

УДК 556.161:556.166

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4257

Шифр специальности ВАК: 1.6.16, 1.6.21

Бассейны-аналоги как способ расчетов объема весеннего половодья в условиях недостатка метеорологической информации (на примере реки Тубы)

В.П. Галахов¹, С.Ю. Самойлова¹, О.В. Ловцкая^{1✉}, Е.В. Мардасова²

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

² Алтайский государственный университет. Россия, г. Барнаул

✉ lov@iwep.ru

Аннотация. *Актуальность* работы обусловлена необходимостью обеспечения недостающей информацией о стокоформирующих факторах при прогнозировании половодья в малоизученных и неизученных водосборах. Для этой цели в практике гидрологических расчетов и прогнозов может использоваться метод гидрологической аналогии. **Цель:** исследование возможности применения метода гидрологической аналогии для расчетов объема весеннего половодья горной реки. Анализ выполнен на примере бассейнов реки Тубы и ее притоков (Амыл, Казыр и Кизир), а также соседних бассейнов (р. Абакан и р. Сыда). **Методы:** комплексный географо-гидрометеорологический анализ, корреляционный и регрессионный анализ, метод гидрологической аналогии. **Результаты.** Выполнены расчеты сумм зимних осадков в бассейне р. Амыл при помощи традиционно используемых в гидрологии высотных зависимостей, а также экспертная оценка среднемноголетних осадков в бассейне р. Тубы с использованием данных о современном оледенении. Построена стохастическая прогнозная модель объема стока половодья на р. Амыл в створе с. Качулька на основе связи с осадками за предшествующий зимний период и период половодья. Проанализировано влияние жидких осадков во время половодья на качество прогноза. Выполнен сравнительный анализ других притоков р. Тубы (Казыр, Кизир), а также соседних бассейнов (р. Абакан, р. Сыда) с точки зрения использования их в качестве бассейнов-аналогов. Проанализирована возможность использования бассейна р. Амыл как аналога для прогноза стока половодья на р. Тубе в створе пос. Бугуртак. **Выводы.** Корреляционный анализ объема половодья р. Тубы, ее основных притоков и соседних рек показал, что в качестве аналога предпочтительно использовать бассейны со схожими условиями формирования осадков (ориентация склона относительно направления преобладающих влагонесущих воздушных масс) и близкой средней высотой водосбора. Использование бассейна р. Амыл как аналога р. Тубы целесообразно для среднесрочного прогноза объема талого стока (без учета жидких осадков в период половодья).

Ключевые слова: бассейн реки Амыл, бассейн реки Тубы, бассейн реки Абакан, объем весеннего половодья, бассейн-аналог, метод гидрологической аналогии

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

Для цитирования: Бассейны-аналоги как способ расчетов объема весеннего половодья в условиях недостатка метеорологической информации (на примере реки Тубы) / В.П. Галахов, С.Ю. Самойлова, О.В. Ловцкая, Е.В. Мардасова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 120–132. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4257

UDC 556.161:556.166

DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4257

Basin-analogy for calculating spring flood volumes at insufficiency of meteorological data (Tuba river as a case study)

V.P. Galakhov¹, S.Yu. Samoilova¹, O.V. Lovtskaya^{1✉}, E.V. Mardasova²

¹ Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russian Federation

² Altai State University, Barnaul, Russian Federation

✉lov@iwepr.ru

Abstract. Relevance. The necessity in provision of insufficient data on streamflow formation factors when predicting floods in the poorly explored and unstudied basins. For this purpose, in hydrological calculations and forecasts the method of hydrological analogy is applicable. **Aim.** To study probable application of the hydrological analogy method in calculations of spring flood volumes of a mountain river. The analysis was carried out by the example of the basins of the Tuba river and its tributaries (rivers Amyl, Kazyr and Kizir), as well as neighboring catchments (rivers Abakan and Syda). **Methods.** Integrated geographical-hydrometeorological analysis, correlation and regression analysis, and the hydrological analogy method. **Results.** We calculated total winter precipitation in the Amyl basin by means of (traditionally used in hydrology) elevation dependences, estimated average annual precipitation in the Tuba basin using modern glaciation data, and built a stochastic predictive model of flood runoff volume on the Amyl river (settl. Kachulka) based on the relationship between precipitation for the previous winter and flood periods. The influence of liquid (flood) precipitation on the forecast quality was analyzed. A comparative analysis of other Tuba tributaries (Kazyr, Kizir), including neighboring basins (rivers Abakan and Syda), in terms of their application as basins-analogies was performed. For instance, a feasible use of the Amyl basin as an analogy for forecasting flood runoff depth of the Tuba river (vill. Bugurtak) was analyzed. **Conclusions.** The correlation analysis of flood volumes of the Tuba, its main tributaries and neighboring rivers suggests that as an analogy the application of basins with similar conditions for precipitation formation (slope orientation relative to the direction of the prevailing moisture-bearing air masses) and average catchment elevation is currently favored. The Amyl basin use as the Tuba analogy is expedient for a medium-term forecast of melt runoff volumes (excluding liquid (flood) precipitation).

Keywords: Amyl river basin, Tuba river basin, Abakan river basin, spring flood volume, basin-analogy, hydrological analogy method

Acknowledgements: The research was carried out within the State assignment Institute for Water and Environmental Problems 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»).

For citation: Galakhov V.P., Samoilova S.Yu., Lovtskaya O.V., Mardasova E.V. Basin-analogy for calculating spring flood volumes at insufficiency of meteorological data (Tuba river as a case study). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 120–132. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4257

Введение

В условиях недостатка гидрометеорологической информации одним из традиционных методов для расчетов параметров стока является метод гидрологической аналогии [1–3]. Метод бассейнов-аналогов разработан, в первую очередь, для продолжения гидрологических рядов с целью определения расчетных характеристик стока и построения кривых обеспеченности при отсутствии и недостаточности данных наблюдений [1]. Вместе с тем на практике этот метод используется для установления объема, динамики и других параметров речного стока на основе связи между стоком и осадками [4], в том числе в целях разработки и калибровки моделей стока, а также для гидрологических

прогнозов различной заблаговременности в малоизученных и неизученных водосборах [5–10]. Одним из способов для оценки и прогноза речного стока является перенос оптимизированных параметров гидрологической модели в близлежащий водосбор, не охваченный гидрометеорологическими наблюдениями. Этот процесс называется регионализацией («regionalization»). Для переноса параметров стока в неизученный бассейн наиболее широко используются методы регрессии, пространственной близости, физическое сходство [10–12]. При этом пространственная близость и физическое сходство (однородность физико-географический условий) показали удовлетворительные результаты в условиях от засушливого до теплого умеренного

климата (например, в Австралии), а также в холодных и снежных регионах (например, в Канаде); методы на основе регрессии были предпочтительны в регионах с теплым умеренным климатом (например, в большинстве европейских стран) [12].

В отечественной практике гидрологических расчетов и прогнозов реализация метода бассейнов-аналогов (регионализация) осуществляется с использованием регрессионного анализа. Расчеты и прогнозы параметров стока в неизученном бассейне требуют подробной гидрометеорологической информации в бассейне-аналоге. Кроме того, при выборе бассейна-аналога следует учитывать ряд физических факторов, таких как географическая близость, экспозиция и гипсометрия склонов, однородность климатических условий, однотипность почвогрунтов и гидрогеологических условий, близкая степень озерности, залесенности, заболоченности и распаханности водосборов, отсутствие факторов, существенно искажающих естественный речной сток. Подробный перечень требований к бассейну-аналогу для инженерно-гидрологических расчетов приведен в СП 33-101-2003 [13]. Тем не менее бассейны-аналоги не могут быть полностью идентичными, и экстраполяция оценок речного стока на разные водосборы, очевидно, будет неточной [10, 14]. Поэтому исследование ключевых параметров для выбора бассейнов-аналогов и опыт применения метода гидрологической аналогии могут быть перспективными для разработки методов оценки и прогнозов стока в районах с недостаточной гидрометеорологической изученностью.

В представленной работе в качестве объекта исследований выступает водосбор реки Тубы (створ пос. Бугуртак), в качестве основного бассейна-аналога – один из её притоков – река Амыл (створ в с. Качулька), который наиболее полно обеспечен метеорологическими наблюдениями. Прогноз объема весеннего половодья производился по стохастическим моделям, основанным на эмпирических воднобалансовых зависимостях весеннего стока от запаса воды в снежном покрове перед началом снеготаяния и последующих осадков [2]. Зимние осадки оценивались при помощи используемого в гидрологических исследованиях метода, основанного на зависимости суммы осадков на метеорологических станциях от их абсолютной высоты [2, 15, 16]. Соотношение связи между стоком и осадками в исследуемом бассейне и его аналогах оценивалось методами корреляционного и регрессионного анализа.

Объект исследования

Река Туба – правый приток I порядка р. Енисей, впадает в Красноярское водохранилище (рис. 1). Длина реки составляет 119 км (от истока р. Казыр

507 км), площадь бассейна – 36900 км², среднемноголетний расход воды 762,0 м³/с. Река формируется примерно равнозначными по водности притоками: Амыл и Казыр с притоком Кизир. Реки Казыр и Кизир берут начало с южного макросклона Восточного Саяна, где абсолютные высоты бассейнов в приводораздельной части достигают немногим менее 3000 м. Исток реки Амыл располагается на северном макросклоне Куртушибинского хребта (горная система Западный Саян), абсолютные высоты которого в основном не превышают 1500–2000 м. Основные гидрологические характеристики реки Тубы и ее притоков представлены в табл. 1.

Следует отметить слабую гидрометеорологическую изученность бассейна р. Тубы. Подавляющее большинство метеорологических станций и постов расположено в долинах рек, что не позволяет оценить увлажнение на склонах и в приводораздельных частях бассейна, где формируется основной объем стока.

Таблица 1. Основные характеристики р. Тубы и ее притоков [17, 18]

Table 1. Main characteristics of the Tuba River and its tributaries [17, 18]

Река River	Площадь бассейна, км ² Catchment area, km ²	Длина реки, км River length, km	Средняя высота бассейна, м Average catchment elevation, m	Средний многолетний расход воды в замыкающем створе, м ³ /с Average long-term water discharge in the outlet, m ³ /s	Максимальный расход воды, м ³ /с Maximum water discharge, m ³ /s	Доля стока половодья, % годового Share of flood runoff, % annual
Амыл Amyl	9500	257	797	214	2900	62
Казыр Kazyg	20900	388	1050	308	2990	65
Кизир Kizir	9170	300	965	246	2600	68
Туба Tuba	36900	119	903	762	10500	65

Особенностью бассейнов рек Казыр и Кизир является наличие в верховьях небольшого дисперсного оледенения [19]. Ледники верховьев Казыра и Кизира (приводимые в Каталоге ледников) имеют площади от 1,2 до 0,1 км², в среднем – 0,2–0,3 км², расположены на высоте от 2 до 2,9 тыс. м. Существование оледенения на такой абсолютной высоте говорит об очень большом увлажнении верховий рек Казыр и Кизир. При этом сами ледники, в силу их малости, значительного влияния на сток рек оказывать не должны.

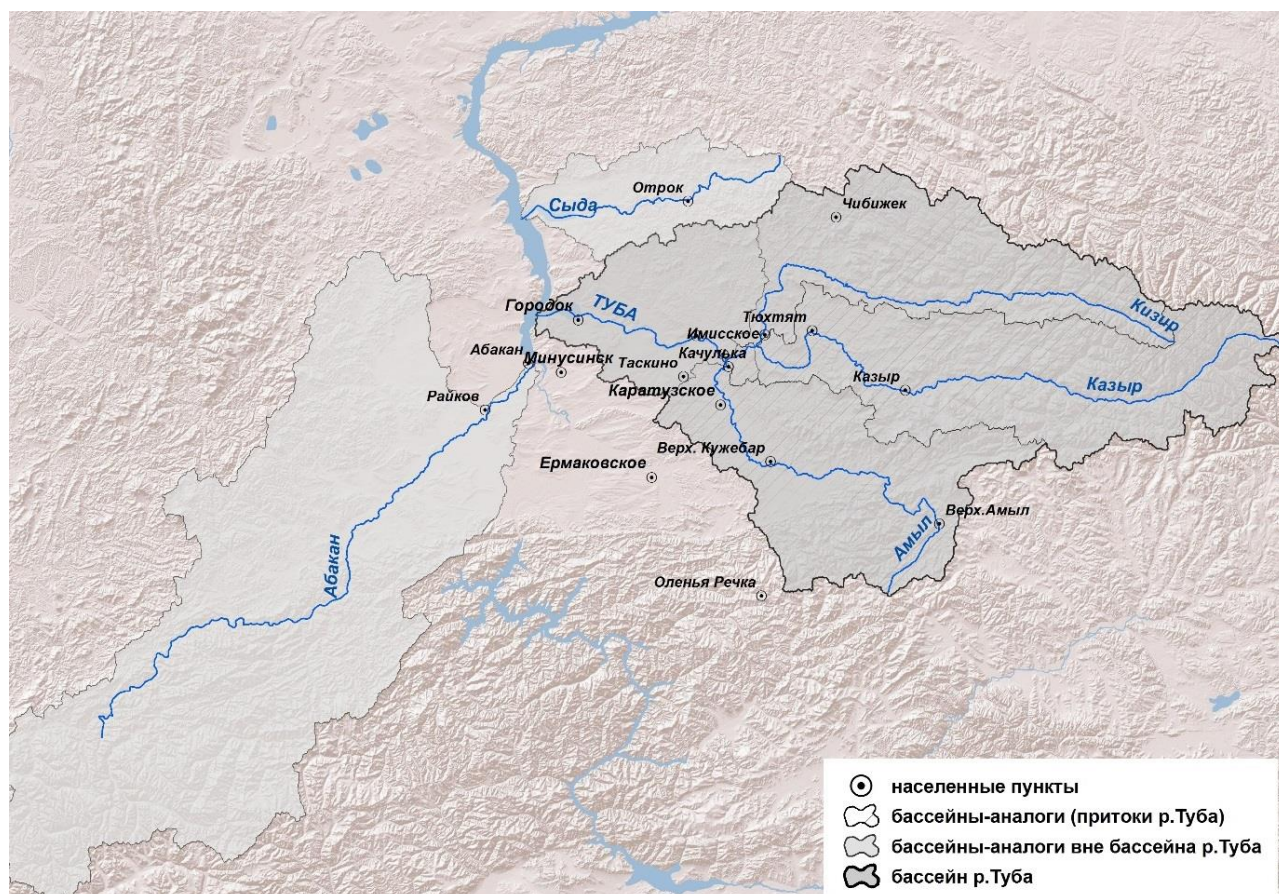


Рис. 1. Схема района исследований (бассейны р. Тубы и рек-аналогов)

Fig. 1. Scheme of the study area (catchments of the Tuba River and analog rivers)

По мнению М.В. Тронова [20], ледники являются индикаторами атмосферного увлажнения территории. На основе этой гипотезы ранее нами была разработана методика расчета средних многолетних осадков в бассейнах с современными оледенением и построены карты средних многолетних осадков для ряда бассейнов рек Алтая и Монголии [21]. Считаем целесообразным привести в данной работе экспертную оценку среднемноголетних твердых осадков в высокогорной части бассейна р. Тубы с использованием разработанной методики.

По формуле Ходакова–Кренке [22] оценивается абляция-аккумуляция на границе питания ледников:

$$A = 1,33(t_{\text{лет}} + 9,66)^{2,85},$$

где A – абляция-аккумуляция на границе питания ледников, мм; $t_{\text{лет}}$ – средняя многолетняя температура воздуха за летний период на границе питания.

Полученная величина A характеризует снегонакопление на границе питания, состоящее из твердых осадков, лавинного и метелевого переноса. Для того чтобы исключить лавинный и метелевый перенос, вводятся коэффициенты концентрации, показывающие отношение аккумулированного снега

на леднике к фоновым снегозапасам. Коэффициенты концентрации рассчитаны на основе данных снегомерных съемок в высокогорьях Алтая для ледников различных размеров и морфологических типов [21].

По оценкам А.Н. Кренке [22], в западной части Саян абляция-аккумуляция на высоте границы питания ледников составляет 400 г/см^2 или 4000 мм . Эта величина характеризует не отдельно взятый ледник, а регион в целом, поэтому мы использовали ее для расчета осадков на высоте границы питания.

Средний размер ледников в восточной части хребта Крыжина, являющегося водоразделом рек Казыр и Кизир, составляет $0,25\text{--}0,27 \text{ км}^2$. Близкий размер имеет ледник Стажер в бассейне Актру ($0,24 \text{ км}^2$). Для экспертной оценки примем, что коэффициент концентрации ледника Стажер характеризует коэффициенты концентрации ледников хребта Крыжина. В соответствии с нашими расчетами [21. С. 15, табл. 10] он равен $1,68$. Таким образом, сумма твердых осадков на высоте границы питания для рассматриваемой группы ледников составит около 2380 мм (необходимо отметить, что на высоте 2350 м и выше практически все осадки выпадают в твердом виде) [19]. Ранее М.Г. Гро-

свальд (ответственный редактор Каталога ледников) на основе данных о стоке определил сумму осадков в этом районе в 1800–1850 мм. Согласно нашим расчетам, величина годовых средних многолетних осадков на высоте границы питания ледников существенно больше приведенной М.Г. Гросвальдом [19].

По результатам выполненных расчетов и данных наблюдений на метеостанциях построена зависимость суммы твердых осадков от высоты для бассейна р. Тубы (рис. 2).

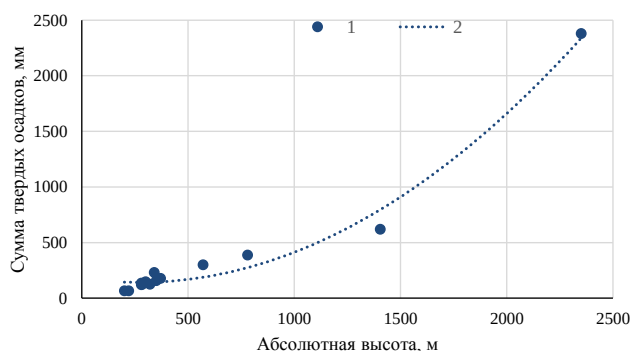


Рис. 2. График зависимости средней многолетней суммы твердых осадков от абсолютной высоты осадкомерного поста (бассейн р. Тубы). 1 – средняя многолетняя сумма осадков; 2 – линия тренда $y = 0,0005x^2 - 0,273x + 178,89$; $R^2 = 0,983$, где x – абсолютная высота, м; y – среднеемноголетняя сумма осадков за ноябрь–март, мм

Fig. 2. Curve of relationship between average long-term total solid precipitation and absolute height of gauge Tuba. 1 – average long-term precipitation; 2 – trend line $y = 0,0005x^2 - 0,273x + 178,89$; $R^2 = 0,983$, where x is the absolute height, m; y is the average annual precipitation (November–March), mm

Полученная зависимость может быть использована для экспертной оценки среднеемноголетних сумм зимних осадков в бассейне р. Тубы. Высокий коэффициент детерминации ($R^2=0,98$) свидетельствует о наличии в бассейне выраженной зависимости количества осадков от абсолютной высоты. Таким образом, применение используемых в гидрологических расчетах высотных зависимостей для оценки осадков в бассейне р. Тубы целесообразно (в отличие от некоторых бассейнов, например, р. Чарыш и ряда других притоков Верхней Оби, где высотные зависимости не работают [23]).

Река Амыл является одной из наиболее изученных в бассейне р. Енисей [24–26].

Выбор ее бассейна в качестве аналога обусловлен тем, что в непосредственной близости от него на высоте 1404 м имеется метеостанция Оленья речка, таким образом, данными об осадках обеспечена почти вся амплитуда высот.

Список метеорологических станций и постов и суммы среднеемноголетних осадков за ноябрь–март представлены в табл. 2.

Таблица 2. Абсолютная высота и сумма средних многолетних осадков за ноябрь–март в бассейне р. Амыл и нижней части бассейна р. Тубы [26]

Table 2. Absolute height and amount of average long-term precipitation for November–March in the Amyl basin and a low part of the Tuba basin [26]

Осадкомерный пост Gauge	H, м/м	Сумма осадков (XI–III) Total precipitation (XI–III)
Каратузское/Karatuzskoe	320	125
Верхний Куздебар Verkhny Kuzhebar	340	231
Верхний Амыл/Verkhny Amyl	780	388
Оленья Речка/Olenya Rechka	1404	473
Таскино/Taskino	280	120
Курагино/Kuragino	284	124
Чибизжек/Chibizhek	570	299
Ермаковское/Ermakovskoe	300	147
Минусинск/Minusinsk	200	65
Бугуртак/Bugurtak	280	134
Имисское/Imisskoe	350	158
Городок/Gorodok	220	65
Тюхтят/Tyukhtyak	370	177

Площадь бассейна реки Амыл в створе с Качулька (Качульские Выселки) – 9850 км², что составляет примерно одну треть водосборного бассейна реки Тубы в створе пос. Бугуртак (31800 км²). Абсолютные высоты бассейна р. Амыл в основном не превышают 1,5–2,0 км (максимальная высота – 2200 м, вершина без названия на водоразделе Амыла и Казыра). Большая часть водосборного бассейна залесена. На водораздельных участках выше 1,5 км имеются выходы скальных пород. В нижнем течении долина реки заболочена. Большая часть бассейна сосредоточена в высотном интервале от 250 до 1500 м, в том числе 38,5 % от общей площади находится на высоте от 250 до 500 м, 36,5 % – от 500 до 1000 м, 21,4 % – от 1000 до 1500 м [26].

Расстояние от гидрологического поста в с. Качулька до впадения в реку Тубу – 11 км [27]. Гидрологический пост в с. Качулька открыт в 1933 г., «...расположен в 14 км ниже впадения р. Копь. Прилегающая к речной долине местность крупнохолмистая, сложена скальными породами, местами выходящими на поверхность. Долина реки пойманная, шириной 3,0–3,5 км, поросла смешанным лесом и кустарником. Склоны крутые, залесенные. Пойма двухсторонняя: правобережная – шириной 240–250 м, в створе поста не затопливается; левобережная – шириной 870–860 м, начинает затопливаться при уровне 850 см. Русло слабоизвилистое, песчано-галечное, слабо деформирующееся. Берега суглинистые, размываемые, высотой 4–5 м, левый

берег порос кустарником, правый – луговыми травами. В 400 м ниже поста расположен остров Уджейский, в 160 м выше – песчано-илистая коса» [28. С. 32].

Исходные данные

Для расчетов твердых и жидких осадков использовались метеорологические данные станций и постов (табл. 2): месячные суммы осадков с октября предшествующего года по июнь (включительно) рассчитываемого. Кроме этого, по метеостанции Верхний Кужебар (расположенной примерно в центре исследуемого бассейна) использовались суточные характеристики: температура воздуха и осадки. Значения слоя стока половодья на гидропостах р. Амыл – с. Качулька и р. Туба – пос. Бугуртак за период с 1966 по 1980 гг. определены по справочникам [17, 18, 27]. Определение сроков и расчет слоя стока половодья за периоды с 1981 по 1986 и с 2008 по 2017 гг. выполнены авторами по комплексным графикам с суточным разрешением с использованием гидрографа с марта по июль и графика хода среднесуточных температур и осадков по метеостанции Верхний Кужебар или метеостанции Каратузское. За период с 2008 по 2017 гг. использовались данные по гидрологическому посту р. Туба – с. Курагино.

Результаты и обсуждение

Расчет зимних осадков

с использованием высотных зависимостей

В гидрологических исследованиях величина снегозапасов в горном бассейне рассчитывается, как правило, при помощи высотных зависимостей вида $\sum X = f(H)$ (зависимость суммы осадков на метеостанции от ее абсолютной высоты) [2, 29]. На рис. 2 приведена такая зависимость для р. Тубы, построенная с использованием ледников для оценки увлажнения в высокогорной части бассейна.

На рис. 3 для бассейна реки Амыл приведена зависимость среднемноголетних сумм зимних осадков на метеорологических станциях и постах от их абсолютной высоты (табл. 2).

Аналогичным образом определялись зависимости ежегодных сумм осадков за зимний период. Расчеты проводились для следующих зим: с 1965–1966 по 1985–1986 гг. и с 2007–2008 по 2016–2017 гг. С использованием полученных зависимостей были вычислены средние по бассейну суммы зимних осадков (табл. 3).

Для построения прогнозной стохастической модели проанализирована корреляционная связь рассчитанных сумм зимних осадков и слоя стока половодья в створе р. Амыл – с. Качулька (рис. 4).

На объем стока половодья, помимо снегозапасов, в значительной степени влияют жидкие осадки [2], поэтому для расчета стока половодья

необходимо учитывать как минимум осадки апреля и мая (рис. 5).

Анализ корреляционной зависимости показал, что включение в анализ осадков апреля и мая дает существенное улучшение связи (R^2 увеличился с 0,46 до 0,67). Причем если разделить половодье по продолжительности, это увеличение ещё более значительно (табл. 4, рис. 5).

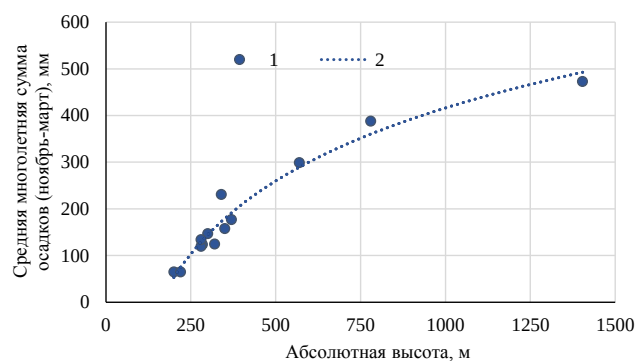


Рис. 3. График зависимости средней многолетней суммы осадков за ноябрь–март от абсолютной высоты осадкомерного поста (бассейн р. Амыл). 1 – средняя многолетняя сумма осадков; 2 – линия тренда $y = 225,7\ln(x) - 1142,9$; $R^2 = 0,962$, где x – абсолютная высота, м; y – среднемноголетняя сумма осадков (ноябрь–март), мм

Fig. 3. Curve of relationship between average long-term total solid precipitation and absolute height of the Amyl basin. 1 – average long-term precipitation; 2 – trend line $y = 225,7\ln(x) - 1142,9$; $R^2 = 0,962$, where x is the absolute height, m; y is the average annual precipitation (November–March), mm

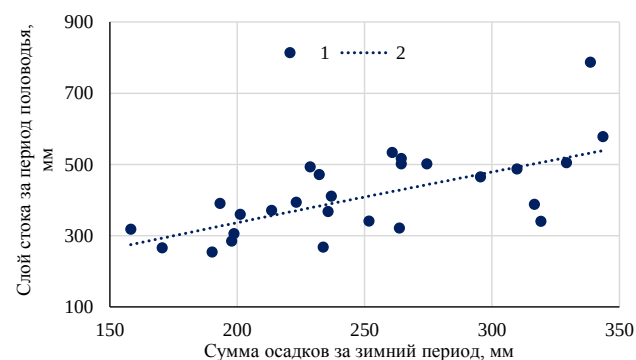


Рис. 4. График связи слоя стока половодья в створе р. Амыл–с. Качулька и суммы осадков за холодный период. 1 – слой стока; 2 – линия тренда $y = 3,362x^{0,869}$; $R^2 = 0,461$, где x – сумма осадков за зимний период, мм; y – слой стока за половодье, мм

Fig. 4. Curve of relationship between flood runoff depth at the Amyl–Kachulka site and total precipitation for the cold period. 1 – runoff depth; 2 – trend line $y = 3,362x^{0,869}$; $R^2 = 0,461$; $R^2 = 0,461$, where x is the total winter precipitation, mm; y is the flood runoff depth, mm

Таблица 3. Суммы осадков за ноябрь–март в бассейне реки Амыл

Table 3. Total precipitation for November–March in the Amyl basin

Годы Year	Число метеостанций и осадко- мерных постов, используемых для построения зависимости $\Sigma X = f(H)$ Number of weather stations and gauges used to plot $\Sigma X = f(H)$	ΣX , мм mm	R^2
1965–1966	11	338,6	0,94
1966–1967	11	223,2	0,75
1967–1968	нет данных об осадках за январь–март precipitation data for January and March are absent		
1968–1969	13	264,4	0,83
1969–1970	14	264,4	0,77
1970–1971	13	190,1	0,82
1971–1972	12	213,5	0,92
1972–1973	11	260,8	0,87
1973–1974	12	233,7	0,85
1974–1975	12	183,5	0,80
1975–1976	15	198,7	0,87
1976–1977	15	236,9	0,82
1977–1978	нет данных об осадках за ноябрь–декабрь precipitation data for November and December are absent		
1978–1979			
1979–1980	14	343,6	0,83
1980–1981	14	251,7	0,92
1981–1982	14	193,2	0,92
1982–1983	13	232,2	0,81
1983–1984	14	201,2	0,84
1984–1985	13	228,6	0,82
1985–1986	12	158,2	0,87
2007–2008	7	197,8	0,94
2008–2009	7	329,2	0,87
2009–2010	6	295,5	0,79
2010–2011	7	263,7	
2011–2012	6	170,5	0,70
2012–2013	7	309,8	0,89
2013–2014	6	235,7	0,97
2014–2015	6	316,7	0,84
2015–2016	6	274,4	0,92
2016–2017	6	319,2	0,98
2017–2018	6	242,6	0,76

Примечание: В 1979 г. зима началась в нижнем течении с 20.11, в верховьях с 11.11.

Note: In 1979, winter started downstream and upstream on 20.11 and 11.11, respectively.

Анализ связи стока половодья реки Тубы и бассейнов-аналогов

С учетом полученных данных по бассейну-аналогу (р. Амыл) выполнен анализ связи стока половодья р. Амыл и р. Тубы в районе гидропоста пос. Бугуртак (рис. 6). Анализ совмещенных гидрографов за 1981–1986 гг. показал, что колебания расходов рек Амыл и Туба синхронны. На рис. 6 представлены совмещенные гидрографы за 1981 г. Связь слоя стока половодья бассейна-аналога (р. Амыл) и основной реки (р. Туба) характеризуется коэффициентом детерминации $R^2=0,8$. На рис. 7 представлена зависимость слоя стока половодья для рек Амыл (бассейн-аналог) и Туба за периоды с 1966 по 1986 и

с 2008 по 2017 гг. Слой стока весеннего половодья в бассейне р. Тубы для гидропоста пос. Бугуртак за 1966–1980 гг. выбран из справочников [17, 18], 1981–1986 – рассчитан авторами. За период с 2008 по 2017 гг. слой стока определялся по расходам на гидрологическом посту р. Туба–с. Курагино.

Таким образом, р. Амыл может являться бассейном-аналогом для бассейна р. Тубы.

Таблица 4. Сумма зимних (ноябрь–март) и весенних (апрель–май) осадков и слой стока весеннего половодья р. Амыл (данные за 1966–1980 гг. [17, 18], 1981–1986 и 2008–2017 гг. – рассчитаны авторами)

Table 4. Total winter (November–March) and spring (April–May) precipitation; runoff depth of Amyl spring flood (data for 1966–1980 [17, 18], data for 1981–1986 and 2008–2018 were calculated by the authors)

Год Year	$\Sigma X(XI-III)$	$\Sigma X(IV-V)$	$\Sigma X(XI-V)$	Слой стока за период половодья, мм Runoff depth for the flood period, mm	Дата окончания половодья Flood-end date
1966	338,6	229,1	567,7	787	15.07
1967	223,2	111	334,2	394	11.07
1968				280	22.06
1969	264,4	214,8	479,2	502	29.06
1970	264,4	229,6	494	517	
1971	190,1	149,2	339,2	254	19.07
1972	213,5	148,2	361,7	371	2.07
1973	260,8	193,3	454,1	534	2.07
1974	233,7	126,4	360,1	268	11.06
1975	183,5	180,5	364	482	12.07
1976	198,7	136	334,7	306	30.06
1977	236,9	145,3	382,2	411	7.07
1978				492	5.07
1979				415	29.06
1980	343,6	161,7	505,3	578	12.07
1981	251,7	93,3	345	341	24.06
1982	193,2	193,6	386,8	391	24.06
1983	232,2	182,6	414,8	472	22.07
1984	201,2	177,5	378,7	360	27.06
1985	228,6	188,7	417,3	493	16.07
1986	158,2	184,9	343,1	318	5.07
2008	197,8	85,6	283,4	284,7	18.06
2009	329,2	129,1	458,3	505	24.06
2010	295,5	90,4	385,9	465,4	29.06
2011	263,7	128,4	392,1	321,2	21.06
2012	170,5	172,1	342,6	265,9	16.06
2013	309,8	187,4	497,2	487,4	6.07
2014	235,7	153,3	389	367,8	29.06
2015	316,7	79,6	396,3	368	29.06
2016	274,4	159,8	434,2	501,8	13.07
2017	319,2	82	401,2	340,2	20.06
2018	242,6	176,6	419,2	431,4	18.07
2013	309,8	187,4	497,2	487,4	6.07
2014	235,7	153,3	389	367,8	29.06
2015	316,7	79,6	396,3	368	29.06
2016	274,4	159,8	434,2	501,8	13.07
2017	319,2	82	401,2	340,2	20.06
2018	242,6	176,6	419,2	431,4	18.07

Примечание: пустые ячейки таблицы указывают на отсутствие первичной информации.

Note: empty lines indicate the absence of source information.

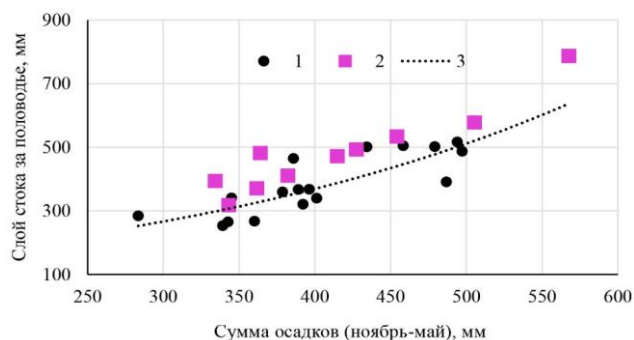


Рис. 5. График зависимости слоя стока половодья в створе р. Амыл–с. Качулька от суммы осадков за ноябрь–май (1966–1986; 2008–2017 гг.). 1 – годы с продолжением половодья в июне; 2 – в июле; 3 – линия тренда $y = 100,53e^{0,0033x}$; $R^2 = 0,673$, где x – сумма осадков (ноябрь–май), мм; y – слой стока за половодье, мм

Fig. 5. Curve of relationship between flood runoff depth at the Amyl-Kachulka. site on total precipitation for November–May (1966–1986; 2008–2017). 1 – years of high water proceeding in June; 2 – in July; 3 – trend line $y = 100,53e^{0,0033x}$; $R^2 = 0,673$, where x is the total precipitation (November–May), mm; y is the flood runoff depth, mm

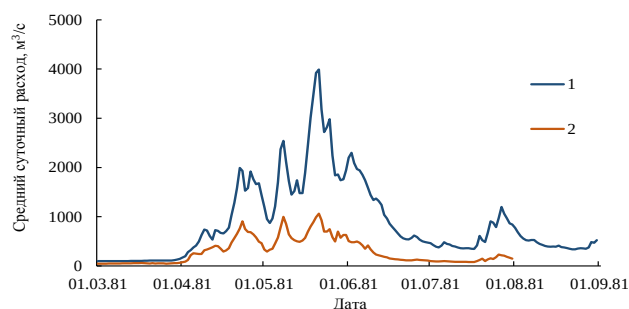


Рис. 6. Совмещенные гидрографы гидропостов р. Туба–пос. Бугуртак и р. Амыл–с. Качулька за 1981 г. Период половодья с 20.04 по 4.07 (1 – гидрограф гидропоста р. Тубы–пос. Бугуртак; 2 – гидрограф гидропоста р. Амыл–с. Качулька)

Fig. 6. Combined hydrographs of gauging station Tuba-Bugurtak and Amyl-Kachulka for 1981. High water period lasted from 20.04 to 04.07 (1 – hydrograph of gauging station Tuba-Bugurtak; 2 – hydrograph of gauging station Amyl-Kachulka)

Для оценки влияния физико-географических факторов водосборов бассейнов-аналогов на качество стохастической прогнозной модели проанализирована связь слоя стока половодья р. Тубы в створе Бугуртак с еще несколькими реками-аналогами, в числе которых основные притоки р. Туба – Амыл, Казыр и Кизир, а также соседние бассейны – Абакан и Сыда (табл. 5). Выбор потенциальных бассейнов-аналогов осуществлялся в соответствии с критериями, приведенными в п. 4.10 СП 33-101-2003 [13].

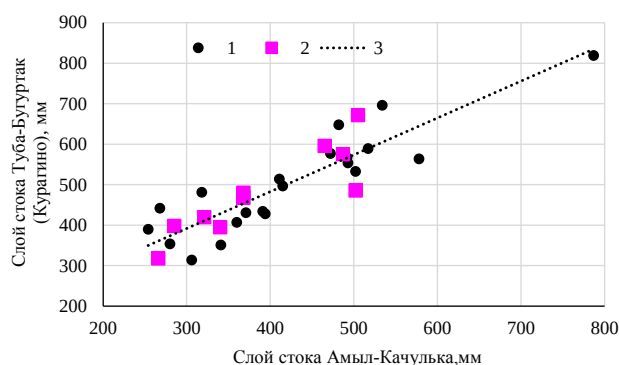


Рис. 7. График связи слоев стока за половодье бассейна-аналога р. Амыл и р. Тубы (1 – данные 1966–1986 гг., 2 – данные 2008–2017 гг., 3 – линия тренда $y = 0,91x + 118,75$; $R^2 = 0,797$, где x – слой стока р. Амыл–с. Качулька, мм; y – слой стока р. Туба–пос. Бугуртак (Курагино), мм

Fig. 7. Curve of relationship between flood runoff depth of the Amyl basin-аналог and Tuba River (1 – data for 1966–1986, 2 – 2008–2017, 3 – trend line $y = 0,91x + 118,75$; $R^2 = 0,797$, where x is the runoff depth (mm) at the site Amyl-Kachulka; y is the runoff depth (mm) at the site Tuba r.-Bugurtak vill. (Kuragino)

Помимо географической близости, однородности условий формирования стока и климатических условий, требуется учет следующих показателей: заболоченность, залесенность, озерность, средняя высота водосбора, гипсометрия и экспозиция склонов. Кроме того, при расчете максимального стока дополнительно должны соблюдаться следующие требования (п. 7.26 [13]):

$$L/A^{0,56} = L_a/A_a^{0,56},$$

$$JA^{0,50} = J_a A_a^{0,50},$$

где L – длина реки, км; A – площадь водосбора, км², J – уклон водной поверхности, ‰; L_a , A_a , J_a – то же для бассейна-аналога.

Перечисленные характеристики для р. Тубы в створе Бугуртак и ее рек-аналогов, а также коэффициенты детерминации зависимости слоев стока половодья приведены в табл. 5.

Наиболее высокий коэффициент детерминации слоя стока половодья – 0,903 у р. Тубы с р. Казыр в створе пос. Казыр (Пономарево). Данный бассейн по ряду параметров (степень залесенности, соотношение уклона и длины реки с площадью бассейна) наилучшим образом подходит в качестве аналога. При этом средняя высота бассейна р. Казыр существенно выше (более чем на 300 м), чем у исследуемого. Очевидно, решающее значение имеет соотношение тех частей водосборов, на которых формируется большая часть стока.

Таблица 5. Характеристики бассейнов рек-аналогов и коэффициенты детерминации зависимостей слоя стока половодья р. Тубы в створе Бугуртак и рек-аналогов

Table 5. Characteristics of rivers from basins-analogies and determination coefficients of dependences of flood runoff depth of the Tuba (at Bugurtak) and rivers-analogues

Река–пост River–Gauge	Период наблюдений Observation period	Площадь водосбора (A), км ² Catchment area, km ²	Средняя высота водосбора, м Average altitude catchment area, m	Длина реки (L), км River length (L), km	Средний уклон реки (I) Average slope (I), ‰	$L/A^{0.56}$	$JA^{0.50}$	Заболоченность Swampiness, %	Залесенность Forest cover, %	Озерность Lake percentage, %	Коэффициент связи с р. Туба–Бугуртак Coupling coefficient with Tuba – Bugurtak (R^2)
Туба–Бугуртак (с 2007 Курагино) Tuba–Bugurtak (Kuragino from 2007)	1966–1986, 2008–2017	31800 32900	976	390	4,7	1,17	838,13	<1	58	<1	
Амыл–Качулька Amyl–Kachulka	1966–1986, 2008–2017	9850	797	246	4,5	1,43	446,61	2	94	0	0,8
Амыл–Верхний Кужебар Amyl–Verkhny Kuzhebar	1966–1986, 2008–2017	5270	958	172	6,1	1,42	442,83	<1	89	<1	0,874
Амыл–Верхний Амыл Amyl–Verkhny Amyl	1966–1980, 1982–1986	537	1121	47	14,7	1,39	340,65	0	87	0	0,687
Абакан–Райков Abakan–Raikov	1966–1986, 2008–2017	31300	1062	475	4,2	1,44	743,06	<1	55	<1	0,437
Кизир–Имисское Kizir–Imisskoe	1966–1986, 2008–2017	9080	965	292	5,4	1,77	514,56	<1	84	<1	0,890
Казыр–Казыр Kazyr–Kazyr	1966–1969, 1976–1986, 2008–2017	9160	1304	247	6,5	1,49	622,10	0	55	<1	0,903
Сыда–Отрок Syda–Otrok	1966–1970, 1976–1986, 2008–2017	1480	660	81	6,7	1,36	257,75	<1	85	0	0,360

Высокие коэффициенты детерминации у бассейнов-аналогов р. Кизир – с. Имисское и р. Амыл – с. Верхний Кужебар, имеющих наиболее близкие к исследуемому средние высоты бассейна.

Слабая связь характерна для бассейнов рек Абакан и Сыда (коэффициенты детерминации R^2 0,44 и 0,36 соответственно).

В первом случае, очевидно, это связано с тем, что бассейн р. Абакан приурочен преимущественно к подветренному склону Абаканского хребта, а бассейн р. Тубы – к наветренным склонам Саян. Во втором случае – слишком большая разница площадей (в 20 раз) и средних высот бассейнов. В действовавших ранее СНиП 2.01.14-83 [30] в перечне требований к бассейну-аналогу значилась разница в площадях водосборов – не более чем в 10 раз, а средняя высота бассейнов горных рек не должны была различаться более чем на 300 м. Очевидно, бассейн р. Сыды перечисленным требованиям не соответствует.

Прогноз слоя стока половодья р. Тубы с использованием бассейна-аналога

Для прогноза слоя стока реки Тубы с помощью бассейна аналога выполним проверку полученной зависимости в 2008–2018 гг. (рис. 5).

Как правило, на практике реализовать обоснованный среднесрочный прогноз возможно только для «гарантированного» стока, сформированного таянием зимних осадков, поскольку спрогнозировать жидкие осадки периода половодья с большой заблаговременностью не представляется возможным.

При помощи полученных ранее зависимостей (рис. 5, 7) рассчитан гарантированный сток половодья сначала в бассейне-аналоге (р. Амыл – с. Качулька), а затем – в створе р. Туба–пос. Бугуртак (Курагино). Результаты представлены в табл. 6. Разница между прогнозным и наблюдаемым слоем стока половодья на р. Тубе оказалась существенной – от 14 до 282 мм. Очевидно, на это в значительной мере должны были повлиять жидкие осадки апреля–мая. Анализ сумм осадков за апрель–май в бассейне-аналоге Амыл–Качулька показал, что они сильно изменяются от года к году (табл. 4).

Влияние жидких осадков на сток в значительной степени зависит от того, к какой стадии половодья были приурочены дожди.

На примере лет, когда суммы осадков за апрель–май составили менее 100 мм (2008, 2010, 2015, 2017 гг.), рассмотрим, каким образом влияют на сток половодья суммы жидких осадков и их величины в отдельные месяцы.

Таблица 6. Рассчитанный и прогнозный слой стока половодья р. Тубы, определенный с помощью бассейна-аналога

Table 6. Flood runoff depth of the Tuba River calculated and predicted from a basin-analogy

Год Year	Слой стока, мм/Runoff depth, mm				
	Амыл–Качулька Amyl–Kachulka		Туба–Бугуртак (Курагино) Tuba–Bugurtak (Kuragino)		
	расчет calculated	фактиче- ский really	расчет calculated	фактиче- ский really	абсолютная ошибка absolute error
2008	284,7	193,1	398	294	104
2009	505,0	297,9	672	390	282
2010	465,4	266,6	596	361	235
2011	321,2	240,0	420	337	83
2012	265,9	176,5	318	279	39
2013	487,4	279,4	575	373	202
2014	367,8	218,8	480	318	162
2015	368,0	285,9	468	379	89
2016	501,8	248,6	486	345	141
2017	340,2	288,2	394	381	14
2018	412,6	223,9	558	322	236

Так, в 2008 и 2010 гг. суммы осадков за апрель–май примерно соизмеримы. Но в 2008 г. они соизмеримы и по величине внутри месяцев, в то время как в 2010 г. основная масса осадков выпала в апреле, т. е. на снежный покров и почву, находящуюся в процессе оттаивания и имеющую коэффициент стока существенно больший, чем в мае, когда таяние снежного покрова закончилось, начался период вегетации, увеличиваются потери влаги на испарение и транспирацию [31]. Аналогичная картина наблюдается и при сравнении 2014 и 2016 гг. Суммы осадков примерно соизмеримы (150–160 мм), а разница в стоке значительна (в 2014 – 149, а в 2016 – 253 мм). В 2014 г. основная масса весенних осадков выпала в мае (табл. 4), а в 2016 г. распределение осадков примерно равномерное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леви И.И. Инженерная гидрология. – М.: Высшая школа, 1968. – 236 с.
2. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс Гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 420 с.
3. Swain J.B., Patra K.C. Impact of catchment classification on streamflow regionalization in ungauged catchments // SN Applied Sciences. – 2019. – Vol. 1. – P. 1–14.
4. Betterle A., Schirmer M., Botter G. Flow dynamics at the continental scale: Streamflow correlation and hydrological similarity // Hydrological processes. – 2019. – Vol. 33. – № 4. – P. 627–646.
5. 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.
6. Joint spatial and temporal modeling for hydrological prediction / Q. Zhao, Y. Zhu, K. Shu, D. Wan, Y. Yu, X. Zhou, H. Liu // Ieee Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 78492–78503.
7. Tegegne G., Kim Y. O. Modelling ungauged catchments using the catchment runoff response similarity // Journal of hydrology. – 2018. – Vol. 564. – P. 452–466.
8. Streamflow regionalization using a similarity approach in ungauged basins: Application of the geo-environmental signatures in the Karkheh River Basin, Iran / B. Choubin, K. Solaimani, F. Rezanezhad, M.H. Roshan, A. Malekian, S. Shamshirband // Catena. – 2019. – Vol. 182. – P. 104128.
9. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: a comprehensive review / Y. Guo, Y. Zhang, L. Zhang, Z. Wang // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. – 2021. – Vol. 8. – № 1. – P. e1487.

Выводы

Сравнительный анализ рек-аналогов показал, что использование в качестве аналогов рек-притоков р. Тубы – р. Казыр, Кизир и Амыл – для характеристики слоя стока половодья дает коэффициенты детерминации близкие к 0,9. Как указывалось ранее, бассейн-аналог должен иметь факторы формирования половодья близкие к исследуемой реке. Это должно выражаться в условиях формирования осадков (например, наветренный склон или подветренный). Преимущество при расчетах должно отдаваться бассейну-аналогу со схожими физико-географическими условиями (заболоченность, залесенность водосбора и др.), средней высотой водосбора, близкой к исследуемому бассейну. Нецелесообразно использование в качестве аналога бассейна, находящегося в схожих физико-географических условиях, но существенно меньшего по площади (более чем в 10 раз) и с меньшими абсолютными высотами (более чем на 300 м). На практике для горных рек выбор бассейна-аналога ограничен наличием данных гидрометеорологических наблюдений на разных абсолютных высотах.

Анализ стока половодья р. Амыл показал, что для построения стохастической прогнозной модели стока, помимо зимних осадков, желательно учитывать влияние дождей на спаде половодья. К сожалению, на момент выпуска среднесрочного прогноза учесть величину и распределение жидких осадков не представляется возможным.

Для среднесрочного прогноза стока половодья р. Тубы в створе пос. Бугуртак возможно использование бассейна-аналога р. Амыл в створе – с. Качулька при расчете гарантированного слоя стока за половодье (под гарантированным слоем стока понимается слой стока от таяния снега без учета жидких осадков в период половодья).

10. Singh N.M., Devi T.T. Regionalization methods in ungauged catchments for flow prediction: review and its recent developments // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2022. – Vol. 15. – № 11. – P. 1019.
11. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: a review // *Hydrological processes*. – 1995. – Vol. 9. – № 3–4. – P. 251–290.
12. Razavi T., Coulibaly P. Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods // *Journal of hydrologic engineering*. – 2013. – Vol. 18. – № 8. – P. 958–975.
13. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
14. Beven K.J. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling // *Hydrology and earth system sciences*. – 2000. – Vol. 4. – № 2. – С. 203–213.
15. Sabau D. A., Şerban G., Tudose T. Correlation between precipitation and orography – key element of the Spatial Decision Support System for prevention and management of floods in the Firiza Basin (Northwest Romanian Carpathians) // *Forum Geogr.* – 2022. – Vol. 21. – № 1. – P. 5–17.
16. Meshyk A., Barushka M., Marozava V. Snow as a contributor to spring flooding in Belarus // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. – P. 18826–18836.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений). Т. 16. Ангара-Енисейский район. Вып. 1. Енисей. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 288 с.
18. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1971–1975 гг. и весь период наблюдений). Т. 16. Ангара-Енисейский район. Вып. 1. Енисей. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 302 с.
19. Ресурсы поверхностных вод. Каталог ледников СССР. Т. 16. Ангара-Енисейский район. Вып. 1. Енисей. Ч. 3–5. Вып. 2. Ангара. Ч. 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 64 с.
20. Тронов М.В. Вопросы связи между климатом и оледенением. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1956. – 202 с.
21. Оценка среднего многолетнего увлажнения и поверхностного стока бессточного бассейна реки Ховд (Западная Монголия) / В.П. Галахов, О.В. Ловцкая, С.Ю. Самойлова, Ч. Аюрзана, Д. Отгонбаяр. – Барнаул: Изд-во «Азбука», 2013. – 109 с.
22. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 288 с.
23. 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. DOI: <https://doi.org/10.15372/KZ20210605>.
24. Пространственная структура формирования стока на основе математического моделирования / Г.В. Пряхина, Е.С. Зелепукина, С.А. Гаврилкина, В.А. Соловьев, Н.И. Амбурцева, Т.А. Виноградова // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2020. – Т. 84. – № 2. – С. 218–227.
25. Бураков Д.А., Гордеев И.Н. Оценка предвесенних снегозапасов в бассейнах Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ // *География и природные ресурсы*. – 2013. – № 1. – С. 72–78.
26. Сравнительный анализ методик прогноза максимальных уровней и объема стока периода половодья горной реки / В.П. Галахов, О.В. Ловцкая, С.Ю. Самойлова, Е.В. Мардасова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 193–203.
27. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. РСФСР. Вып. 12. Бассейн Енисея (без бассейна Ангара и Пясины). – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 464 с.
28. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1985 г. Т. 1. РСФСР. Вып. 12. Бассейн Енисея (без бассейна Ангара) и Пясины. – Обнинск: ВНИГМИ-МЦД, 1987. – 414 с.
29. Learning about precipitation lapse rates from snow course data improves water balance modeling / F. Avanzi, G. Ercolani, S. Gabellani, E. Cremonese, P. Pogliotti, G. Filippa, S. Juglair // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2021. – Vol. 25. – № 4. – P. 2109–2131.
30. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 36 с.
31. Галахов В.П. Условия формирования половодья малой горной реки (по исследованиям в бассейне реки Майма) // *Известия АО РГО*. – 2015. – № 3 (38). – С. 35–40.

Информация об авторах

Владимир Прокопьевич Галахов, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. galahov@iwerp.ru

Светлана Юрьевна Самойлова, кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. <http://orcid.org/0000-0002-3365-0048>. bastet05@list.ru

Ольга Вольфовна Ловцкая, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. lov@iwerp.ru <http://orcid.org/0000-0002-3942-1350>

Елена Владимировна Мардасова, старший преподаватель кафедры экономической географии и картографии, Институт географии Алтайского государственного университета, Россия, 656049, Барнаул, пр. Ленина, 61. mardasova_ev@mail.ru

Поступила в редакцию: 23.05.2023

Поступила после рецензирования: 06.06.2023

Принята к публикации: 17.01.2024

REFERENCES

1. Levy I.I. *Engineering hydrology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1968. 236 p. (In Russ.)
2. Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. *Course of hydrological forecasts*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 420 p. (In Russ.)
3. Swain J.B., Patra K.C. Impact of catchment classification on streamflow regionalization in ungauged catchments. *SN Applied Sciences*, 2019, vol. 1, pp. 1–14.
4. Betterle A., Schirmer M., Botter G. Flow dynamics at the continental scale: Streamflow correlation and hydrological similarity. *Hydrological processes*, 2019, vol. 33, no 4, pp. 627–646.
5. Burakov D.A., Kosmakova V.F., Volkovskaya N.P. 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. (In Russ.)
6. Zhao Q., Zhu Y., Shu K., Wan D., Yu Y., Zhou X., Liu H. Joint spatial and temporal modeling for hydrological prediction. *Ieee Access*, 2020, vol. 8, pp. 78492–78503.
7. Tegegne G., Kim Y.O. Modelling ungauged catchments using the catchment runoff response similarity. *Journal of hydrology*, 2018, vol. 564, pp. 452–466.
8. Choubin B., Solaimani K., Rezanezhad F., Roshan M. H., Malekian A., Shamshirband S. Streamflow regionalization using a similarity approach in ungauged basins: Application of the geo-environmental signatures in the Karkheh River Basin, Iran. *Catena*, 2019, vol. 182, pp. 104128.
9. Guo Y., Zhang Y., Zhang L., Wang Z. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: a comprehensive review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2021, vol. 8, no 1, pp. e1487.
10. Singh N.M., Devi T.T. Regionalization methods in ungauged catchments for flow prediction: review and its recent developments. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, vol. 15, no. 11, pp. 1019.
11. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological processes*, 1995, vol. 9, no. 3–4, pp. 251–290.
12. Razavi T., Coulibaly P. Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods. *Journal of hydrologic engineering*, 2013, vol. 18, no 8, pp. 958–975.
13. *Code of rules for design and construction. 33-101-2003. Determination of major design hydrological characteristics*. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. (In Russ.)
14. Beven K.J. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and earth system sciences*, 2000, vol. 4, no. 2, pp. 203–213.
15. Sabau D.A., Șerban G., Tudose T. Correlation between precipitation and orography – key element of the Spatial Decision Support System for prevention and management of floods in the Firiza Basin (Northwest Romanian Carpathians). *Forum Geografic*, 2022, vol. 21, no. 1, pp. 5–17.
16. Meshyk A., Barushka M., Marozava V. Snow as a contributor to spring flooding in Belarus. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 18826–18836.
17. *Surface water resources of the USSR. Basic hydrological characteristics (for 1963–1970 and the entire observation period). Vol. 16. Angara-Yenisei region. Iss. 1. Yenisei*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 288 p. (In Russ.)
18. *Surface water resources of the USSR. Basic hydrological characteristics (for 1971–1975 and the entire observation period). Vol. 16. Angara-Yenisei region. Iss. 1. Yenisei*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 302 p. (In Russ.)
19. *Surface water resources. Catalog of glaciers of the USSR. Vol. 16. Angara-Yenisei region. Iss. 1. Yenisei. P. 3–5. Iss. 2. Angara. P. 1. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973. 64 p. (In Russ.)*
20. Tronov M.V. *Relationship between climate and glaciation*. Tomsk, TSU Publ. house, 1956. 202 p. (In Russ.)
21. Galakhov V.P., Lovtskaya O.V., Samoilova S.Yu., Ayurzana Ch., Otgonbayar D. *Estimation of the average long-term moisture content and surface runoff of the drainless basin of the Khovd River (Western Mongolia)*. Barnaul, Azbuka Publ. house, 2013. 109 p. (In Russ.)
22. Krenke A.N. *Mass transfer in the glacial systems of the USSR*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982. 288 p. (In Russ.)
23. Galakhov V.P., Samoylova S.Yu., Mardasova E.V. Assessment of the amount of winter precipitation in mountain basins and their influence on flood formation (Charysh and Anuy river basins). *Earth's Cryosphere*, 2021, vol. 25, no 6, pp. 51–62. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15372/KZ20210605>.
24. Pryakhina G.V., Zelepukina E.S., Gavrilkina S.A., Solovyev V.A., Amburtseva N.I., Vinogradova T.A. Mathematical modeling of runoff formation spatial structure. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2020, vol. 84, no 2, pp. 218–227. (In Russ.)
25. Burakov D.A., Gordeev I.N. Assessment of pre-spring snow reserves in the basins of Krasnoyarsk and Sayano-Shushensk reservoirs. *Geography and natural resources*, 2013, no. 1, pp. 72–78. (In Russ.)
26. Galakhov V.P., Lovtskaya O.V., Samoilova S.Yu., Mardasova E.V. Comparative analysis of methods for forecasting maximum levels and volumes of flood runoff of a mountain river. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 193–203. (In Russ.)
27. *State water cadastre. Long-term data of surface water regime and resources. Vol. 1. Iss. 12. Basins of the Yenisei (without the Angara basin) and Pyasina*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 463 p. (In Russ.)
28. *State water cadastre. Annual data on the regime and resources of land surface waters. 1985 Vol. 1. RSFSR. Iss. 12. The Yenisei basin (without the Angara basin) and Pyasina*. Obninsk, VNIGMI-MTsD Publ., 1987. 414 p. (In Russ.)
29. Avanzi F., Ercolani G., Gabellani S., Cremonese E., Pogliotti P., Filippa G., Juglair S. Learning about precipitation lapse rates from snow course data improves water balance modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, vol. 25, no 4, pp. 2109–2131.
30. *Standards of construction engineering. 2.01.14-83. Determination of design hydrological characteristics. Gosstroy of the USSR*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 36 p. (In Russ.)

31. Galakhov V.P. Conditions for formation of flood on small mountain river (the Maima river basin as a case study). *Bulletin of the Altay branch of the Russian geographical society*, 2015, vol. 38, no. 1, pp. 35–40. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir P. Galakhov, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation. galahov@iwep.ru

Svetlana Yu. Samoilova, Cand. Sc., Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation. bastet@iwep.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3365-0048>

Olga V. Lovtskaya, Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation. lov@iwep.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3942-1350>

Elena V. Mardasova, Senior Lecturer, Altai State University, 61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russian Federation. mardasova_ev@mail.ru

Received: 23.05.2023

Revised: 06.06.2023

Accepted: 17.01.2024