирование максимумов весенних (апрельских) половодий на 34 различных реках Алтае-Саянской горной страны в 1951–2023 гг. Количественно охарактеризовано влияние на половодья среднемесячных температур воздуха, месячных осадков, ландшафтной структуры речных бассейнов, площадей и высот расположения ландшафтов. Большое число одновременно анализируемых рек позволило исключить индивидуальные особенности водосборных бассейнов и обеспечить универсальность описания характеризующих гидрологических процессов.

Методология системно-аналитического моделирования основана на ряде объединенных в одно целое методов. Это нормирование и пространственное обобщение среднемесячных температур воздуха и месячных осадков, что обеспечило единообразное описание многолетней динамики метеорологических факторов на

больших пространствах. По имеющимся гидрологическим и метеорологическим данным выполнено решение обратной математической задачи для больших систем имитационных гидрологических уравнений с неизвестными параметрами. При этом неизвестные зависимости половодий от факторов среды описаны в уравнениях (3) через функцию H в (4) со значениями параметров, изменяемыми в процессе решения обратной задачи. Наилучший по невязке вариант уравнений принят за исковую математическую модель. По предложенным простым формулам оценено качество модели, включая расчет ее точности и чувствительности к реальным вариациям факторов среды.

Хорошая точность и универсальность разработанной модели максимумов весенних половодий обеспечивают возможность ее использования для рек как Алтае-Саянской горной страны, так и других горных территорий. Высокая точность расчетов для горных рек, характеризуемая критерием Нэша-Сатклиффа $NSE \approx 0.66$, позволяет использовать модель при среднесрочных прогнозах половодий.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interests.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 22-27-00058), а в части применения системно-аналитического моделирования – согласно государственному заданию 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

Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР. Азиатская часть. М.: Высшая школа, 1987. 447 с.

Кирста Ю.Б., Кирста Б.Ю. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2014. 283 с.

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., Трошкова И.А. Влияние метеорологических факторов на весенние половодья горных рек // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. № 4. С. 25–39. doi: 10.24412/2410-1192-2023-17103

Медведков К.С., Штриплинг Л.О. Ухудшение ситуации с подтоплением, связанное с антропогенным влиянием на примере города Тюкалинска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 9. С. 143–152.

Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Л.: Гидрометеиздат. 1978. 143 с.

Федеральное агентство водных ресурсов [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniihv.ru> (дата обращения: 12.05.2025).

Физико-географическое районирование СССР. Характеристика региональных единиц / Ред. Н.А. Гвоздецкий. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968. 576 с.

Akbarian H., Gheibi M., Hajiaghahi-Keshteli M., Rahmani M. A hybrid novel framework for flood disaster risk control in developing countries based on smart prediction systems and prioritized scenarios // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 312. P. 114939. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114939

Bentivoglio R., Isufi E., Jonkman S.N., Taormina R. Deep Learning Methods for Flood Mapping: A Review of Existing Applications and Future Research Directions // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 2022. Vol. 26. P. 4345–4378. doi: 10.5194/hess-26-4345-2022

Brinkerhoff C.B., Gleason C.J., Feng D., Lin P. Constraining remote river discharge estimation using reach-scale geomorphology // Water Resources Research. 2020. Vol. 56 (11). P. e2020WR027949. doi: 10.1029/2020WR027949

Dibike Y.B., Shrestha R.R., Johnson C., Bonsal B., Coulibaly P. Assessing climatic drivers of spring mean and annual maximum flows in Western Canadian river basins // Water. 2021. Vol. 13 (12). 1617. doi.org/10.3390/w13121617

Dikshit A., Pradhan B., Matin S.S., Beydoun G., Santosh M., Park H.J., Maulud K.N.A. Artificial Intelligence: A new era for spatial modelling and interpreting climate-induced hazard assessment // Geoscience Frontiers. 2024. Vol. 15 (4). P. 101815. doi: 10.1016/j.gsf.2024.101815

Fleming S.W., Garen D.C., Goodbody A.G., McCarthy C.S., Landers L.C. Assessing the new Natural Resources Conservation Service water supply forecast model for the American West: A challenging test of explainable, automated, ensemble artificial intelligence // Journal of Hydrology. 2021. Vol. 602. P. 126782. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126782

Jayalakshmi N., Mantha S. 2 – Intelligence methods for data mining task // Artificial Intelligence in Data Mining / Eds. D. Binu, B.R. Rajakumar. Academic Press, 2021. P. 21–39. doi: 10.1016/B978-0-12-820601-0.00007-0

Karim F., Armin M.A., Ahmedt-Aristizabal D., Tychsen-Smith L., Petersson L. A review of hydrodynamic and machine learning approaches for flood inundation modeling // Water. 2023. Vol. 15 (3). P. 566. doi: 10.3390/w15030566

Kirsta Y.B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically

best accuracies of ecological models. Soil moisture exchange in agroecosystems // *Ecological Modelling*. 2006. Vol. 191 (3–4). P. 315–330. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.05.028

Kirsta Y.B. System-analytical modelling: 2. Assessment of runoff model sensitivity to environmental factor variations // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2020. Vol. 8 (3). P. 67–77. doi: 10.32523/2306-6172-2020-8-3-67-77

Kirsta Y., Puzanov A., Rozhdestvenskaya T. Models for Describing Landscape Hydrochemical Discharge in Mountain Countries // *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research* / Eds. W. Mirschel, V. Terleev, K.O. Wenkel. Springer, Cham, 2020. P. 163–178. doi: 10.1007/978-3-030-37421-1_9

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. Deep process-data mining for building of analytical models: 1. Medium-term forecast of spring flood extremes for mountain rivers // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2023a. Vol. 11 (3). P. 76–97. doi: 10.32523/2306-6172-2023-11-3-76-97

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. High-performance forecasting of spring flood in mountain river basins with complex landscape structure // *Water*. 2023b. Vol. 15 (6). 1080. doi: 10.3390/w15061080

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

Langhammer J., Bernsteinova J. Which aspects of hydrological regime in mid-latitude montane basins are affected by climate change? // *Water*. 2020. Vol. 12 (8). P. 2279. doi: 10.3390/w12082279

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 // *Trans. ASABE*. 2007. Vol. 50 (3). P. 885–900. doi: 10.13031/2013.23153

Palchevsky E., Antonov V., Enikeev R.R., Breikin T. A system based on an artificial neural network of the second generation for decision support in especially significant situations // *Journal of Hydrology*. 2023. Vol. 616. P. 128844. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128844

References

Gvozdetskiy N.A. *Fizicheskaya geografiya SSSR. Aziatskaya chast'* [Physical Geography of the USSR. The Asian part]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987. 447 p. (in Russian).

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

Kirsta Y.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 the Mountain Territories]. 2011. Vol. 2 (8). P. 51–56. (in Russian).

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. Vliyaniye meteorologicheskikh faktorov na vesenniye polovod'ya gornyykh rek [Influencing meteorological factors on spring floods of mountain rivers] // *Izvestiya Altayskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society]. 2023. No 4. P. 25–39. (in Russian). doi: 10.24412/2410-1192-2023-17103

Medvedkov K.S., Shtripling L.O. Ukhudsheniye situatsii s podtopleniyem, svyazannoye s antropogennym vliyaniyem na primere goroda Tyukalinska [Degradation of flooding situation related to anthropogenic effects on the example of Tyukalinsk] // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2018. Vol. 329, no. 9. P. 143–152. (in Russian).

Selegey V.V., Selegey T.S. Teletskoye ozero [Teletskoye Lake] // Leningrad: Gidrometeoizdat. 1978. 143 p. (in Russian).

Federal'noe agentstvo vodnykh resursov [Federal Agency for Water Resources]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (accessed: 12.05.2025).

Fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye SSSR. Kharakteristika regional'nykh yedinit [Physical-geographical zoning of the USSR. Characteristics of regional units] / Ed. N.A. Gvozdetskiy. Moscow: MSU Publishing house, 1968. 576 p. (in Russian).

Akbarian H., Gheibi M., Hajiaghahi-Keshteli M., Rahmani M. A hybrid novel framework for flood disaster risk control in developing countries based on smart prediction systems and prioritized scenarios // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 312. P. 114939. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114939

Bentivoglio R., Isufi E., Jonkman S.N., Taormina R. Deep Learning Methods for Flood Mapping: A Review of Existing Applications and Future Research Directions // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*. 2022. Vol. 26. P. 4345–4378. doi: 10.5194/hess-26-4345-2022

Brinkerhoff C.B., Gleason C.J., Feng D., Lin P. Constraining remote river discharge estimation using reach-scale geomorphology // *Water Resources Research*. 2020. Vol. 56 (11). P. e2020WR027949. doi: 10.1029/2020WR027949

Dibike Y.B., Shrestha R.R., Johnson C., Bonsal B., Coulibaly P. Assessing climatic drivers of spring mean and annual maximum flows in Western Canadian river basins // *Water*. 2021. Vol. 13 (12). 1617. doi.org/10.3390/w13121617

Dikshit A., Pradhan B., Matin S.S., Beydoun G., Santosh M., Park H.J., Maulud K.N.A. Artificial Intelligence: A new era for spatial modelling and interpreting climate-induced hazard assessment // *Geoscience Frontiers*. 2024. Vol. 15 (4). P. 101815. doi: 10.1016/j.gsf.2024.101815

Fleming S.W., Garen D.C., Goodbody A.G., McCarthy C.S., Landers L.C. Assessing the new Natural Resources Conservation Service water supply forecast model for the American West: A challenging test of explainable, automated, ensemble artificial intelligence // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 602. P. 126782. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126782

Jayalakshmi N., Mantha S. 2 – Intelligence methods for data mining task // *Artificial Intelligence in Data Mining* / Eds. D. Binu, B.R. Rajakumar. Academic Press, 2021. P. 21–39. doi: 10.1016/B978-0-12-820601-0.00007-0

Karim F., Armin M.A., Ahmedt-Aristizabal D., Tychsens-Smith L., Petersson L. A review of

hydrodynamic and machine learning approaches for flood inundation modeling // *Water*. 2023. Vol. 15 (3). P. 566. doi: 10.3390/w15030566

Kirsta Y.B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil moisture exchange in agroecosystems // *Ecological Modelling*. 2006. Vol. 191 (3–4). P. 315–330. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.05.028

Kirsta Y.B. System-analytical modelling: 2. Assessment of runoff model sensitivity to environmental factor variations // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2020. Vol. 8 (3). P. 67–77. doi: 10.32523/2306-6172-2020-8-3-67-77

Kirsta Y., Puzanov A., Rozhdestvenskaya T. Models for Describing Landscape Hydrochemical Discharge in Mountain Countries // *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research* / Eds. W. Mirschel, V. Terleev, K.O. Wenkel. Springer, Cham, 2020. P. 163–178. doi: 10.1007/978-3-030-37421-1_9

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. Deep process-data mining for building of analytical models: 1. Medium-term forecast of spring flood extremes for mountain rivers // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2023a. Vol. 11 (3). P. 76–97. doi: 10.32523/2306-6172-2023-11-3-76-97

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. High-performance forecasting of spring flood in mountain river basins with complex landscape structure // *Water*. 2023b. Vol. 15 (6). 1080. doi: 10.3390/w15061080

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

Langhammer J, Bernsteinova J. Which aspects of hydrological regime in mid-latitude montane basins are affected by climate change? // *Water*. 2020. Vol. 12 (8). P. 2279. doi: 10.3390/w12082279

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 // *Trans. ASABE*. 2007. Vol. 50 (3). P. 885–900. doi: 10.13031/2013.23153

Palchevsky E., Antonov V., Enikeev R.R., Breikin T. A system based on an artificial neural network of the second generation for decision support in especially significant situations // *Journal of Hydrology*. 2023. Vol. 616. P. 128844. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128844

SYSTEM-ANALYTICAL MODELING OF ANNUAL SPRING FLOOD MAXIMA IN MOUNTAIN RIVERS

Y.B. Kirsta, A.V. Puzanov, I.A. Troshkova

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,

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

Spring floods on mountain rivers pose a serious threat to the economic activities of the local population. They are characterized by maximum values of river flow and the greatest,

albeit short-term, flooding of areas near rivers. Using the methodology of systems-analytical processing of large samples of hydrometeorological data, we analyzed the formation of floods on 34 rivers of the Altai-Sayan mountain country for the period 1951–2023. A mathematical model of their spring runoff maxima was developed and its sensitivity to environmental factors was assessed. The model was used to quantitatively characterize the influence of landscapes, winter-spring air temperatures and precipitation on the annual maximum runoff values for each river. For this purpose, the contributions of natural variations in environmental factors to the variance of the specified maximum values were calculated. The contributions of winter precipitation, April precipitation, winter air temperatures and April temperature to this variance were 34.7, 21.9, 7.8, and 6.1%, correspondingly. An explanation is given for the obtained complex dependencies of the annual maxima of spring runoff on meteorological factors and incoming solar radiation.

Key words: system-analytical modeling; mountain rivers; spring flood; meteorological factors; landscapes; Altai; Sayan.

Received November 14, 2025. Accepted: November 27, 2025

Сведения об авторах

Кирста Юрий Богданович – доктор биологических наук, профессор, 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.

Пузанов Александр Васильевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0002-1340-486X. E-mail: puzanov@iwep.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, Professor, principal researcher at the 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.

Puzanov Alexander Vasilyevich – Dr. Sc. in Biology, Professor, head of the Laboratory of Biogeochemistry of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0002-1340-486X. E-mail: puzanov@iwep.ru.

Troshkova Irina Aleksandrovna – Junior researcher at the 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.