

УДК 556.161:556.166

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА РЕКИ ЧУМЫШ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Самойлова Светлана Юрьевна¹,
bastet05@list.ru

Ловцкая Ольга Вольфовна¹,
lov@iwer.ru

Кудишин Алексей Васильевич¹,
avkudishin@yandex.ru

Арнаут Дарья Васильевна²,
arnautdv@mail.ru

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН,
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

² Алтайский Государственный Университет,
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

Актуальность работы связана с необходимостью совершенствования методик среднесрочных прогнозов половодья в условиях недостаточности гидрометеорологической информации.

Цель: оценка возможности использования пространственно распределенных моделей атмосферных осадков для прогнозирования объема стока половодья; разработка стохастических моделей для прогноза объема и максимальных расходов половодья с использованием данных наблюдений сети Росгидромета и распределенных атмосферных осадков по данным реанализа и данных дистанционного зондирования земли высокого пространственного разрешения.

Методы: геоинформационный, комплексный географо-гидрометеорологический анализ, статистические методы (корреляционный и регрессионный анализ).

Результаты. Выполнена оценка атмосферного увлажнения бассейна р. Чумыш с использованием данных пространственно распределенных моделей атмосферных осадков и материалов наблюдений на метеорологических станциях; проанализована связь сумм осадков с объемом стока и максимальными расходами половодья. Сравнительная оценка полученных зависимостей позволила выбрать наиболее значимые предикторы для построения уравнения множественной линейной регрессии. Разработана статистическая модель для прогноза объема и максимальных расходов половодья реки Чумыш в створе пгт Тальменка с использованием данных наблюдений сети Росгидромета и реанализов высокого пространственного разрешения.

Ключевые слова:

Река Чумыш, зимние осадки, половодье, слой стока, максимальные расходы, статистическая модель множественной регрессии.

Введение

В последние десятилетия на реках Сибири отмечается увеличение повторяемости опасных гидрологических явлений, связанных с половодьями и дождевыми паводками. Эта тенденция будет, вероятно, сохраняться в будущем, что связано с климатическими изменениями, антропогенным освоением территорий в зонах затопления и подтопления и с недостаточной надежностью прогнозов опасных гидрологических явлений [1]. В связи с этим совершенствование методик прогнозов стока и максимальных уровней половодья различной заблаговременности является одной из важных задач в развитии гидрологической науки.

В условиях длительной зимы основным фактором формирования половодья является снежный покров [2, 3]. Редкая сеть метеостанций на водосборах сибирских рек не позволяет интерполировать данные о снегозапасах на всю территорию бассейнов, особенно это касается предгорных и горных районов с крайне неоднородными ландшафтно-климатическими условиями. Одним из способов восполнения отсутствующей метеорологической информации для гидрологиче-

ских расчетов является использование мезомасштабных и глобальных моделей атмосферы [4], данных дистанционного зондирования земли (ДДЗЗ) [5–7], реанализов высокого пространственно-временного разрешения [8–10].

Традиционно долгосрочные прогнозы половодья строятся на разного рода эмпирических воднобалансовых зависимостях весеннего стока от запаса воды в снежном покрове перед началом снеготаяния, последующих осадков и характеристик водопоглотительной способности бассейна в конце зимы [2]. На практике этот подход реализуется в виде различных физико-статистических моделей [10–16]. В качестве первичных предикторов в подобных моделях используется имеющаяся гидрометеорологическая информация. В работах [17–19] представлен опыт использования данных реанализа в качестве предикторов прогнозных физико-статистических моделей с сосредоточенными параметрами для весеннего стока.

В данной работе нами была выполнена оценка пространственно распределенных атмосферных осадков по данным реанализа и ДДЗЗ и проанализирована возможность их использования для прогнозирования

объема стока и максимальных расходов половодья на правом притоке первого порядка Верхней Оби – р. Чумыш в замыкающем створе пгт Тальменка. Разработана статистическая модель множественной линейной регрессии для прогноза объема и максимальных расходов половодья с использованием данных наблюдений сети ГМС и пространственно распределенных моделей осадков.

Объект исследования

Река Чумыш является правым притоком I порядка р. Обь, имеет длину 644 км и площадь бассейна 23900 км². Река образуется при слиянии рек Томь–Чумыш и Кара–Чумыш, берущих начало на восточном склоне Салаирского кряжа. Бассейн расположен в пределах юго-западной части Салаирского кряжа и Предсалаирской равнины, Бийско-Чумышской возвышенно-

сти. Абсолютные высоты бассейна в водораздельной части не превышают 600 м. Климат района умеренно континентальный. Средняя годовая температура по данным ГМС Тогул 0,5 °С, самый холодный месяц – январь (–17,5 °С), самый теплый – июль (18,4 °С). Переход среднесуточной температуры через 0 °С в среднем наблюдается во второй декаде апреля.

Несмотря на то, что большая часть бассейна находится на равнине, Салаирский кряж является орографическим барьером на пути юго-западного переноса воздушных масс, поэтому распределение атмосферных осадков по территории неравномерно. Среднее количество осадков на метеостанциях в лесостепной части бассейна – 450–500 мм, в низкогорной лесной части – 600–800 мм, при этом на зимний период (с ноября по март) приходится только 30–40 % осадков.

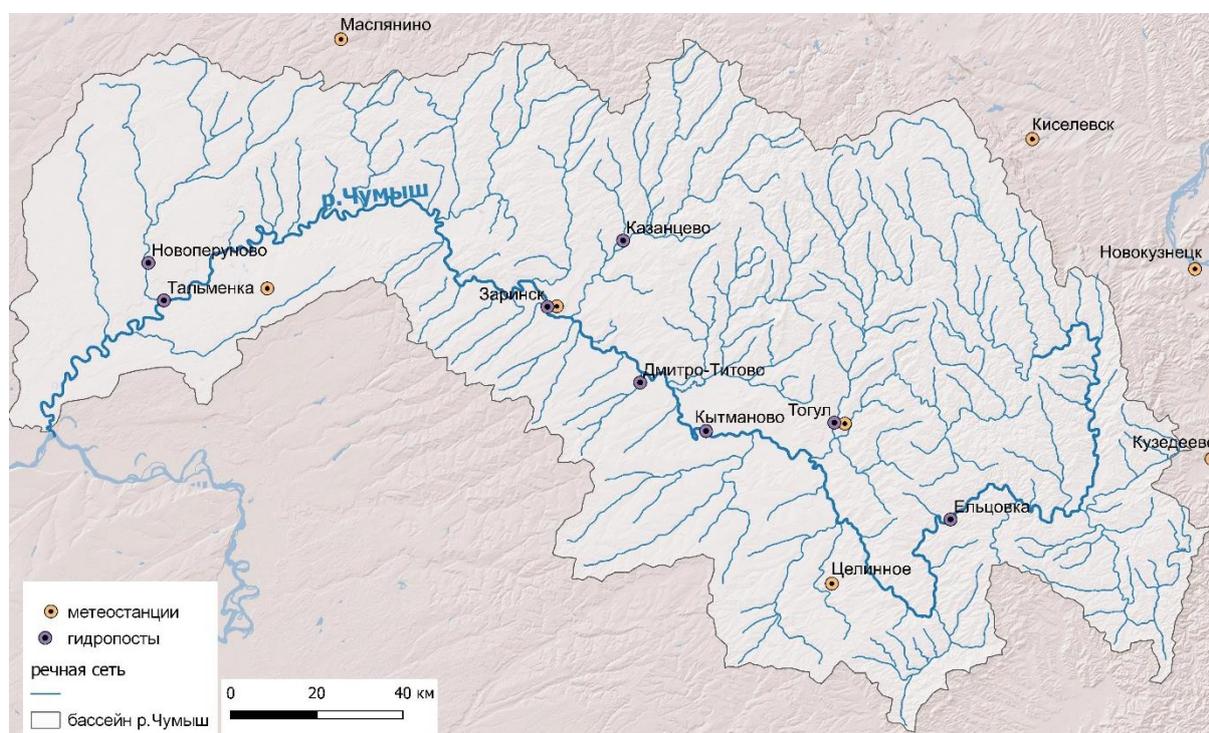


Рис. 1. Бассейн р. Чумыш. Метеорологическая и гидрологическая изученность
Fig. 1. The Chumysh river basin. Meteorological and hydrological exploration

В качестве замыкающего принят гидрологический пост в пгт Тальменка, расположенный в 74 км от устья, с площадью водосбора 20600 км² (86 % от общей площади речного бассейна). Наблюдения на посту ведутся с 1943 г. Питание реки преимущественно снеговое (70–80 % годового стока). Основной фазой водного режима реки является половодье, во время которого проходит от 49 до 81 % годового стока (рис. 2) [20].

Половодье начинается, как правило, в первой декаде апреля и длится около двух месяцев, достигая максимума в апреле–мае. Сток реки отличается значительной внутри- и межгодовой изменчивостью. Максимальные расходы в маловодные и многоводные годы могут различаться в 5–7 раз. Средний многолет-

ний расход воды 130,2 м³/с, максимальный расход 2570 м³/с, минимальный 11,3 м³/с.

Исходные данные и методы исследования

Построение прогнозной модели

Для разработки прогноза объема стока и максимальных расходов половодья р. Чумыш реализована стандартная многофакторная статистическая модель (модель множественной линейной регрессии) [21]. В качестве предикторов использовались гидрометеорологические параметры, выбранные исходя из физических представлений о закономерностях формирования стока половодья. Отбор значимых предикторов осуществлялся путем анализа их корреляционной связи со слоем стока и максимальными расходами.

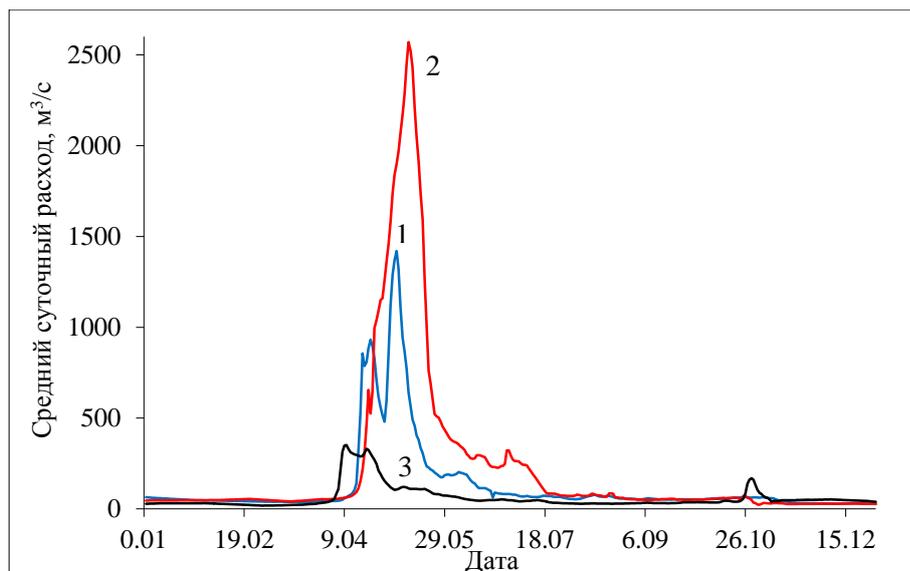


Рис. 2. Внутригодовое распределение стока: р. Чумыш – пгт Тальменка: 1 – год, близкий к среднему (1986), 2 – год, близкий к многоводному (1966), 3 – год, близкий к маловодному (2012)

Fig. 2. Annual distribution of runoff at gauge: the Chumysh river – Talmenka settlement: 1 – close to average year (1986), 2 – close to high-water year (1966), 3 – close to low-water year (2012)

Выбор предикторов для построения уравнения выполнялся пошаговой регрессией по мере уменьшения их влияния на сток. Для исключения эффекта мультиколлинеарности при наличии дублирующих факторов выбирались наиболее значимый, остальные исключались. Количество предикторов в уравнении ограничено критерием $m/N \geq 10$, где m – число предикторов, N – длина ряда [22].

Оценка качества построенных уравнений проводилась на зависимом материале при помощи стандартного показателя отклонения среднеквадратической погрешности прогнозов к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины S/σ , широко используемого в отечественной практике гидрологических прогнозов [23], где S и σ рассчитывались по формулам:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2},$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (1)$$

Y_i – фактическое значение гидрологической характеристики; \bar{Y} – среднее значение гидрологической характеристики; \tilde{Y}_i – расчетное значение, полученное при помощи модели.

Дополнительно оценивался показатель Нэша–Сатклиффа, также широко используемый в гидрологической практике [23–25] и рассчитываемый по формуле:

$$NSE = 1 - \frac{S^2}{\sigma^2} \left(\frac{n}{n-1} \right). \quad (2)$$

Исходные данные и их обработка

Данные пространственно распределенных моделей атмосферных осадков. ДДЗЗ и реанализы, получившие распространение с конца 1970-х гг., в насто-

ящее время являются дополнительными и/или альтернативными источниками пространственно распределенных метеоданных [26–29]. Доступные наборы данных об осадках с координатной привязкой различаются по размеру области покрытия, пространственному и временному разрешению, различаются источниками и методами их получения. В то время как глобальные и континентальные наборы данных предоставляют информацию об осадках в большой области и охватывают большой период времени, в них отсутствует высокое пространственное разрешение, необходимое для исследований в масштабе региона или водосбора. Данные высокого разрешения обычно доступны только на уровне страны или охватывают определенный географический регион [30].

Следует отметить недостаточный и нестабильный уровень точности всех наборов данных по осадкам. В зависимости от сезона и местоположения станции может наблюдаться как завышение, так и занижение количества осадков. Имеет место существенная ошибка в определении факта наличия осадков. Осадки зимой в средних широтах часто упускаются или оцениваются с большой неопределенностью [19].

В данной работе авторами не ставилась задача установления соответствия данных реанализов и материалов наблюдений сети ГМС. Этот вопрос подробно рассмотрен в работах [19, 31–33], в том числе применительно к исследуемой территории.

Для использования в гидрологических исследованиях и моделях необходимо предварительно оценить качество информации, получаемой из различных источников.

Из множества доступных данных для определения количества осадков, выпавших на водосборе, нами были выбраны следующие:

1. Сумма атмосферных осадков Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды из реанали-

- за ERA-5 ECMWF высокого разрешения ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) за 1979–2019 гг. [34].
2. Скорректированные по материалам наблюдений на метеостанциях данные ERA-5 ECMWF (CRSS – Corrected Reanalysis for South Siberia), полученные в Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН) [33].
 3. Данные метеорологического реанализа EWMBI с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ за 1980–2016 гг. (проект ISIMIP2b [35]).
 4. Данные PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks – Climate Data Record на сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ для полосы $60^\circ\text{N}–60^\circ\text{S}$ за период с 1.01.1983 г. по настоящее время [36].

Анализируемые данные поставляются в формате NetCDF, что позволяет обработать их по единому алгоритму. Геоинформационные системы ArcGIS, QGIS имеют встроенную поддержку формата netCDF и обеспечивают быстрый доступ к данным, не требуя их конвертирования. Для использования данных в модели прогноза объема и максимальных расходов половодья разработан алгоритм расчета временной

изменчивости осадков в целом по водосборному бассейну.

Алгоритм реализован в виде следующих блоков:

1. С использованием инструмента Create FishNet набора инструментов DataManagement Tools (Feature Class) построена сетка с размером ячейки, соответствующим набору данных модели атмосферных осадков (рис. 3).
2. Вычислены площади попадающих в бассейн ячеек (рис. 3).
3. С использованием инструмента «Представление таблицы NetCDF» (Make NetCDF Table View) набора инструментов «Инструменты Многомерных данных» (ArcGIS) для водосбора р. Чумыш созданы таблицы данных следующей структуры: дата, координаты (в десятичных градусах) центра ячейки сетки, количество осадков.
4. Таблицы, полученные на этапах 2 и 3, объединены по ключевым полям: координатам центров ячеек сетки.
5. Рассчитано средневзвешенное по площади количество осадков, выпадающих на территорию бассейна.

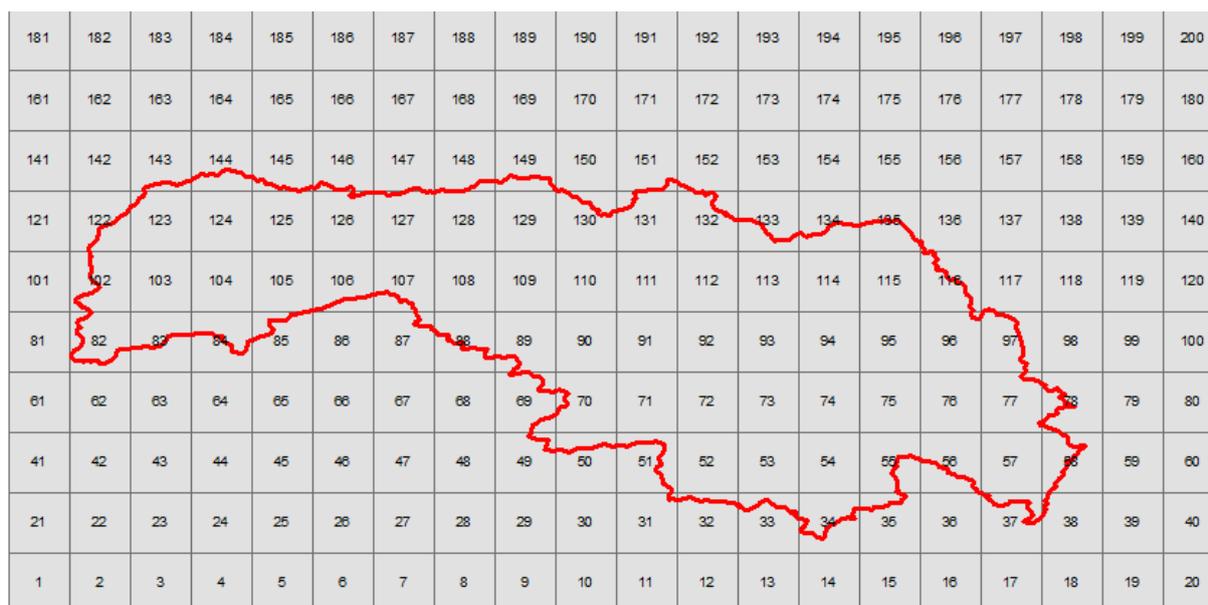


Рис. 3. Расчетная сетка для бассейна р. Чумыш в проекции WGS84 (размер ячейки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$)

Fig. 3. Calculation grid for the Chumysh river basin in WGS84 projection (cells size is $0,25^\circ \times 0,25^\circ$)

На рис. 4, а–е показаны результаты сравнения сумм месячных значений количества осадков, выпавших на водосбор р. Чумыш, рассчитанных по перечисленным источникам.

Рис. 4, б–е иллюстрируют хорошую связь между данными, полученными из различных источников, с коэффициентами детерминации (R^2) от 0,86 до 0,9. Рис. 4, а ожидаемо показывает коэффициент детерминации, близкий к 1, т. к. используемые данные получены из одного источника. Угол наклона линии тренда изменяется от 0,73 (рис. 4, в) до 0,97 (рис. 4, е), что свидетельствует о близких значениях исследуемых данных, тем не менее меньшие значения угла

наклона линии тренда характерны для пар, содержащих исходные значения реанализа ERA-5 ECMWF.

Данные гидрометеорологической сети. В качестве потенциальных предикторов для составления прогнозной физико-стохастической модели рассмотрены 54 показателя, характеризующие термический режим и атмосферное увлажнение бассейна с декадным и месячным разрешением, полученные на метеостанциях, расположенных в пределах бассейна р. Чумыш либо в непосредственной близости от него и имеющих непрерывный ряд наблюдений за период 1980–2018 гг.: Тальменка, Заринск, Тогул, Целинное, Троицкое, Маслянино, Кузедеево и Новокузнецк (рис. 1).

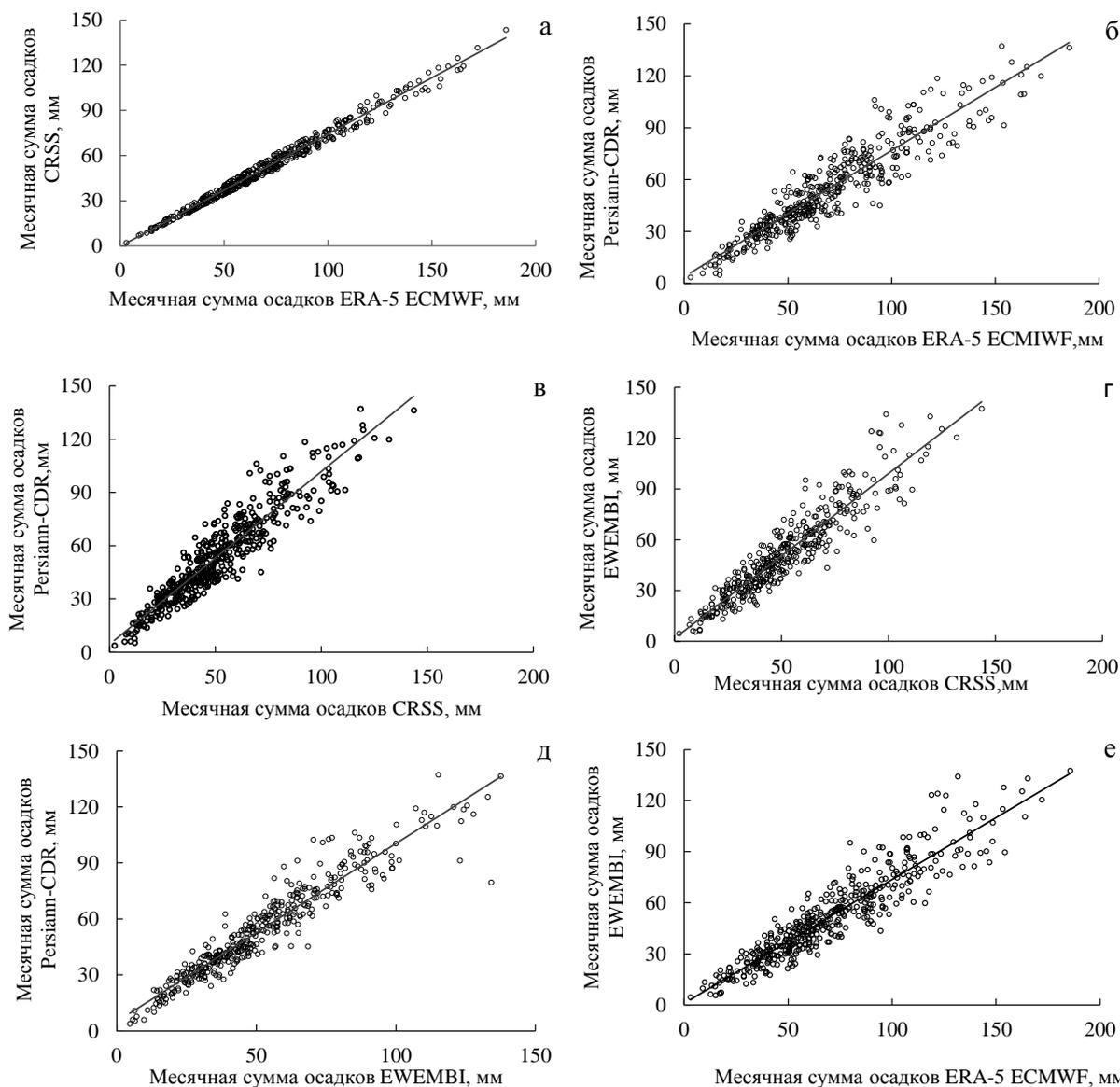


Рис. 4. Сравнение месячного количества осадков для бассейна р. Чумыш, вычисленного по данным ДЗЗ и реанализов: а) $y=0,75x-0,26$, $R^2=0,986$, где x – месячная сумма осадков ERA-5 ECMWF, y – месячная сумма осадков CRSS; б) $y=0,73x+3,99$, $R^2=0,867$, где x – месячная сумма осадков ERA-5 ECMIWF, y – месячная сумма осадков Persiann-CDR; в) $y=0,97x+4,44$, $R^2=0,872$, x – месячная сумма осадков CRSS, y – месячная сумма осадков Persiann-CDR; г) $y=0,97x+1,65$, $R^2=0,867$, x – месячная сумма осадков CRSS, y – месячная сумма осадков EWEMBI; д) $y=0,95x+4,99$, $R^2=0,905$, x – месячная сумма осадков EWEMBI, y – месячная сумма осадков Persiann-CDR; е) $y=0,73x+1,01$, $R^2=0,865$, x – месячная сумма осадков ERA-5 ECMWF, y – месячная сумма осадков EWEMBI; R^2 – коэффициент детерминации

Fig. 4. Comparison of monthly precipitation for the Chumysh river basin calculated from remote sensing data and reanalysis а) $y=0,75x-0,26$, $R^2=0,986$, where x is the monthly precipitation ERA-5 ECMWF, y is the monthly precipitation CRSS; б) $y=0,73x+3,99$, $R^2=0,867$, where x is the monthly precipitation ERA-5 ECMIWF, y is the monthly precipitation Persiann-CDR; в) $y=0,97x+4,44$, $R^2=0,872$, where x is the monthly precipitation CRSS, y is the monthly precipitation Persiann-CDR; г) $y=0,97x+1,65$, $R^2=0,867$, where x is the monthly precipitation CRSS, y is the monthly precipitation EWEMBI; д) $y=0,95x+4,99$, $R^2=0,905$, where x is the monthly precipitation EWEMBI, y is the monthly precipitation Persiann-CDR; е) $y=0,73x+1,01$, $R^2=0,865$, where x is the monthly precipitation ERA-5 ECMWF, y is the monthly precipitation EWEMBI; R^2 is the coefficient of determination

Расчет слоя стока и максимальных расходов половодья выполнен на основе данных о расходах воды р. Чумыш в створе пгт Тальменка с суточным разрешением за март–июль. Для характеристики меженного стока за предшествующий осенне-зимний период использовались средние месячные расходы воды с ок-

тября по март. Гидрологические характеристики половодья (сроки, слой стока, максимальный среднесуточный расход) за период с 1980–2018 гг. определялись стандартными методами при помощи анализа комплексных графиков, включающих гидрографы стока половодья по гидропосту в пгт Тальменка

(р. Чумыш) и графики суточного хода температуры и осадков по репрезентативной метеостанции ГМС Тогул. Для исключения влияния жидких осадков в период половодья для каждого года отдельно рассчитан слой талого стока, определенный путем «срезки» дождевых паводков на спаде половодья (осадки, выпадающие до окончания снеготаяния, включались в талый сток, поскольку условия их стекания схожи).

Результаты и обсуждение

Выбор предикторов для оценки зимних осадков в бассейне р. Чумыш

Как указывалось выше, главным предиктором при разработке прогноза слоя стока и максимальных расходов половодья являются запасы воды, накопленные в речном бассейне за предшествующий зимний период. Поэтому на первом этапе был выполнен отбор наиболее значимых предикторов, характеризующих основной стокоформирующий фактор. Для этого была построена и проанализирована корреляционная матрица, включающая следующие предикторы: пространственно распределенные зимние осадки, полученные в результате обработки ДДЗЗ и реанализов высокого разрешения; данные гидрометеорологической сети, включая следующие показатели:

- суммы зимних осадков по данным метеостанций Тальменка, Тогул, Заринск, Целинное, Троицкое, Маслянино, Кузедеево, Новокузнецк;
- максимальные запасы воды в снеге по данным метеостанций Тальменка, Тогул, Маслянино, Кузедеево.

Дата максимальных снегозапасов определялась для каждого года, при этом использовались данные лесных снегомерных маршрутов, для которых метелевый перенос характерен в меньшей степени, чем для полевых.

Под суммой зимних осадков подразумеваются осадки за период с 1 ноября по 31 марта включительно. Временные рамки ограничены наличием пространственно распределенных данных и охватывали гидрологические годы с 1979–1980 по 2017–2018.

В качестве предиктантов взяты слой стока половодья (общий и со «срезкой» дождевых паводков, характеризующий талую составляющую гидрографа); максимальные расходы половодья в створе р. Чумыш – пгт Тальменка.

Результаты корреляционного анализа зимних осадков и стока половодья представлены в табл. 1. Проверка достоверности коэффициентов корреляции выполнена по критерию Стьюдента.

Гипотеза о наличии корреляции проверяется на основании t -распределения с $(n-2)$ степенями свободы по формуле

$$t_{\text{расч}} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}.$$

При $t_{\text{расч}} > t_{n-2, \alpha}$ принимается, что коэффициент корреляции значимо отличается от нуля. В нашем случае $(n-2)=37$, $\alpha=0,05$, $t_{37,0,05}=2,026$.

Расчетные значения t в табл. 1 приведены через дробь.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции r связи слоя стока и максимальных расходов половодья (р. Чумыш – пгт Тальменка) с суммой зимних осадков

Table 1. Correlation coefficients r for the relation of runoff depth and maximum discharge of flood (Chumysh river – Talmenka settlement) with total winter precipitation

| Предикторы/Predictors | | Предиктанты/Predictants | | |
|--|--|--|--|---|
| | | Слой стока половодья, мм Runoff depth, mm | Слой стока половодья со «срезкой» паводков, мм Runoff depth with flood peak reduction, mm | Максимальный среднесуточный расход, м ³ /с Maximum average daily discharge, m ³ /s |
| Сумма зимних осадков (XI–III) по данным метеостанций, мм Total winter precipitation (XI–III) according to weather stations, mm | Тальменка/Talmenka | 0,46/3,15 | 0,6/4,56 | 0,43/2,9 |
| | Заринск/Zarinsk | 0,34/2,2 | 0,54/3,9 | 0,35/2,27 |
| | Тогул/Togul | 0,53/3,8 | 0,61/4,68 | 0,33/2,13 |
| | Целинное/Tselinnoe | 0,31/1,98 | 0,4/2,65 | 0,13/0,8 |
| | Троицкое/Troitskoe | 0,47/3,24 | 0,57/4,22 | 0,43/2,9 |
| | Маслянино/Maslyanino | 0,44/2,98 | 0,6/4,56 | 0,36/2,35 |
| | Кузедеево/Kuzedeevo | 0,4/2,65 | 0,48/3,33 | 0,17/1,05 |
| Максимальные запасы воды в снежном покрове, мм Maximum water reserves in snow cover, mm | Новокузнецк/Novokuznetsk | 0,43/2,90 | 0,51/3,61 | 0,24/1,5 |
| | Маслянино/Maslyanino | 0,46/3,15 | 0,59/4,44 | 0,45/3,07 |
| | Тальменка/Talmenka | 0,41/2,73 | 0,57/4,22 | 0,36/2,35 |
| | Тогул/Togul | 0,44/2,98 | 0,51/3,61 | 0,39/2,58 |
| Сумма зимних осадков (XI–III) по распределенным моделям, мм Total winter precipitation (XI–III) according to distributed models, mm | Кузедеево/Kuzedeevo | 0,4/2,65 | 0,4/2,65 | 0,35/2,27 |
| | ERA-5 ECMWF (исходные)/(source) | 0,55/4,01 | 0,67/5,49 | 0,5/3,51 |
| | ERA-5 ECMWF (скорректированные)/(adjusted) | 0,55/4,01 | 0,66/5,34 | 0,5/3,51 |
| | Persiann-CDR | 0,51/3,61 | 0,67/5,49 | 0,39/2,58 |
| | EWEMBI | 0,49/3,42 | 0,63/4,93 | 0,41/2,73 |

Примечания: 1. Значения коэффициентов корреляции, соответствующие «заметной» и «тесной» связи (коэффициент корреляции более 0,5), выделены курсивом. 2. Значения t -критерия для коэффициентов корреляции r приведены через дробь «/».

Notes: 1. Correlation coefficients corresponding to «significant» and «strong» relationships (the correlation coefficient exceeds 0,5) are given in italics. 2. The values of the t -test for the correlation coefficients r are entered through the fraction «/».

Степень тесноты связи по результатам расчета коэффициентов корреляции оценивалась по шкале Чеддока (Chaddock Scale) (табл. 2) [37].

Таблица 2. Качественная оценка тесноты связи по результатам расчета коэффициентов корреляции Пирсона (r)

Table 2. Qualitative interpretation of strength of association for Pearson correlation coefficient (r)

| Коэффициент корреляции Correlation | Теснота связи Strength of association |
|---------------------------------------|--|
| 0,1...0,3 | слабая/weak |
| 0,3...0,5 | умеренная/moderate |
| 0,5...0,7 | заметная/significant |
| 0,7...0,9 | тесная/strong |
| 0,9...0,99 | очень тесная/very strong |

Корреляционный анализ показал:

- «срезка» дождевых паводков ожидаемо улучшила качество связи слоя стока и зимних осадков;
- распределенные данные лучше коррелируют со стоком половодья, поэтому их использование в качестве предиктора для построения прогнозной модели предпочтительнее;
- объем стока половодья в целом лучше коррелирует с суммой зимних осадков, чем максимальные расходы. Это ожидаемо, поскольку на формирование максимальных расходов дополнительно

оказывает значительное влияние интенсивность снеготаяния в бассейне и, как следствие, скорость поступления талых вод в речную сеть.

Разработка модели множественной линейной регрессии для прогноза слоя стока и максимальных расходов половодья на р. Чумыш – пгт Тальменка

Известно, что на сток половодья, помимо снегозапасов, влияют такие факторы, как жидкие осадки, выпавшие в период половодья, а также группа факторов, определяющих водопоглощающую емкость бассейна [2, 10, 38]. Максимальные расходы воды формируются в основном за счет тех же факторов, однако на них в значительной степени оказывает влияние интенсивность и ход снеготаяния в бассейне и, как следствие, скорость поступления талых вод в речную сеть.

Как правило, между максимальными расходами воды и слоем стока существует достаточно тесная связь, поэтому долгосрочный прогноз максимального расхода воды строится на основе долгосрочного стока за половодье и реализуется в виде зависимости вида $Q_{max} = f(Y)$, где Q_{max} – максимальный расход воды, а Y – ожидаемый сток за период половодья [2]. Для оценки применимости данного подхода к р. Чумыш проанализирована связь максимальных расходов Q_{max} и слоя стока половодья Y (рис. 5).

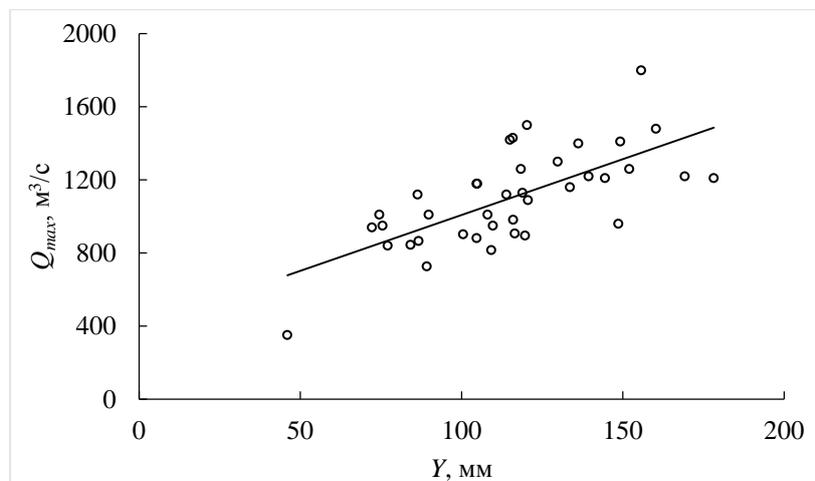


Рис. 5. Зависимость максимального расхода воды от стока за период половодья р. Чумыш – пгт Тальменка ($y=6,11x+369,9$, где x – слой стока половодья (Y , мм); y – максимальный расход (Q_{max} , m^3/c), коэффициент детерминации $R^2=0,47$)

Fig. 5. Flood runoff dependence of maximum discharge at the Chumysh river – Talmenka settlement ($y=6,11x+369,9$, where x is the flood runoff depth (Y , mm); y is the maximum water discharge (Q_{max} , m^3/s), the coefficient of determination $R^2=0,47$)

Как видно из рис. 5, коэффициент детерминации R^2 , характеризующий зависимость, составляет 0,47, что свидетельствует о невозможности ее использования для прогноза максимальных расходов. Очевидно, главные факторы, определяющие формирование стока и максимальных расходов, будут различными. Таким образом, разработано два уравнения множественной линейной регрессии – для прогноза объема стока и максимальных расходов за половодье.

В качестве предикторов для построения прогнозных уравнений рассматривались метеорологические данные, прямо или косвенно характеризующие весеннее увлажнение и состояние грунтов в бассейне. В качестве индекса предзимнего увлажнения бассейнов рек часто применяется паводочный осенний либо осенне-зимний сток [12, 13, 38, 39], в данном случае – средние месячные расходы воды за октябрь и ноябрь в створе р. Чумыш – пгт Тальменка. Для характери-

стики осадков периода половодья так же, как и для зимних осадков, использовались данные метеостанций и распределенных моделей.

Таким образом, на этапе отбора значимых предикторов построена и проанализирована корреляционная матрица, состоящая из 54 предикторов и включающая, помимо распределенных данных о зимних осадках, следующие показатели:

- 1) средние месячные температуры воздуха на репрезентативной метеостанции (ГМС Тогул) с начала половодья до окончания снеготаяния (апрель, апрель–май) и за октябрь предыдущего года, а также среднесезонные температуры за зимний период (ноябрь–март);
- 2) суммы осадков за период половодья (отдельно за апрель и за апрель–май), а также за октябрь предыдущего года по данным метеонаблюдений (ГМС Тальменка, Тогул, Заринск, Целинное, Троицкое, Новокузнецк, Маслянино, Кузедеево);
- 3) суммы осадков за аналогичные периоды, рассчитанные по распределенным моделям ERA-5 ECMWF, Persiann-CDR, EWEMBI, CRSS;
- 4) средний месячный расход воды р. Чумыш – пгт Тальменка за октябрь и ноябрь.

Для оценки *слоя стока половодья* значимыми предикторами являются (в порядке убывания значимости):

- сумма осадков за апрель–май по ГМС Тогул, $r=0,59$ (что выше, чем по данным распределенных моделей, имеющих $r=0,42-0,51$);
- сумма зимних осадков (XI–III) по данным реанализа ERA-5 ECMWF, $r=0,55$;
- средний расход воды р. Чумыш за октябрь ($r=0,49$).

Для оценки *максимальных расходов* использованы следующие предикторы (также в порядке убывания значимости):

- средний расход воды р. Чумыш за октябрь ($r=0,54$);
- сумма зимних осадков (XI–III) по данным реанализа CRSS ($r=0,5$);
- сумма осадков за апрель–май по ГМС Тальменка ($r=0,34$).

«Заметная» связь слоя стока с осадками апреля и мая (табл. 2) свидетельствует о том, что источником питания р. Чумыш в период половодья выступают дождевые и талые воды, причем степень их влияния на объем половодья примерно одинакова. Третий предиктор – среднемесячный расход воды за октябрь, перед ледоставом, является индикатором влагонасыщенности бассейна, а также характеризует грунтовое питание реки.

Таким образом, наряду с зимне-весенними осадками, одним из определяющих факторов формирования половодья на р. Чумыш является состояние почвогрунтов в бассейне (в первую очередь, их увлажнение), которое в конечном счете обуславливает его водопоглощающую емкость и, как следствие, коэффициенты талого стока.

Необходимо отметить, что упомянутый фактор является главным при формировании максимальных

расходов, что, очевидно, связано с возможностью впитывания талых вод почвогрунтами и скоростью их поступления в речную сеть.

Зимние и весенние температуры, характеризующие соответственно суровость зимы и скорость снеготаяния, существенного влияния на объем стока и максимальные расходы половодья не оказывают. Их корреляционная связь характеризуется «слабой теснотой связи» (r не более $|0,17|$). Отмечается слабая отрицательная связь средней температуры октября предшествующего года со слоем стока ($r = -0,3$) и максимальными расходами ($r = -0,37$), однако включение данного предиктора в уравнения не улучшило их качество.

Таким образом, уравнение множественной линейной регрессии для прогноза слоя стока половодья имеет вид:

$$Y = 0,29X_{IV-VI} + 0,34X_{XI-III} + 0,41Q_X - 22.$$

Для максимальных расходов:

$$Q_{max} = 5,37Q_X + 3,3X_{XI-III} + 1,32X_{IV-VI} - 57,8,$$

где Y – слой стока периода половодья, мм; X_{IV-VI} – осадки за апрель–май ГМС Тогул (для уравнения (1)) и ГМС Тальменка (для уравнения (2)); X_{XI-III} – сумма зимних осадков (XI–III) по данным реанализа ERA-5 ECMWF (для уравнения (2) – данные CRSS); Q_X – средний расход воды р. Чумыш за октябрь.

Статистические характеристики прогнозных уравнений приведены в табл. 3.

Таблица 3. Статистические характеристики уравнений множественной регрессии для прогнозирования слоя стока и максимальных расходов половодья на р. Чумыш

Table 3. Statistical characteristics of multiple regression equations for predicting runoff depth and maximum discharge of the river Chumysh flood

| Итоговые статистики Summary statistics | Модель 1: Y Model 1: Y | Модель 2: Q_{max} Model 2: Q_{max} |
|---|-------------------------------|---|
| Множественный R /Multiple R | 0,8 | 0,72 |
| R^2 | 0,63 | 0,53 |
| Нормированный R^2 /Adjusted R^2 | 0,60 | 0,49 |
| Стандартная ошибка Standard error | 18,45 | 187,2 |
| F -критерий/ F -test | 20,3 | 13 |
| S/σ | 0,62 | 0,71 |
| NSE | 0,60 | 0,47 |
| Количество наблюдений Observations | 39 | 39 |

Значение F (критерий Фишера) превышает табличное значение (при уровне значимости 0,05), что свидетельствует об адекватности полученных уравнений регрессии.

В соответствии с [24], при $n \geq 25$ методика может быть признана хорошей, если $S/\sigma \leq 0,5$; удовлетворительной при $0,5 < S/\sigma \leq 0,8$; неудовлетворительной при $S/\sigma > 0,80$.

По показателю Нэша–Сатклиффа «модель может считаться хорошей при $NSE \geq 0,80$; удовлетворительной при условии $0,36 < NSE \leq 0,80$; неудовлетворительной при условии $NSE < 0,36$ » [23. С. 180].

Таким образом, по обоим показателям модель может характеризоваться как удовлетворительная.

Выводы

1. При построении стохастической модели максимального стока р. Чумыш в качестве предиктора, характеризующего зимние осадки (снегозапасы) в бассейне р. Чумыш, целесообразно использование распределенных данных реанализов высокого пространственного разрешения. Это обосновано тем, что они существенно лучше коррелируют (более высокие коэффициенты корреляции r) с параметрами половодья, чем данные снегомерных съемок и суммы зимних осадков, полученные на ГМС. Это ожидаемо, так как точечные наблюдения на метеостанциях не могут характеризовать осадки на всей территории бассейна. ДДЗ, при всех недостатках, ориентированы на оценку именно пространственного распределения и в целом лучше подходят для оценки выпавших на бассейн осадков. Проведенный сравнительный анализ пространственных моделей распределения осадков показал хорошую корреляцию между ними, что позволяет использовать любой набор данных при построении регрессионных моделей «осадки–сток». Но наилучший результат (наиболее высокие коэффициенты корреляции) показали данные модели ERA-5 ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) как в их исходном варианте, так и с учетом корректировки [33].

Источником питания р. Чумыш в период половодья выступают в равной степени дождевые и талые воды, о чем свидетельствует «заметная» теснота связи слоя стока как со снегозапасами ($r=0,55$), так и с осадками апреля и мая ($r=0,59$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опасные гидрологические явления в бассейне Верхней Оби: Современные тенденции и прогнозирование / А.В. Пузанов, А.Т. Зиновьев, Д.М. Безматерных, В.Ф. Резников, Д.Н. Трошкин // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 4. – С. 69–77.
2. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 422 с.
3. Identifying sensitivities in flood frequency analyses using a stochastic hydrologic modeling system / A.J. Newman, A.G. Stone, M. Saharia, K.D. Holman, N. Addor, M.P. Clark // Hydrology and Earth System Sciences. – 2021. – V. 25. – P. 5603–5621. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-25-5603-2021> (дата обращения 01.12.2022).
4. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2017. – 148 с.
5. Ромасько В.Ю., Бураков Д.А. Космический мониторинг заснеженности территории речных бассейнов // Журнал СВУ. Техника и технологии. – 2017. – Т. 10 (6). – С. 704–713. URL: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-704-713> (дата обращения 01.12.2022).
6. Application and assessment of a downscaled GPM dataset in the simulation of snowmelt runoff in alpine mountainous areas / Y. Zhang, G. Hanati, S. Danierhan, H. Keke // Journal of Hydrology: Regional Studies. – V. 41. – June 2022. – 10110. URL: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-704-713> (дата обращения 01.12.2022).
7. The evaluation of the potential of global data products for snow hydrological modelling in ungauged high-alpine catchments / M. Weber, F. Koch, M. Bemhardt, K. Schulz // Hydrology and Earth

System Sciences. – 2021. – V. 25. – P. 2869–2894. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-25-2869-2021> (дата обращения 01.12.2022).

Одним из определяющих факторов формирования половодья на р. Чумыш (а для формирования максимальных расходов – главным) является состояние почвогрунтов в бассейне (в первую очередь, их увлажнение), которое в конечном счете обуславливает водопоглощающую емкость и, как следствие, коэффициенты талого стока и скорость впитывания талых вод. Об этом свидетельствует «умеренная» ($r=0,49$) и «заметная» ($r=0,54$) теснота связи слоя стока и максимальных расходов воды половодья со среднемесячным расходом воды за октябрь, который является индикатором влагонасыщенности бассейна.

2. Ни зимние, ни весенние температуры, характеризующие суровость зимы и скорость снеготаяния, значимого влияния на объем стока и максимальные расходы половодья не оказывают, так как их корреляционная зависимость характеризуется «слабой теснотой связи» (r не более $|0,17|$). Отмечается «слабая» отрицательная связь средней температуры октября предшествующего года со слоем стока ($r=-0,3$) и максимальными расходами ($r=-0,37$), однако включение данного предиктора в уравнения регрессии не улучшило их качество.
3. Разработана стохастическая модель множественной линейной регрессии для прогноза объема и максимальных расходов вода в створе р. Чумыш – пгт Тальменка, которая по показателям S/σ и критерию Нэша–Сатклиффа может характеризоваться как удовлетворительная.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий»).

8. Морейдо В.М., Калугин А.С. Оценка возможных изменений водного режима реки Селенги в XXI в. На основе модели формирования стока // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44. – № 3. – С. 275–284. URL: <https://doi.org/10.7868/S0321059617030142> (дата обращения 01.12.2022).
9. Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э. Воспроизведение гидрографов стока северных рек с использованием глобальных баз данных // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2012. – № 5. – С. 61–70. URL: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2012-5-61-70> (дата обращения 01.12.2022).
10. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Assessment of applicability of Mike 11-nam hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin // Vestnik MGSU. – 2020. – V. 15. – № 7. – P. 1030–1046. URL: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.7.1030-1046> (дата обращения 01.12.2022).
11. Галахов В.П., Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В. Оценка количества зимних осадков в горных бассейнах и их влияние на сток во время половодья (на примере рек Чарыш и Ануй, Алтай) // Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25. – № 6. – С. 51–62. URL: <https://doi.org/10.15372/KZ20210605> (дата обращения 01.12.2022).
12. Мухин В.М. Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2013. – № 349. – С. 5–46.
13. Паромов В.В., Шумилова К.А., Гордеев И.Н. Условия формирования половодья большой водности и прогноз наводнения на реке Абакан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 11. – С. 57–67.

14. Прогнозирование притока воды в Красноярское и Саяно-Шушенское водохранилища во втором квартале года / Д.А. Бураков, И.Н. Гордеев, А.В. Игнатов, О.Э. Пекун, Л.А. Путинцев, А.А. Чекмарев // География и природные ресурсы. – 2016. – № 2. – С. 175–182.
15. Бураков Д.А., Космакова В.Ф., Волковская Н.П. Методы долгосрочного прогноза максимальных уровней воды на реке Иртыш и результаты их испытания // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2019. – № 46. – С. 71–78.
16. О прогнозе максимальных расходов весеннего половодья реки Арпа / В.Г. Маргарян, Е.В. Гайдукова, Л.В. Азизян, В.А. Хаустов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – № 3. – С. 75–87. URL: https://doi.org/10.35567/19994508_2022_3_6 (дата обращения 01.12.2022).
17. Прогноз притока воды к нимляскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость / Н.А. Варенцова, М.Б. Киреева, Н.Л. Фролова, М.А. Харламов, В.П. Илич, А.А. Сазонов // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47. – № 6. – С. 694–709. URL: <https://doi.org/10.31857/S0321059620060152> (дата обращения 01.12.2022).
18. Холматов Ш.Р., Сарафанов М.И., Холматов Ш.Р. Прогнозирование уровня воды во время половодья с использованием данных «NASA global land data assimilation system» на примере реки Печора // Colloquium-Journal. – 2019. – № 17-1 (41). – С. 29–32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovaniye-urovnya-vody-vo-vremya-polovodya-s-ispolzovaniem-dannyh-nasa-global-land-data-assimilation-system-na-primere-reeki-pechora> (дата обращения: 13.09.2022).
19. Evaluation of multi-satellite precipitation datasets and their error propagation in hydrological modeling in a Monsoon-Prone Region / J. Chen, Z. Li, L. Li, J. Wang, W. Qi, C-Y. Xu, J-S. Kim // Remote Sensing. – 2020. – V. 12 (21). – 3550. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12213550> (дата обращения 01.12.2022).
20. Ресурсы поверхностных вод. Т. 15. Основные гидрологические характеристики. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь / под ред. Е.П. Шурупа. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 542 с.
21. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. – Elsevier, 2019. – 840 с. URL: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03921-6> (дата обращения 01.12.2022).
22. Басилашвили Ц.З. Прогнозирование стока горных рек Грузии при редкой сети наблюдений // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 6. – С. 61–66.
23. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2020. – № 1 (375). – С. 176–189. URL: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-176-189> (дата обращения 01.12.2022).
24. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2015. – № 355. – С. 3–195.
25. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. – М.: Академия, 2010. – 300 с.
26. Representation of precipitation characteristics and extremes in regional reanalyses and satellite- and gauge-based estimates over Western and Central Europe / M. Lockhoff, O. Zolina, C. Simmer, J. Schulz // Journal of Hydrometeorology. – 2020. – V. 20 (6). – P. 1123–1145. URL: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0200.1> (дата обращения 01.12.2022).
27. Evaluating weather observations and the Climate Forecast System Reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics / D.A. Auerbach, Z.M. Easton, M.T. Walter, A.S. Flecker, D.R. Fuka // Hydrol. Process. – 2016. – V. 30 (19). – P. 3466–3477. URL: <https://doi.org/10.1002/hyp.10860> (дата обращения 01.12.2022).
28. System Reanalysis as weather input data for watershed models / D.R. Fuka, M.T. Walter, C. Macalister, A.T. DeGaetano, T.S. Steenhuis, Z.M. Easton // Hydrological Processes. – 2014. – V. 28 (22). – P. 5613–5623. URL: <https://doi.org/10.1002/hyp.10073> (дата обращения 01.12.2022).
29. Mahto S.S., Mishra V. Does ERA-5 outperform other reanalysis products for hydrologic applications in India? // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2019. – V. 124 (16). – P. 9423–9441. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JD031155> (дата обращения 01.12.2022).
30. Gampe D., Ludwig R. Evaluation of gridded precipitation data products for hydrological applications in complex topography // Hydrology. – 2017. – V. 4 (4). – 53. URL: <https://doi.org/10.3390/hydrology4040053> (дата обращения 01.12.2022).
31. Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты / Е.П. Гордов, В.Ю. Богомолов, Е.Ю. Генина, Т.М. Шульгина // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2011. – Т. 9 (1). – С. 56–66.
32. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России / В.Ю. Григорьев, Н.Л. Фролова, М.Б. Киреева, В.М. Степаненко // Известия РАН. Серия географическая. – 2022. – Т. 86 (3). – С. 435–446. URL: <https://doi.org/10.31857/S2587556622030062> (дата обращения 01.12.2022).
33. Voropay N.N., Ryazanova A.A., Dyukarev E.A. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia // Atmospheric Researches. – 1.06.2021. – V. 254. – 105528. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528> (дата обращения 01.12.2022).
34. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford et al. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2020. – V. 146. – P. 1999–2049. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12213550> (дата обращения 01.12.2022).
35. ISIMIP2b simulation data from water (global) sector / S. Gosling, H. Müller Schmied, P. Burek et al. // GFZ Data Services. – 2020. URL: <https://dataservices.gfz-potsdam.de/pik/showshort.php?id=escidoc:5046893> (дата обращения 11.08.2022).
36. The CHRS data portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data / P. Nguyen, E. Shearer, H. Tran, M. Ombadi, N. Hayatbini, T. Palacios, P. Huynh, D. Braithwaite, G. Updegraff, K. Hsu, B. Kuligowski, W. Logan, S. Sorooshian // Scientific Data. – 2019. – Jan 8. – 6:180296. URL: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.296> (дата обращения 11.08.2022).
37. Сила связи. Сообщение 2. Градации величины корреляции / А.Н. Котеров, Л.Н. Ушенкова, Э.С. Зубенкова, М.В. Калинина, А.П. Бирюков, Е.М. Ласточкина, Д.В. Молодцова, А.А. Вайнсон // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2019. – Т. 64. – № 6. – С. 12–24. URL: <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24> (дата обращения 11.08.2022).
38. Владимирова А.М. Факторы, определяющие возникновение экстремальных расходов и уровней воды половодья // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического ун-та. – 2009. – № 9. – С. 22–39.
39. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. I. Обзор исследований / Н.А. Варенцова, М.Б. Киреева, М.А. Харламов М.И. Варенцов, Н.Л. Фролова, Е.С. Повалишников // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 2 (384). – С. 92–116. URL: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-92-116> (дата обращения 11.08.2022).

Поступила: 13.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 27.02.2023 г.

Информация об авторах

Самойлова С.Ю., кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

Ловцкая О.В., старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

Кудишин А.В., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

Арнаутов Д.В., преподаватель высшей категории Колледжа Алтайского Государственного Университета.

UDC556.161:556.166

ANALYSIS OF FACTORS FOR FORMATION OF THE CHUMYSH RIVER MAXIMUM RUNOFF (WESTERN SIBERIA)

Svetlana Yu. Samoilova¹,
bastet05@list.ru

Olga V. Lovtskaya¹,
lov@iwep.ru

Aleksey V Kudishin¹,
avkudishin@yandex.ru

Darya V. Arnaut²,
arnautdv@mail.ru

¹ Institute for Water and Environmental Problems SB RAS,
1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russia.

² College of Altai State University,
61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

The relevance of the study stems from the necessity to refine the methods of medium-term flood forecasts when sufficient hydrometeorological data are not available.

The purpose of the work is to assess probable application of spatially distributed precipitation models to forecast runoff volume of flood, to develop stochastic models for predicting flood volume and its maximum discharge using hydrometeorological observation data, distributed precipitation datasets from reanalysis and remote sensing data of high spatial and temporal resolution.

Methods include geoinformation, complex geographical and hydrometeorological analysis, statistical methods (correlation and regression analysis).

Results. The Chumysh basin moistening was estimated due to the data from spatially distributed precipitation models and hydrometeorological observation data; the relationship of total precipitation with runoff volume and maximum flood discharge was analyzed. A comparative evaluation of the obtained dependencies made it possible to identify key predictors for deriving the multiple linear regression equation. The statistical model was developed for predicting volumes and maximum discharges of Chumysh flood at Talmenka settlement using hydrometeorological observation data and reanalysis ones of high spatial and temporal resolution.

Key words:

The Chumysh River, winter precipitation, flood, runoff depth, maximum discharge, statistical model of multiple regression.

The research was carried out within the State assignment IWEP SB RAS (project «Study of the mechanisms of natural and anthropogenic changes of quantity and quality of water resources in Siberia using hydrological models and information technologies»).

REFERENCES

- Puzanov A.V., Zinoviev A.T., Bezmaternykh D.M., Reznikov V.F., Troshkin D.N. Opasnye gidrologicheskie yavleniya v bassejne Verkhney Obi: sovremennye tendentsii i prognozirovanie [Dangerous hydrological phenomena in the Upper Ob basin: Modern trends and forecasting]. *Water management of Russia: Problems, technologies, management*, 2018, no. 4, pp. 69–77.
- Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. *Kurs gidrologicheskikh prognozov* [A course of hydrological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 422 p.
- Newman A.J., Stone A.G., Saharia M., Holman K.D., Addor N., Clark M.P. Identifying sensitivities in flood frequency analyses using a stochastic hydrologic modeling system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, no. 25, pp. 5603–5621. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-25-5603-2021> (accessed 1 December 2022).
- Pyankov S.V., Shikhov A.N. *Geoinformatsionnoe obespechenie modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov i yavleniy* [Geoinformation support for modeling hydrological processes and phenomena]. Perm, PGNIU Publ., 2017. 148 c.
- Romasko V.Y., Burakov D.A. Space monitoring of snow cover of river watersheds. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2017, vol. 10, no. 6, pp. 704–713. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-704-713> (accessed 1 December 2022).
- Zhang Y., Hanati G., Danierhan S., Keke H. Application and assessment of a downscaled GPM dataset in the simulation of snowmelt runoff in alpine mountainous areas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, vol. 41, 10110. Available at: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-704-713> (accessed 1 December 2022).
- Weber M., Koch F., Bernhardt M., Schulz K. The evaluation of the potential of global data products for snow hydrological modelling in ungauged high-alpine catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, vol. 25, pp. 2869–2894. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-25-2869-2021> (accessed 1 December 2022).
- Moreido V.M., Kalugin A.S. Assessing possible changes in Selenga R. water regime in the XXI century based on a runoff formation model. *Water Resources*, 2017, vol. 44, no. 3, pp. 390–398. Available at: <https://doi.org/10.7868/S0321059617030142> (accessed 1 December 2022).
- Nasonova O.N., Guseva E.M., Kovalev B.E. Run-off Hydrograph reproduction of northern rivers with use of global data base. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2012, no. 5, pp. 61–70. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2012-5-61-70> (accessed 1 December 2022).
- Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Assessment of applicability of mike 11-nam hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin. *Vestnik MGSU*, 2020, vol. 15, no. 7, pp. 1030–1046. Available at: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.7.1030-1046> (accessed 1 December 2022).
- Galakhov V.P., Samoylova S.Yu., Mardasova E.V. Assessment of the amount of winter precipitation in mountain basins and their in-

- fluence on flood formation (Charysh and Anuy river basins). *Earth's Cryosphere*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 51–62. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.15372/KZ20210605> (accessed 1 December 2022).
12. Mukhin V.M. Metodicheskie osnovy fiziko-statisticheskikh vidov kratkosrochnykh prognozov stoka gornykh rek [Methodological foundations of physico-statistical types of short-term forecasts of mountain river runoff]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*, 2013, no. 349, pp. 5–46.
 13. Paromov V.V., Shumilova K.A., Gordeev I.N. Conditions of formation of high-water flood and flood forecast on the river Abakan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 11, pp. 57–67. In Rus.
 14. Burakov D.A., Petkun O.E., Gordeev I.N., Putintsev L.A., Ignatov A.V., Chekmarev A.A. Forecasting the water inflow into the Krasnoyarsk and Sayano-Shushenskoe reservoirs in the second quarter of the year. *Geography and Natural Resources*, 2016, vol. 37, no. 2, pp. 158–164.
 15. Burakov D.A., Kosmakova V.F., Volkovskaya N.P. Metody dolsrochnogo prognoza maksimalnykh urovney vody na reke Irtysh i rezultaty ikh ispytaniya [Methods for long-term forecasting of maximum water levels on R. Irtysh and their testing results]. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2019, no. 46, pp. 71–78.
 16. Margaryan V.G., Gaidukova E.V., Azizyan L.V., Khaustov V.A. O prognoze maksimalnykh raskhodov vesennego polovodya reki Arpa [On forecasting maximum discharge of spring flood on r. Arpa]. *Water management of Russia: problems, technologies, management*, 2022, no. 3, pp. 75–87. In Rus. Available at: https://doi.org/10.35567/19994508_2022_3_6 (accessed 1 December 2022).
 17. Varentsova N.A., Kireeva M.B., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Ilich V.P., Sazonov A.A. Forecasting water inflow into the Tsimlyansk reservoir during spring flood under current climate conditions: problems and reproducibility. *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, pp. 953–967. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0097807820060159> (accessed 1 December 2022).
 18. Kholmatov Sh.R., Sarafanov M.I. Prediction of the level of water in flood using data from the «NASA global land data assimilation system» on the Pechora River. *Colloquium-Journal*, 2019, no. 17-1, pp. 29–32. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-urovnya-vody-vo-vremya-polovodya-s-ispolzovaniem-dannyh-nasa-global-land-data-assimilation-system-na-primere-reki-pechora> (accessed: 13 September 2022).
 19. Chen J., Li Z., Li L., Wang J., Qi W., Xu C.-Y., Kim J.-S. Evaluation of multi-satellite precipitation datasets and their error propagation in hydrological modeling in a Monsoon-Prone Region. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 21, 3550. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs12213550> (accessed 1 December 2022).
 20. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 15. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki. Altay, Zapadnaya Sibir i Severnyy Kazakhstan. Vyp. 1. Verkhnyaya i Srednyaya Ob* [Surface water resources. Vol. 15. Basic hydrological characteristics. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Iss. 1. Upper and Middle Ob]. Ed. by E.P. Shurup. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 542 p.
 21. Wilks D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Elsevier, 2019. 840 p. Available at: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03921-6> (accessed 1 December 2022).
 22. Basilashvili C.Z. Prognozirovaniye stoka gornykh rek Gruzii pri redkoy seti nablyudeniy [Forecasting the runoff of mountain rivers in Georgia with a sparse network of observations]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, no. 6, pp. 61–66.
 23. Borshch S.V., Khristoforov A.V. Otsenka kachestva prognozov rechnogo stoka [Assessment of the quality of river flow forecasts]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*, 2015, no. 355, pp. 3–195.
 24. Borsch S.V., Simonov Y.A., Khristoforov A.V. Effektivnost modelirovaniya i prognozirovaniya rechnogo stoka [Efficiency of streamflow modeling and forecasting]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2020, no. 1 (375), pp. 176–189. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-176-189> (accessed 1 December 2022).
 25. Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Matematicheskoe modelirovaniye v gidrologii* [Mathematical modeling in hydrology]. Moscow, Akademiya Publ., 2010. 300 p.
 26. Lockhoff M., Zolina O., Simmer C., Schulz J. Representation of precipitation characteristics and extremes in regional reanalyses and satellite- and gauge-based estimates over Western and Central Europe. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 1123–1145. Available at: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0200.1> (accessed 1 December 2022).
 27. Auerbach D.A., Easton Z.M., Walter M.T., Flecker A.S., Fuka D.R. Evaluating weather observations and the Climate Forecast System Reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics. *Hydrological Processes*, 2016, vol. 30, no. 19, pp. 3466–3477. Available at: <https://doi.org/10.1002/hyp.10860> (accessed 1 December 2022).
 28. Fuka D.R., Walter M.T., Macalister C., Degaetano A.T., Steenhuis T.S., Easton T.S. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 2014, vol. 28, no. 22, pp. 5613–5623. Available at: <https://doi.org/10.1002/hyp.10073> (accessed 1 December 2022).
 29. Mahto S.S., Mishra V. Does ERA-5 outperform other reanalysis products for hydrologic applications in India? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, vol. 124, no. 16, pp. 9423–9441. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019jd031155> (accessed 1 December 2022).
 30. Gampe D., Ludwig R. Evaluation of gridded precipitation data products for hydrological applications in complex topography. *Hydrology*, 2017, vol. 4, no. 4:53. Available at: <https://doi.org/10.3390/hydrology4040053> (accessed 1 December 2022).
 31. Gordov E.P., Bogomolov V.Yu., Genina E.Yu., Shulgina T.M. Analysis of regional climate processes in Siberia: method, data and some results. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2011, vol. 9, no. 1, pp. 56–66. In Rus.
 32. Grigorev V.Yu., Frolova N.L., Kireeva M.B., Stepanenko V.M. Spatial and temporal variability of ERA5 precipitation accuracy over Russia. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2022, vol. 86, no. 3, pp. 435–446. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.31857/S2587556622030062> (accessed 1 December 2022).
 33. Voropay N.N., Ryazanova A.A., Dyukarev E.A. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia. *Atmospheric Researches*, 2021, vol. 254, 105528. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528> (accessed 1 December 2022).
 34. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, pp. 1999–2049. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs12213550> (accessed 1 December 2022).
 35. Gosling S., Müller Schmied H., Burek P. ISIMIP2b simulation data from water (global) sector. *GFZ Data Services*, 2020. Available at: <https://dataservices.gfz-potsdam.de/pik/showshort.php?id=escidoc:5046893> (accessed 11 August 2022).
 36. Nguyen P., Shearer E., Tran H. The CHRS data portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Scientific Data*, 2019, 6:180296. Available at: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.296> (accessed 11 August 2022).
 37. Koterov A.N., Ushenkova L.N., Zubenkova E.S., Kalininna M.V., Biryukov A.P., Lastochkina E.M., Molodtsova D.V., Wainson A.A. Strength of association. Report 2. Graduation of correlation size. *Medical Radiology and Radiation Safety*, 2019, vol. 64, no. 6, pp. 12–24. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24> (accessed 11 August 2022).
 38. Vladimirov A.M. Faktory, opredelyayushchie vozniknovenie ekstremalnykh raskhodov i urovney vody polovodya [Factors initiating occurrence of extreme flow rates and flood water levels]. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, 2009, no. 9, pp. 22–39. In Rus.
 39. Varentsova N.A., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Varentsov M.I., Frolova N.L., Povalishnikova E.S. Formirovaniye vesennego stoka rek ETR: osnovnye faktory i sposoby ikh ucheta. I. Obzor issledovaniy [Spring river runoff in the European part of Russia: main factors and their estimation. I. Review of previous studies]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2022, no. 2 (384), pp. 92–116. Available at: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-92-116> (accessed 11 August 2022).

Reviewed: 13 December 2022.

Reviewed: 27 February 2023.

Information about the authors

Svetlana Yu. Samoilova, Cand. Sc., researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Olga V. Lovtskaya, senior researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Aleksey V Kudishin, Cand. Sc., senior researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Darya V. Arnaut, lecturer, College of Altai State University.