

УДК [556.51+911.5]: 519.85

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ВЕСЕННИЕ ПОЛОВОДЬЯ ГОРНЫХ РЕК

Ю.Б. Кирста, И.А. Трошкова

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул**E-mail: kirsta@iwep.ru, egorka_iren@mail.ru*

Исследовано влияние факторов среды на весенние (апрельские) половодья 34 средних и малых рек Алтае-Саянской горной страны. С помощью разработанной методологии интеллектуального анализа экспериментальных данных (системно-аналитического моделирования) разработаны аналитические модели половодий и выявлена их сложная зависимость от месячных осадков и среднемесячных температур воздуха за сентябрь-апрель, а также от высоты и ландшафтной структуры речных бассейнов. Изменения метеорологических факторов охарактеризованы нами в процентах от их среднемноголетних значений, что позволило унифицировать их помесечную и многолетнюю динамику по всей стране. Данные о рельефе и ландшафтной структуре речных бассейнов рассчитаны по ландшафтным картам территории средствами ArcGIS 10.2. Разработка модели и количественная оценка влияния факторов среды на половодья выполнялись путем решения обратной математической задачи с использованием около 2000 значений речных стоков, наблюдаемых в 1951–2020 гг. Высокое качество, простота и универсальность моделей позволяют использовать их для прогнозов весенних половодий на горных реках.

Ключевые слова: весеннее половодье; горные реки; метеорологические факторы; ландшафты; интеллектуальный анализ; Алтай; Саяны.

*DOI:10.24412/2410-1192-2023-17103**Дата поступления: 21.10.2023. Принята к печати: 22.11.2023*

Интеллектуальный анализ данных [Funes, Dasso, 2021; Алексеев, Щекочихин, (ИА), известный как Data Mining и Knowledge Discovery, направлен на выделение неотчетливой, но потенциально полезной информации, содержащейся в больших выборках экспериментальных данных. Для ее извлечения разработаны различные математические методы, основанные на совмещении классической статистики и специальных компьютерных технологий (технологий обработки баз данных, алгоритмов машинного обучения, искусственных нейронных сетей, искусственного интеллекта и других) [Funes, Dasso, 2021; Алексеев, Щекочихин, 2022]. Актуальнейшей проблемой ИА является максимально полное извлечение полезной информации, содержащейся в выборках «зашумленных» данных со стохастическими ошибками [Ma, Yan, 2022]. В данной работе используется первая стандартная методология ИА для ее извлечения и разработки адекватных аналитических моделей, описывающих реальную структурно-функциональную организацию сложноорганизованных природных систем [Kirsta, Troshkova, 2023a].

Наводнения на реках наносят значительный вред хозяйственной деятельности человека в различных регионах мира. Для их прогнозов разработаны различные математические модели, учитывающие соответствующие факторы среды [Li et al., 2021; Klijn et al., 2022]. Очевидно, что высококачественные модели половодий и паводков требуют адекватного описания гидрологических процессов по всей территории водосбора, что невозможно без подробных пространственно распределенных данных об осадках, температурах воздуха, растительности и ландшафтах, подземных водоносных горизонтах, морфометрии водосборных площадей, свойствах почв, профиля речных русел и других характеристик. Несмотря на растущий объем исследований по этой теме, универсальные адекватные модели половодий на горных реках до сих пор отсутствуют. С помощью разработанной методологии ИА удалось создать высокоточные универсальные модели и получить количественные оценки влияния факторов среды на весенние половодья горных рек [Kirsta, Troshkova, 2022; Kirsta, Troshkova, 2023b].

*Методология интеллектуального
анализа данных*

Предлагаемый ИА экспериментальных данных с целью построения аналитических моделей имеет также более конкретизированное название – системно-аналитическое моделирование (САМ) [Кирста, Кирста, 2014]. ИА/САМ базируется на анализе поведения

природных систем как целостного комплекса процессов и воздействующих на них факторов среды. Поскольку все сложноорганизованные природные системы состоят из большого количества иерархически подчиненных друг другу процессов, методология основана на системно-иерархическом подходе и специализированной обработке больших объемов экспериментальных данных параллельных наблюдений за процессами и влияющими на них факторами среды. Под термином «аналитическая» мы подразумеваем два базовых свойства разрабатываемых моделей:

- количественно характеризовать динамику реальных процессов в сложноорганизованных природных системах при недостатке или отсутствии прямых наблюдений за ними,
- служить основой для дальнейшего углубленного исследования структурно-функциональной организации анализируемых систем.

Эффективность методологии ИА/САМ многократно проверена при моделировании различных сложноорганизованных природных систем:

- процессов влагообмена в почвах [Kirsta, 2006a],
- урожаев зерновых в агроэкосистемах России и США [Kirsta, 2006b],
- долгосрочном прогнозе изменений климата в России и США [Kirsta, 2006b; Kirsta et al., 2019],
- формирования водных и гидрохимических (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , общего растворенного железа, ионов, взвешенного вещества) стоков горных рек [Kirsta, Puzanov,

2020; Kirsta, Puzanov, 2021] и др.

Разработанная методология ИА/САМ включает пять последовательно выполняемых этапов, которые мы охарактеризуем на примере разработки аналитических моделей половодий, формируемых сложной совокупностью недостаточно изученных гидрологических процессов на водосборах горных рек со значительными вариациями условий среды.

На первом этапе ИА/САМ определяют три иерархических уровня организации процессов в анализируемой природной системе. Первый наиболее высокий иерархический уровень должен отвечать территории и периоду времени, для которых будут справедливы результаты исследований. Для гидрологической системы горных водосборов в качестве первого уровня следует выбрать речные бассейны большой территории (у нас Алтай-Саянская горная страна) с общими для нее мезомасштабными метеорологическими процессами.

Второй более низкий иерархический уровень должен отвечать гидрологическим системам, слагающим первый уровень. Это водосборные бассейны отдельных рек. Количество таких гидрологических объектов должно быть достаточно велико, чтобы исключить влияние множества индивидуальных особенностей объектов и обеспечить достоверность результатов моделирования основного интегрального процесса – речного стока в весеннее половодье на выходных створах соответствующих водосборов.

Третий иерархический уровень отвечает еще меньшим гидрологическим объектам, которые должны отражать в модели разные условия среды, влияющие на функ-

ционирование систем второго уровня. Это отдельные ландшафты, представляющие собой более мелкие, но достаточно автономные гидрологические системы.

Динамика гидрологических процессов всех иерархических уровней, зависящая от меняющихся во времени и пространстве условий среды, описывается математическими уравнениями (интегро-дифференциальными, алгебраическими, балансовыми, имитационными или иными). Уравнения составляют искомую аналитическую модель гидрологических объектов первого иерархического уровня. При этом меняющиеся факторы среды и гидрологические процессы характеризуются, соответственно, как входные и выходные переменные модели.

На втором этапе осуществляется подготовка данных для моделирования. Это ответственный этап ИА/САМ, включающий выбор шагов временной и пространственной шкал описания процессов и изменения факторов среды [Kirsta, Troshkova, 2023b]. Согласно этим шкалам должен выполняться анализ всех экспериментальных данных о процессах и факторах среды. Например, это выбор масштаба карт, требующегося для адекватного описания ландшафтной структуры речных бассейнов, а также шага описания изменений метеорологических факторов и речных стоков во времени.

Особые сложности возникают при недостаточном количестве наблюдений за факторами, влияющими на анализируемые процессы. Для метеорологических факторов нами разработан метод их нормирования, при котором среднемесячные температуры воздуха и месячные осадки

нормируются на свои среднемноголетние значения и затем обобщаются (усредняются) по пространству [Kirsta, Lovtskaya, 2020]. Данный метод обеспечивает единое образное описание динамики указанных факторов во времени и пространстве, вне зависимости от меняющихся координат и высоты местности. Возможность такого описания объясняется едиными для территории мезомасштабными метеорологическими процессами и неоднократно подтверждена прикладными расчетами.

В связи с нормировкой метеорологических факторов необходимо нормировать и анализируемые речные стоки. Это легко выполняется путем нормирования их ежегодно наблюдаемых значений на среднемноголетние величины по каждому речному бассейну. В итоге создается однородная выборка гидрологических данных, характеризующая все изменения стоков во времени и пространстве.

В свою очередь, площади выделенных на третьем иерархическом уровне ландшафтов нормируются на площади соответствующих речных бассейнов. Тем самым мы переходим к безразмерным значениям входных факторов и выходной переменной разрабатываемой аналитической модели.

На третьем этапе ИА/САМ выбирается тип модели и составляются ее уравнения. Уравнения модели должны учитывать накопленные знания о процессах в анализируемых природных объектах и не противоречить известным физическим, гидрологическим и другим законам и закономерностям. Затем начинается собственно ИА/САМ, в ходе которого проверяются различные варианты описания процессов.

Для каждого проверяемого варианта составляется система уравнений большой размерности, в которой каждое уравнение обеспечивает расчет отдельного значения речного стока из имеющейся выборки наблюдений за ним. Для составленной системы решается обратная математическая задача [Kirsta, Troshkova, 2023b]. С этой целью рассчитываемые значения выходной переменной в уравнениях заменяются на соответствующие им наблюдаемые значения из выборки гидрологических данных. Решение обратной задачи выполняется, например, оптимизационными методами из известного пакета прикладных программ MATLAB, обеспечивая одновременный расчет значений всех параметров модели и ее невязки (среднеквадратичного отклонения рассчитанных значений выходной переменной от наблюдаемых). В результате проверки различных вариантов описания анализируемых процессов (у нас – формирования половодий) определяется вариант с наименьшей невязкой, который принимается за готовую математическую модель. При этом считается, что наименьшую невязку модели обеспечивает только адекватное описание всех описываемых в модели процессов и влияния на них факторов среды.

Количество наблюдений за выходной переменной (размер ее выборки) должен превышать число параметров создаваемой аналитической модели в 5–10 раз. Это обеспечивает наилучшую точность значений ее параметров, получаемых в ходе решения обратной математической задачи. При этом важной особенностью ИА/САМ является пониженная чувствительность к погрешности данных. Большая погреш-

ность последних обуславливает лишь увеличение невязки, не приводя к изменению ни вида искомых уравнений, ни значений параметров.

При моделировании сложноорганизованных природных систем зависимость их

процессов от факторов среды обычно неясна. Предлагаемая методология ИА/САМ решает эту проблему путем применения непрерывной кусочно-линейной функции H , состоящей из трех линейных фрагментов [Kirsta, Troshkova, 2023b]:

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

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

На четвертом этапе оцениваются адекватность (точность) полученной модели. Для оценки адекватности математических моделей нами предложен следующий критерий [Kirsta, Troshkova, 2023b]:

$$A = \frac{S_{\text{dif}}}{\sqrt{2}S_{\text{obs}}}, \quad (2)$$

где A – критерий адекватности модели; S_{dif} – стандартное (среднеквадратичное) отклонение для ее невязки (разности между наблюдаемыми и рассчитанными данными); S_{obs} – стандартное отклонение для наблюдаемых данных; $1/\sqrt{2}$ – множитель.

Критерий A в (2) представляет собой невязку модели, нормированную на стандартное отклонение данных наблюдений. Интервал значений $A=0-0.71$ отвечает различной адекватности модели, то есть степени совпадения расчетных и наблюдаемых значений выходной переменной с их полным совпадением при $A \sim 0$. Критерий A

подобен показателю качества моделей RSR и критерию Нэша-Сатклиффа NSE [Koch, Cherie, 2013], с которыми связан зависимостями $RSR = A\sqrt{2}$ и $NSE = 1 - RSR^2 = 1 - 2A^2$.

На пятом этапе ИА/САМ оценивается прикладное качество разработанной модели. Очевидно, что полученные универсальные значения параметров можно уточнить при описании конкретного объекта в выбранный период времени. Неизменность ряда характеристик у одного объекта позволяет сократить и общее число параметров. Для уточнения значений оставшихся опять можно использовать решение обратной математической задачи, соблюдая соотношение более 5:1 между наблюдениями за выходной переменной модели и числом обновляемых параметров. После этого оценивается прикладное качество модели (значения A , RSR, NSE), описывающей конкретные гидрологические объекты [Kirsta, Troshkova, 2023a; Kirsta, Troshkova, 2023b].

Исходные материалы

Методология ИА/САМ реализована нами на примере анализа весенних половодий с ледоходом в апреле 1951–2020 гг. на 34 средних и малых реках Алтае-Саянской

горной страны. Страну отличает большое разнообразие ее ландшафтно-климатических зон: ледников, гольцов, горных тундр и альпийских лугов на высокогорьях, хвойных лесов, степей и полупустынь на склонах и межгорных котловинах. Питание многочисленных рек страны является смешанным снегово-дождевым и ледниковым, причем снеговое питание составляет более 50% их годового стока. На территории страны наблюдаются две волны половодья: первая (весенняя) волна формируется в апреле при вскрытии рек ото льда и таянии снежного покрова на равнинной части речных бассейнов, а вторая – в мае-июне за счет таяния снега и ледников на склонах и вершинах гор.

Геосистемы горной страны мы разделили на 13 типологических групп (ландшафтов), учитывая высотно-поясную и структурно-ярусную неоднородность территории [Кирста и др., 2011]. В результате каждый из 34 речных бассейнов был разделен на водосборные зоны-ландшафты с характерным для них гидрологическим режимом. Водные стоки с этих зон складывались на выходном створе речных бассейнов, где выполнялись измерения речного стока.

Для ИА/САМ весенних половодий мы использовали данные Гидрометеорологической службой России о стоках рек за апрель 1951–2020 гг. В среднем по выходным створам всех бассейнов сток составил около 100 м³/с. Наблюдения за стоками мы дополнили значениями месячных осадков и среднемесячных температур воздуха, GIS-информацией о ландшафтной структуре территории, площади и высоте ланд-

шафтов над уровнем моря в каждом речном бассейне.

Нами была рассчитана единая для Алтае-Саянской горной страны многолетняя помесечная динамика нормированных температур и осадков за все годы. Она определена по данным 11 реперных метеостанций с помощью метода нормирования и пространственного обобщения климатических характеристик [Кирста, 2011; Kirshta, Lovtskaya, 2020]. Сначала температуры и осадки мы перевели в доли/проценты от соответствующих среднемноголетних месячных величин по каждой метеостанции, используя для температур X–IV месяцев их среднемноголетние значения за январь, для V–IX месяцев – за июль, а для осадков всех месяцев года – их среднемноголетние значения за июль. Затем были рассчитаны средние по метеостанциям значения нормированных характеристик. Полученная помесечная многолетняя динамика нормированных температур и осадков была одинаковой для всех 34 речных бассейнов страны и не зависела от координат или высоты характеризующей территории.

Речные стоки 34 рек нами были нормированы на их среднемноголетние значения по каждому бассейну аналогично метеорологическим факторам. Площади ландшафтов (км²) в каждом бассейне также были переведены в доли/проценты путем их деления на площадь бассейна.

В целом, база данных для ИА/САМ весенних половодий на территории Алтае-Саянской горной страны включала следующие характеристики: гидрологические (около 2000 нормированных величин стока в апреле для 34 рек за отдельные

годы периода 1951–2020 гг.), метеорологические (840+840=1680 нормированных месячных значений температур воздуха и осадков), ландшафтные (352 значения площадей и высот, рассчитанных с помощью ArcGIS 10.2).

Результаты и их обсуждение

ИА/САМ весенних (апрельских) половодий на реках Алтае-Саянской горной страны обеспечил создание их высокоточных имитационных балансовых моделей, учитывающих как ландшафтную структуру водосборных территорий (площадь и высоту ландшафтов), так и воздействие среднемесячных температур воздуха и месячных осадков за осенний (сентябрь–ноябрь), зимний (декабрь–март) и весенний (апрель) периоды года. Согласно требованиям ИА/САМ, количество наблюдений за динамикой выходной переменной должно

в 5–10 раз превышать число параметров моделей. В нашем случае одновременно анализировались около 2000 стоков для 34 рек Алтае-Саянской горной страны, что позволило ввести около 40 параметров. Значения последних определялись через решение обратной математической задачи для системы из 2000 уравнений, в которых рассчитываемые стоки были заменены наблюдаемыми на выходных створах речных бассейнов.

После проверки различных вариантов уравнений, описывающих влияние метеорологических условий предшествующей осени и зимы на весеннее половодье, мы определили наилучшую по невязке балансовую модель [Kirsta, Troshkova, 2023b]. Она оказалась подобной ранее разработанной прогнозной модели всего весенне-летнего (апрель–июнь) половодья рек [Kirsta, Lovtskaya, 2021] и имеет 39 параметров:

$$Q^i = H(c_1, c_2, 1, 1, c_3, c_4, P_1) \left\{ \sum_k a_k S_k^i P_1 H(c_9, c_{10}, 1, 1, c_{11}, c_{12}, h_k^i) + \sum_k b_k S_k^i P_2 H(c_5, c_6, 1, 1, c_7, c_8, T_2) H(c_9, c_{10}, 1, 1, c_{11}, c_{12}, h_k^i) \right\} + d, \quad (3)$$

где Q^i – речной сток с бассейна i за апрель конкретного года, нормированный на свое среднемноголетнее значение, $i=1-34$; первое и второе слагаемые в правой части (3) соответствуют вкладам последнего осеннего (IX–XI месяцы) и закончившегося зимнего (XII–III месяцы) периодов соответственно; a_k , b_k – параметры, характеризующие вклад k -го ландшафта за соответствующий период, $k=1-13$; S_k^i – площадь k -го ландшафта в бассейне i , нормированная на площадь последнего; h_k^i – высота ландшафта, метры н.у.м.; P_1 , P_2 – отклонения нормированных месячных

осадков от их среднемноголетних значений в среднем за осенний и зимний периоды соответственно; T_2 – отклонение нормированных среднемесячных температур воздуха от среднемноголетнего значения за зимний период; c_{1-4} , c_{5-8} , c_{9-12} – параметры, характеризующие влияние осенних осадков P_1 и зимней температуры воздуха T_2 на Q^i , а также высоты ландшафтов h_k^i на количество осадков; d – параметр, характеризующий постоянное пополнение ($d>0$) или потери ($d<0$) стока в грунтовые воды и воды трещиноватых пород; H – кусочно-линейная функция (1).

В правой части (3) суммируются 13+13=26 различных ландшафтных гидрологических процессов, обеспечивающих своими вкладами весеннее половодье Q^i в бассейне i . Вклады ландшафтов в первом слагаемом (3) зависят от: осадков P_1 предшествующей осени, промочивших уходящие в зиму почвы, площади S_k^i и высоты h_k^i расположения ландшафтов. Вклады ландшафтов во втором слагаемом (3) обеспечиваются зимними осадками P_2 и зависят от осенних осадков P_1 и зимней температуры

T_2 , которая влияет на испарение влаги с поверхности снежного покрова, а также от S_k^i и h_k^i . Множитель $H(c_1, c_2, 1, 1, c_3, c_4, P_1)$ учитывает обмен влагой между почвами и снежным покровом в зависимости от осеннего промачивания почв осадками P_1 [Танаиенко и др., 1999].

Аналогичным образом была разработана модель весенних половодий с 36 параметрами, учитывающая метеорологические условия апреля [Kirsta, Troshkova, 2022]:

$$Q^i = \sum_k \{a_k S_k^i P_1 H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, T_1) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, h_k^i)\} + \\ + \sum_k \{b_k S_k^i P_2 H(c_7, c_7, 1, 1, c_8, c_9, T_2) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, h_k^i)\} + c_{10}, \quad (4)$$

где обозначения переменных аналогичны (3); первое и второе слагаемые уравнения (4) отвечают вкладам Q^i в от осадков за зимний (декабрь-март) и текущий (апрель) периоды соответственно; P_1, P_2 – отклонения нормированных месячных осадков от их среднегодовых значений в среднем за декабрь-март и апрель соответственно; T_1, T_2 – аналогичные отклонения нормированных среднемесячных температур воздуха за те же периоды; параметры $c_1, \dots, c_9$ отражают влияние температур T_1, T_2 и высот h_k^i на Q^i ; параметр c_{10} аналогичен d в (3).

Прикладное использование моделей половодий (3) и (4) для какого-либо конкретного речного бассейна позволяет исключить ряд параметров и учесть его специфику через новые значения последних, что обеспечивает повышение адекватности и точности моделей [Kirsta, Troshkova, 2022; Kirsta, Troshkova, 2023b]. Здесь исключаются изменения ландшафтной структуры бассейна, высот и площадей его

ландшафтов. В частности, вместо 26 параметров a_k, b_k в (3) и (4) остаются только два a, b . Для таких прикладных вариантов моделей были получены из (2) следующие значения их адекватности A_0 : ~0.34 для (3) и ~0.41 для (4). По A_0 рассчитан показатель качества моделей $NSE = 1 - 2A_0^2$, который составил 0.77 и 0.66 соответственно. Полученные значения NSE соответствуют хорошему ($0.65 < NSE \leq 0.75$) и очень хорошему ($0.75 < NSE$) качеству/точности гидрологических моделей [Koch, Cherie, 2013], а значит модели адекватно оценивают влияние метеорологических условий на весеннее половодье для рек Алтае-Саянской горной страны.

На рисунке 1 показана зависимость стока рек (р. Катунь) от температур воздуха и осадков за предшествующие осенний и зимний периоды согласно модели (3). Мы видим простую линейную связь весеннего стока с осадками обоих периодов (рис. 1а), отличающуюся от более сложного влияния

этих осадков на весенне-летнее половодье в целом за апрель-июнь [Kirsta, Lovtskaya, 2021]. Эта связь легко объясняется частичным оттаиванием почв в апреле, что ограничивает просачивание талых вод в почвы [Танасиенко и др., 1999] и способствует их прямому поступлению в реки. Зависимость стока рек от зимних температур и осадков показана на рис. 1b. Более сложное влияние этих факторов подобно их воздействию на весенне-летнее половодье [Kirsta, Lovtskaya, 2021]. Показанная на рис. 1b зависимость отличается только более узким диапазоном изменений речного стока. Это опять обусловлено частичным оттаиванием почв в апреле и мало меняющейся площадью снежного покрова в этом месяце. Таяние же снежного покрова под действием постоянной солнечной радиации обеспечивает стабильное поступление талых вод в реки.

Рассмотрим зависимость весеннего половодья от метеорологических условий зимы (рис. 2a). При теплых зимах с температурами $T_1 > 0.2$ речные стоки уменьшаются с осадками P_1 , при $T_1 \sim 0$ растут, а при низких $T_1 < -0.2$ перестают зависеть от осадков. Действительно, при теплой зиме с $T_1 > 0.2$ промерзание почвогрунтов уменьшается с увеличением осадков P_1 из-за большей толщины снежного покрова. Весной это приводит к глубокому промачиванию почв и удержанию ими большого количества талой влаги, что уменьшает речные стоки. В обычные зимы с $T_1 \sim 0$ мы видим резкое увеличение стоков за счет таяния снега под воздействием солнечной радиации, часть которой расходуется на прогревание почвогрунтов. Эта часть уменьшается при увеличении осадков P_1 , а значит и толщины снежного покрова, препятствующему значительному промерзанию почвогрунтов.

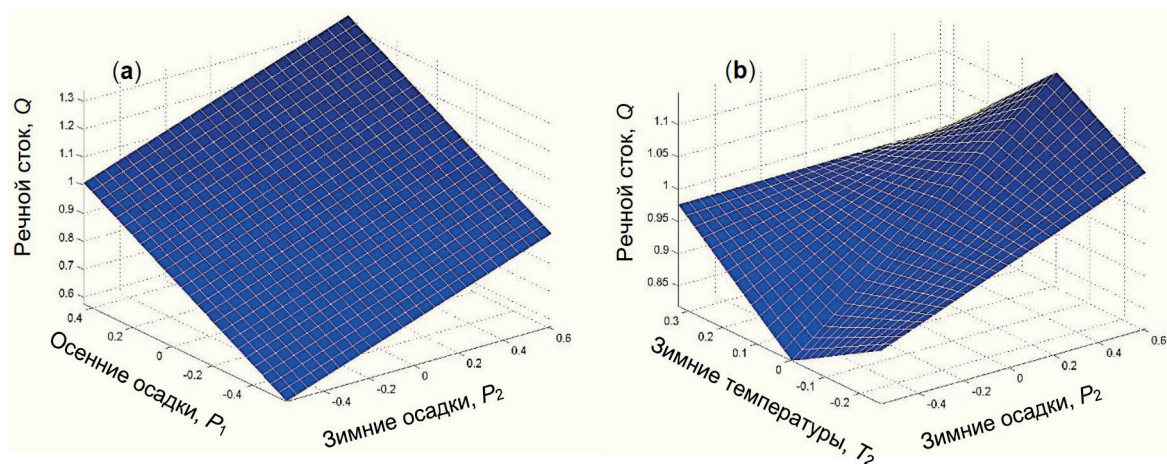


Рис. 1. Зависимость весенних половодий с ледоходом от температур воздуха и осадков за предшествующую осень и зиму согласно модели (3) (показаны отклонения нормированных метеорологических характеристик от их среднелетних). *a* – речной сток Q в апреле как функция осадков P_1 (IX–XI месяцы) и P_2 (XII–III); *b* – речной сток Q в апреле как функция температуры T_2 (XII–III) и осадков P_2

Fig. 1. Dependence of spring floods on air temperature and precipitation for the preceding autumn and winter in (3) (we show the deviations of normalized meteorological characteristics from their long-term averages). *a* – April runoff Q as a function of precipitation P_1 (IX–XI months) and P_2 (XII–III); *b* – April runoff Q as a function of temperature T_2 (XII–III) and precipitation P_2

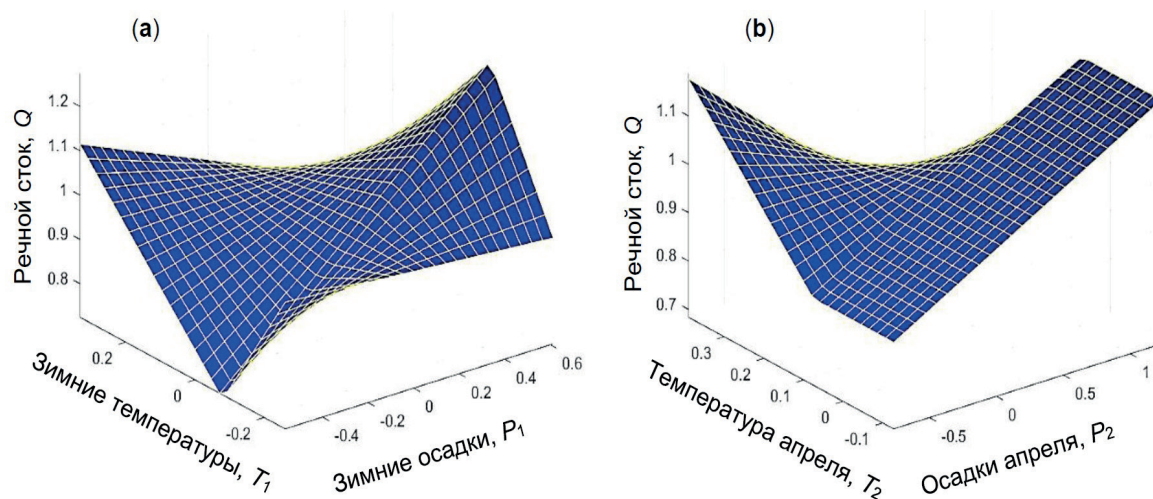


Рис. 2. Зависимость весеннего половодья с ледоходом от температур воздуха и осадков за предшествующую зиму и апрель согласно модели (4) (показаны отклонения нормированных метеорологических характеристик от их среднеголетних). *a* – речной сток Q в апреле как функция T_1 и P_1 за XII–III месяцы; *b* – речной сток Q в апреле как функция T_2 и P_2 за апрель

Fig. 2. Dependence of spring floods on air temperature and precipitation for the preceding winter in (4) (we show the deviations of normalized meteorological characteristics from their long-term averages). *a* – April runoff Q as a function of temperature T_1 and precipitation P_1 for XII–III months; *b* – April runoff Q as a function of temperature T_2 and precipitation P_2 for April

В холодные зимы с $T_1 < -0.2$ и сильно промерзшими почвогрунтами весенняя талая влага в почвы практически не поступает и полностью скатывается в реки. Ее количество определяется постоянной солнечной радиацией и слабо зависит от P_1 .

На рис. 2b при температурах апреля $T_2 > 0.2$ мы опять видим уменьшение речных стоков с ростом осадков. Это может быть связано со значительным альбедо свежевыпавшего снега, уменьшающего количество поглощенной снежным покровом солнечной радиации и, следовательно, количество талой воды. С понижением температуры стоки уменьшаются и при $T_2 < 0.1$ перестают от нее зависеть. Эти стоки увеличиваются при росте осадков P_2 и уменьшенном задержании талой влаги почвогрунтами вследствие задержки оттаивания последних из-за пониженных T_2 .

Таким образом, разработанная мето-

дология ИА/CAM позволила определить сложную зависимость весенних половодий в апреле от метеорологических факторов для горных территорий (рис. 1, 2). Отметим, что используемые в моделях (3), (4) нормированные осадки, температуры и речные стоки легко перевести в стандартные единицы измерений (мм, °C, м³/с) путем умножения на соответствующие среднеголетние характеристики.

Выводы

1. Разработанная методология интеллектуального анализа экспериментальных данных (системно-аналитического моделирования) успешно применена для разработки универсальных аналитических моделей весенних половодий с ледоходом в апреле на 34 реках Алтае-Саянской горной страны.

2. Построенные аналитические модели

половодий характеризуются высоким качеством и адекватно учитывают основные факторы среды, включая ландшафтную структуру водосборных территорий, помесячные изменения метеорологических факторов, площадь и высоту расположения ландшафтов.

3. Выявленные сложные зависимости весенних половодий от месячных осадков и среднемесячных температур воздуха с сентября по апрель являются универсальными, так как характеризуют ежегодные стоки с большого числа речных бассейнов, значительно отличающихся по орографии,

климатическим характеристикам и слагающим их ландшафтам.

4. Упрощенный вариант модели (3) весенних половодий в конкретных речных бассейнах можно использовать для среднесрочных прогнозов половодий по данным метеорологических наблюдений за сентябрь-март, получая высокое значение критерия Нэша-Сатклиффа $NSE=0.77$. Качество прогнозов может быть далее улучшено по модели (4) при учете стандартных метеорологических прогнозов температур воздуха и осадков на апрель месяц.

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 разработки методологии интеллектуального анализ совместно с государственным заданием 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

Алексеев Д.С., Щекочихин О.В. Технологии интеллектуального анализа данных. Учебник для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 176 с.

Кирста Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // Мир науки, культуры, образования. 2011. № 3 (28). С. 330–337.

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.

Танащенко А.А., Путилин А.Ф., Артамонова В.С. Экологические аспекты эрозийных процессов: Аналит. обзор. Ин-т почвоведения и агрохимии / Науч. ред. И.М. Гаджиев. Новосибирск, 1999. 89 с.

Funes A., Dasso A. Methods and Techniques of Data Mining. In: Encyclopedia of Information Science and Technology, Fifth Edition, edited by Mehdi Khosrow-Pour D.B.A. Hershey, PA: IGI Global, 2021. P. 749–767.

Kirsta Y.B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems // *Ecological Modelling*. 2006a. Vol. 191. P. 315–330.

Kirsta Y.B. System-analytical modelling – Part II: Wheat biotime run and yield formation. Agroclimatic potential, Le Chatelier principle, changes in agroclimatic potential and climate in Russia and the U.S. // *Ecological Modelling*. 2006b. Vol. 191. P. 331–345.

Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V. Spatial year-ahead forecast of air temperature and precipitation in large mountain areas // *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. P. 1044.

Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V., Puzanov A.V. The Forecast of Climate Changes in Altai-Sayan Mountain Country till 2030 // *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2534. P. 114–117.

Kirsta Y.B., Puzanov A.V. System-Analytical Modeling of Water Quality for Mountain River Runoff // Pandey B.W., Anand S. (Eds). *Water Science and Sustainability / Sustainable Development Goals Series*. Springer, Nature. 2021. Chapter 7.

Kirsta Y.B., Puzanov A.V. System-analytical modelling: 1. Development of regional models for mountain river runoff // *EJMCA*. 2020. Vol. 8. No 2. P. 69–85.

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. Issue 3. P. 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). P. 1080.

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. The influence of winter-spring temperatures and precipitation on the spring flood wave // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2022. Vol. 10. Issue 2. P. 4–10.

Kirsta Y.B.; Lovtskaya O.V. Good-quality long-term forecast of spring-summer flood runoff for mountain rivers. *Water Resour. Manage*. 2021. Vol.35. P. 811–825.

Klijn F., Lang M., Bakonyi P. Integrated flood risk management: Novel approaches for an uncertain future. *Water Secur*. 2022. Vol. 17. P. 100125.

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.

Li Z., Lyu S., Meng X. Changes in climate and snow cover and their synergistic influence on spring runoff in the source region of the Yellow River. *Sci. Total Environ*. 2021. Vol. 799. P. 149503.

Ma Z., Yan L. Data modeling and querying with fuzzy sets: A systematic survey // *Fuzzy Sets and Systems*. 2022. Vol. 445. P. 147–183.

References

Alekseev D.S., Shchekochihin O.V. Tekhnologii intellektual'nogo analiza dannyh [Data

mining technologies]. Uchebnik dlya vuzov. Sankt-Peterburg: Lan', 2022. 176 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., 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., 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).

Tanasienko A.A., Putilin A.F., Artamonova V.S. Ekologicheskie aspekty erozionnykh processov: Analit. Obzor [Environmental Aspects of Erosion Processes. An Analytical Review] / Nauch. red. I.M. Gadzhiev. Novosibirsk, 1999. 89 p. (in Russian).

Funes A., Dasso A. Methods and Techniques of Data Mining. In: Encyclopedia of Information Science and Technology, Fifth Edition, edited by Mehdi Khosrow-Pour D.B.A. Hershey, PA: IGI Global, 2021. P. 749–767.

Kirsta Y.B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems // Ecological Modelling. 2006a. Vol. 191. P. 315–330.

Kirsta Y.B. System-analytical modelling – Part II: Wheat biotime run and yield formation. Agroclimatic potential, Le Chatelier principle, changes in agroclimatic potential and climate in Russia and the U.S. // Ecological Modelling. 2006b. Vol. 191. P. 331–345.

Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V. Spatial year-ahead forecast of air temperature and precipitation in large mountain areas // SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. P. 1044.

Kirsta Y.B., Lovtskaya O.V., Puzanov A.V. The Forecast of Climate Changes in Altai-Sayan Mountain Country till 2030 // CEUR Workshop Proceedings. 2019. Vol. 2534. P. 114–117.

Kirsta Y.B., Puzanov A.V. System-Analytical Modeling of Water Quality for Mountain River Runoff // Pandey B.W., Anand S. (Eds). Water Science and Sustainability / Sustainable Development Goals Series. Springer, Nature. 2021. Chapter 7.

Kirsta Y.B., Puzanov A.V. System-analytical modelling: 1. Development of regional models for mountain river runoff // EJMCA. 2020. Vol. 8. No 2. P. 69–85.

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. Issue 3. P. 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). P. 1080.

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. The influence of winter-spring temperatures and precipitation on the spring flood wave // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2022. Vol. 10. Issue 2. P. 4–10.

Kirsta Y.B.; Lovtskaya O.V. Good-quality long-term forecast of spring-summer flood runoff for mountain rivers. Water Resour. Manage. 2021. Vol.35. P. 811–825.

Klijn F., Lang M., Bakonyi P. Integrated flood risk management: Novel approaches for an uncertain future. Water Secur. 2022. Vol. 17. P. 100125.

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.

Li Z., Lyu S., Meng X. Changes in climate and snow cover and their synergistic influence on spring runoff in the source region of the Yellow River. Sci. Total Environ. 2021. Vol. 799. P. 149503.

Ma Z., Yan L. Data modeling and querying with fuzzy sets: A systematic survey // Fuzzy Sets and Systems. 2022. Vol. 445. P. 147–183.

INFLUENCING METEOROLOGICAL FACTORS ON SPRING FLOODS OF MOUNTAIN RIVERS

Y.B. Kirsta, I.A. Troshkova

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul

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

The influence of environmental factors on spring (April) floods of 34 medium and small rivers in the Altai-Sayan mountain country was studied. Using the developed methodology for intelligent analysis of experimental data (system analytical modeling), we developed an analytical models and revealed a complex dependence of floods on monthly precipitation and average monthly air temperatures from September to April, as well as the height and landscape structure of the river basins. We characterized changing meteorological factors via a percentage of their long-term average values that allowed to unify their monthly and long-term dynamics throughout the country. Data on the relief and landscape structure of river basins were calculated by ArcGIS 10.2 using landscape maps of the territory. Model development and quantification of environmental factor influence on floods were carried out by solving an inverse mathematical problem using about 2000 values of river flows observed in 1951–2020. The high quality, simplicity and universality of the models enable us to use them in forecasting spring floods of mountain rivers.

Keywords: spring flood; mountain rivers; meteorological factors; landscapes; intelligent analysis; Altai; Sayan.

Received October 21, 2023. Accepted: November 22, 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, 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.