

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 551.557

DOI: 10.15372/KZ20210605

**ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ЗИМНИХ ОСАДКОВ В ГОРНЫХ БАССЕЙНАХ
И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СТОК ВО ВРЕМЯ ПОВОДОДЬЯ
(НА ПРИМЕРЕ РЕК ЧАРЫШ И АНУЙ, АЛТАЙ)****В.П. Галахов¹, С.Ю. Самойлова¹, Е.В. Мардасова²**¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия; galahov@iwep.ru, bastet@iwep.ru² Алтайский государственный университет,
656049, Барнаул, просп. Ленина, 61, Россия; mardasova_ev@mail.ru

Выполнена оценка ежегодной суммы осадков за зимний период с 1967 по 2006 г. в бассейнах горных рек Алтая (Чарыш и Ануй). Расчет проведен на основе кинематической модели движения воздушных масс при пересечении ими орографических барьеров. В качестве исходных данных для расчета по модели использованы месячные суммы осадков с ноября по март по данным метеорологических станций и постов, расположенных в пределах бассейнов и на прилегающей территории. Оценивались зависимости слоя стока половодья в гидростворах “свх. Чарышский” на р. Чарыш и “свх. Ануйский” на р. Ануй от сумм зимних осадков и осадков периода половодья (апрель–июнь) по однофакторным зависимостям и посредством множественного корреляционного и регрессионного анализа.

Ключевые слова: Алтай, р. Чарыш, р. Ануй, зимние осадки, половодье, слой стока.

**ASSESSMENT OF THE AMOUNT OF WINTER PRECIPITATION
IN MOUNTAIN BASINS AND THEIR INFLUENCE ON FLOOD FORMATION
(CHARYSH AND ANUY RIVER BASINS, ALTAI AS A CASE STUDY)****V.P. Galakhov¹, S.Yu. Samoilova¹, E.V. Mardasova²**¹ Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS,
Molodezhnaya str. 1, Barnaul, 656038, Russia; galahov@iwep.ru, bastet@iwep.ru² Altai State University, Lenina ave. 61, Barnaul, 656049, Russia; mardasova_ev@mail.ru

The paper presents an estimate of annual precipitation amount for the winter period (1967–2006) in the basins of the Charysh and Anuy mountain rivers. A kinematic model for air mass movement when crossing orographic barriers is used for calculations. The initial data are monthly precipitation totals (November–March) obtained from meteorological and gaging stations located within the basins and at the adjacent territory. Based on the single-factor dependencies and multiple correlation/regression analysis, we assess the dependences of melt runoff depth on total precipitation for winter and flood (April–June) time periods for gaging stations “Charyshsky state farm” on Charysh river and “Anuysky state farm” on Anuy.

Key words: Altai, Charysh river, Anuy river, winter precipitation, high water, runoff depth.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия климатические изменения оказывают существенное влияние на водный режим рек высоких и средних широт, особенно в период половодья. Это связано в первую очередь с изменением количества твердых осадков, смещением сроков и сокращением продолжительности залегания снежного покрова [Водные ресурсы..., 2008; Barnett et al., 2005; DeWalle, Rango, 2008]. Повышение температур в холодный период и, как следствие, уменьшение глубины сезонного промерзания почвы вызывают увеличение водности в межень и уменьшение талого стока весной за счет потерь на инфильтрацию [Водные ресурсы..., 2008; Калужный, Лавров, 2012].

На реках бассейна Оби начиная с 1970-х гг. наблюдается уменьшение годового стока рек до 5–22 % [Водные ресурсы..., 2008]. В то же время растет повторяемость неблагоприятных гидрологических процессов, связанных с затоплением территорий населенных пунктов в период половодья и дождевых паводков [Пузанов и др., 2018].

Главной задачей для гидрологических прогнозов является оценка снегозапасов в водосборном бассейне, так как до 70 % стока половодья формируется талыми водами [Аполлов и др., 1974]. Традиционно в гидрологических исследованиях сумму осадков в горных районах увязывают с абсолютной высотой пунктов наблюдений [Харшан,

1970; Ревякин, Кравцова, 1977; Мухин, 2013]. В последние десятилетия используются модели распределения снегозапасов, включающие целый ряд характеристик рельефа (высота, экспозиция склонов, уклоны, расстояние до орографического барьера и др.) [Самойлова, Галахов, 2020; Li et al., 2015], а также ландшафтов [Генсиоровский, 2007], либо эти параметры в комплексе [Лубенец, Черных, 2019]. Такой подход дает хороший результат при использовании данных снегомерных съемок.

Широко применяются методы дистанционного зондирования, но и они в горных районах дают удовлетворительный результат только совместно с натурными наблюдениями [Игловская, Нарожный, 2010; Ромасько, Бураков, 2017; Чурюлин и др., 2018].

На Алтае приводораздельные участки и склоны горных хребтов, где формируются максимальные снегозапасы, не охвачены сетью инструментальных наблюдений.

Настоящая работа является частью исследования по оценке снегозапасов и прогнозированию стока половодья на горных реках бассейна Верхней Оби. Ранее разработанная методика [Галахов, 2003] позволяет оценивать сумму зимних осадков

в горных бассейнах, расположенных в условиях недостатка гидрометеорологической информации. Методика успешно использована в гидрологических расчетах и среднесрочных прогнозах уровней воды на р. Чарыш [Галахов и др., 2016, 2018]. Несмотря на то что объем половодья и максимальные уровни воды зависят от одних и тех же факторов (запасы воды в снежном покрове, жидкие осадки половодья и водопоглотительная емкость бассейна) [Попов, 1979], далеко не всегда их связь однозначна. Большое влияние на формирование уровней оказывают интенсивность и ход снеготаяния в бассейне и, как следствие, скорость поступления талых вод в речную сеть, а также заторы.

В работе выполнена оценка зимних осадков в бассейнах рек Чарыш и Ануй с помощью авторской модели распределения снегозапасов в условиях сложной орографии. Для верификации результатов моделирования проанализирована связь суммы зимних осадков и объема половодья, выраженного в слое стока.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования выбраны два бассейна рек Чарыш и Ануй (рис. 1), левых



Рис. 1. Бассейны рек Чарыш и Ануй.

1 – гидрометеорологические станции и посты; 2 – гидрологические посты; 3 – границы бассейнов рек Чарыш и Ануй.

притоков р. Оби первого порядка, которые расположены в пределах Алтайской горной области. Оба бассейна находятся на северном макросклоне Алтайской горной области и имеют абсолютные высоты 150–200 м в приустьевой части, 2000–2300 м и более в приводораздельной (см. рис. 1).

Бассейн р. Чарыш. Исток реки Чарыш находится в месте сочленения Корогонского и Семинского хребтов на высоте 1800 м. С севера бассейн ограничен Башчелакским хребтом, с юга – Тигирецким и Коргонским хребтами северного Алтая (1800–2300 м). Площадь бассейна 22 000 км², длина реки 547 км, средний уклон 3 ‰. Условно бассейн можно разделить на две части: горная до с. Карпово (13 900 км²) и предгорная (меньше по площади). В створе гидропоста “Совхоз Чарышский” бассейн р. Чарыш имеет площадь 20 700 км², его средняя высота 750 м. Лесистость бассейна составляет 15 %. Средний многолетний расход воды 193 м³/с, максимальный – 2650 м³/с (1958 г.). Половодье многопиковое, длится, как правило, с конца марта до второй декады июля с максимумом в конце мая – начале июня. Доля стока половодья в годовом стоке 51–84 % [Ресурсы..., 1975].

Бассейн р. Ануй ограничен с запада Башчелакским и с востока Ануйским хребтами. Длина реки составляет 327 км, общая площадь бассейна 6930 км². Площадь водосбора до гидропоста “Совхоз Ануйский” составляет 4870 км², средняя высота водосбора 790 м, средний уклон реки 5.1 ‰. Лесистость бассейна составляет 20 %. Средний многолетний расход воды 31.1 м³/с, максимальный – 462 м³/с (1966 г.). Половодье многопиковое, длится с конца марта до конца июня, максимума достигает в третьей декаде апреля. В среднем за половодье проходит от 42 до 73 % годового стока [Ресурсы..., 1975]. В отличие от бассейна р. Чарыш, водосбор р. Ануй до гидропоста “свх. Ануйский” целиком представляет собой низко- и среднегорья, ниже по течению находится предгорная равнина площадью около 2000 км².

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Традиционно в гидрологических исследованиях сумму осадков увязывают с абсолютной высотой пунктов наблюдений [Харшан, 1970; Ревякин, Кравцова, 1977; Мухин, 2013]. Проверка этой закономерности в бассейнах рек Чарыш и Ануй показала отсутствие статистически значимой связи зимних осадков и абсолютной высоты в большинстве лет [Галахов и др., 2020]. Кроме того, наивысшей метеостанцией в бассейне р. Чарыш является Усть-Кан (1037.4 м), в бассейне р. Ануй – пост Куяган (560 м), а максимальные абсолютные высоты в бассейнах достигают 2000 м и более. Таким образом, интерполяция ежегодных зимних осадков в исследуемых бассейнах на основе их зависи-

мости от абсолютной высоты не представляется возможной.

Оценка сумм осадков за холодный период с помощью орографической добавки к скорости вертикальных движений воздушных масс. Влияние гор на атмосферные фронты разнообразно: оно проявляется в задерживании атмосферных фронтов, в изменении скорости перемещения того или иного участка фронта, в обострении фронтов, образовании фронтальных волн перед наветренной стороной хребта и размывании фронтальных зон при их переваливании через хребты. Своеобразным является процесс, связанный с огибанием фронтальной зоной орографического препятствия [Шакина, 1985; Галахов, 2003].

Известно, что интенсивность осадков зависит от скорости вертикальных движений воздушных потоков [Роджерс, 1979]. Определить скорости вертикальных движений за счет процессов, происходящих в самой облачной массе, очень сложно. Но можно определить добавку к скорости вертикальных движений воздушных масс (т. е. изменение скорости вертикальных движений воздушных масс за счет орографии) при формировании твердых осадков с помощью достаточно простых кинематических моделей.

На основе принципов движения воздушных потоков, огибающих препятствие или переваливающих через него, описанных в работах [Барри, 1964; Роджерс, 1979; Скорер, 1980; Матвеев, 1981, 1984], ранее авторами была разработана упрощенная кинематическая модель распределения твердых осадков в условиях сложной орографии. Она требует минимального набора исходных данных, включающих абсолютную высоту подстилающей поверхности, снятую с топографической основы с определенным шагом сетки, скорость и направление подхода атмосферных фронтов, а также температуру приземного слоя воздуха по данным аэрологических станций. Алгоритм и подробное описание модели опубликованы в работе [Галахов, 2003]. Данный способ расчета применим лишь для зимних условий, когда температура подстилающей поверхности отрицательна и более или менее однородна, а также в условиях низких и средних гор (высотные отметки не более 2 км). В исследуемых бассейнах это условие в основном соблюдается.

На основе данной модели для бассейнов рек Ануй и Чарыш построена матрица территории с шагом сетки 25 × 25 км. В нижнем левом углу каждой ячейки сетки были рассчитаны средние орографические добавки к скорости вертикальных движений воздушных масс при формировании твердых осадков (рис. 2), для остальной площади они определялись методом интерполяции. Величины орографической добавки для территории исследований изменяются от –1 м/с (Усть-Канская

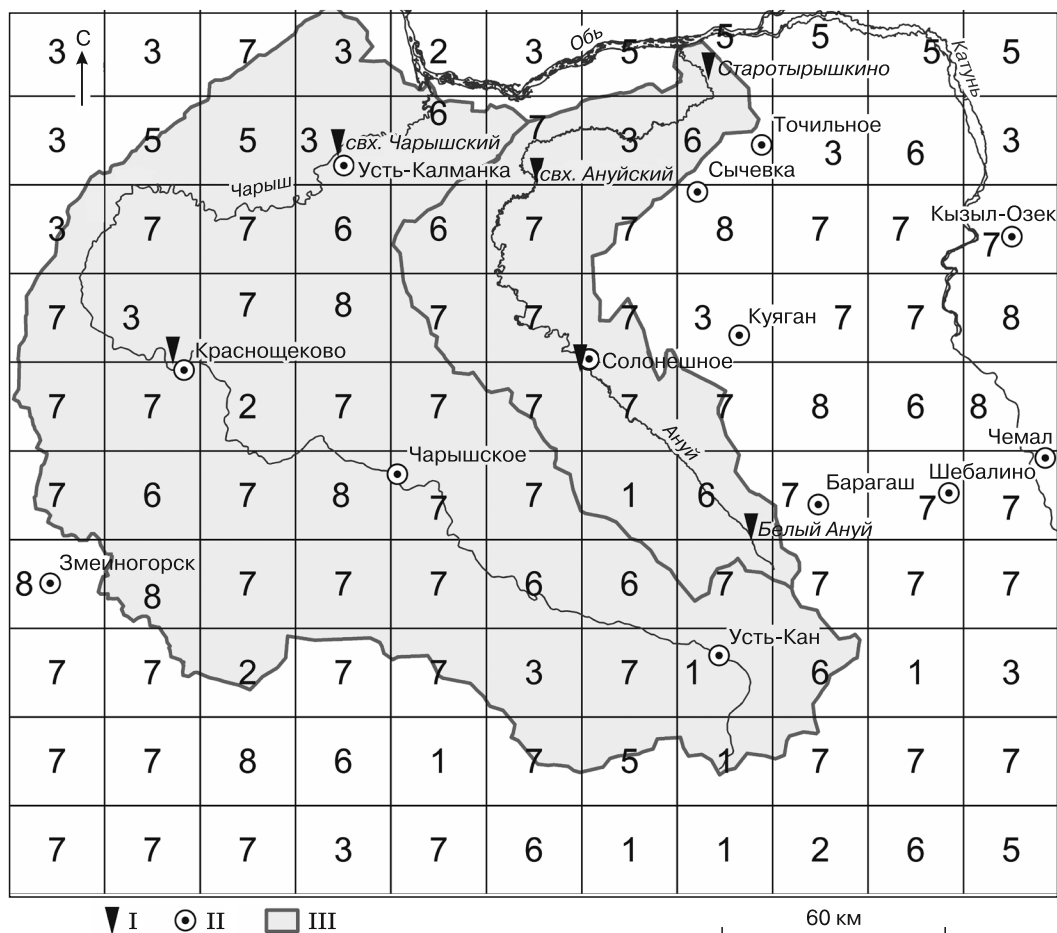


Рис. 2. Матрица орографической добавки к скорости вертикальных движений за счет орографии в бассейнах рек Чарыш и Ануй.

Значения орографической добавки: 1 – от -1.0 до -0.5 м/с; 2 – от -0.5 до -0.1 м/с; 3 – от -0.1 до -0.01 м/с; 4 – от -0.01 м/с до 0; 5 – от 0 до 0.01 м/с; 6 – от 0.01 до 0.1 м/с; 7 – от 0.1 до 0.5 м/с; 8 – от 0.5 до 1.0 м/с. Значение орографической добавки относится к нижнему левому углу ячейки. Метеостанции и посты: I – гидрологические, II – метеорологические; III – границы бассейнов.

котловина) до 0.75 м/с и более (район г. Змеиногорска) и зависят в первую очередь от уклонов поверхности, абсолютной высоты местности, а также скорости и направления потоков преобладающих воздушных масс [Галахов, 2003]. Эта матрица позволяет интерполировать данные об осадках на метеостанциях и постах на всю территорию бассейна с учетом орографической добавки.

Расчет средних по бассейну сумм зимних осадков выполнялся следующим образом. На начальном этапе для каждого года определялась сумма зимних осадков X на метеорологических станциях и постах, расположенных в пределах исследуемых бассейнов и на прилегающей территории. За сумму зимних осадков принята сумма осадков с 1 ноября по 31 марта. Источники данных: метеорологические ежемесячники и материалы сайтов Росгидромета (<http://aisori.meteo.ru/>) и “Погода и Климат” (<http://www.pogodaiklimat.ru>).

Период исследований определялся наличием метеорологических ежемесячников и данных о поверхностном стоке, которые впоследствии привлекались для “гидрологического контроля”.

По полученным значениям X и орографической добавки к скорости вертикальных движений V_z в районе метеостанций строилась зависимость вида $X = f(V_z)$.

Затем с использованием полученных уравнений регрессии $X = f(V_z)$ и значений орографической добавки V_z в каждой ячейке матрицы (см. рис. 2) оценивалась средняя сумма зимних осадков в ячейках.

Для бассейна р. Чарыш анализировался период 1967–1981 гг., включающий экстремальные по водности годы: 1969 – близкий к максимальному, 1974 – близкий к минимальному, а также период 1993–2001 гг. и 2006 г. Перечень метеорологических станций, их абсолютные высоты, а также зна-

Таблица 1. Метеорологические станции, данные которых использованы для расчета суммы зимних осадков (сентябрь–март) в бассейне р. Чарыш

Метеостанция/пост	Абс. высота*, м	Средняя многолетняя сумма осадков*, мм	V_z , м/с
Змеиногорск	354.6	164	0.75
Краснощеково	240	116	0.30
Чарышское	400	103	0.41
Солонешное	400	150	0.25
Чемал	410	60	0.27
Шебалино	870	63	0.30
Усть-Кан	1037.4	35	-0.03

Примечание. V_z – орографическая добавка.

* По данным [Справочник..., 1969].

чения орографической добавки и средняя многолетняя сумма осадков за зимние месяцы представлены в табл. 1.

Для расчетов по бассейну р. Ануй был выбран более короткий период: с 1967 по 1974 г. и с 1981 по 1988 г., так как за эти годы имеются метеорологические ежемесячники, что делает возможным включение в расчет полей осадков данные по метеорологическим постам. По аналогии с бассейном р. Чарыш дополнительно (без данных по постам) выполнены расчеты по данным метеостанций за период 1993–2001 гг. и 2006 г. Список метеостанций и постов, данные которых использованы для расчета полей осадков в бассейне р. Ануй, приведен в табл. 2.

При определении суммы зимних осадков для каждой метеостанции оценивалась необходимость

Таблица 2. Метеорологические станции и посты, данные которых использованы для расчета суммы зимних осадков (сентябрь–март) в бассейне р. Ануй

Метеостанция/пост	Абс. высота*, м	Средняя многолетняя сумма осадков*, мм	V_z , м/с
Усть-Калманка	149	–	0.0
Краснощеково	240	116	0.3
Чарышское	400	103	0.41
Солонешное	400	150	0.25
Старотырышкино	167	108	0.05
Точильное	200	148	0.055
“Свх. Ануйский”	–	–	0.1
Сычевка	225	113	0.2
Куяган	560	140	0.2

Примечание. Метеостанции выделены курсивом.

* По данным [Справочник..., 1969].

Таблица 3. Зависимость коэффициента метелевого переноса от максимальной высоты снежного покрова, метеостанция Усть-Калманка

Год	Дата наступления макс. снегозапасов	Макс. снегозапасы, мм	Сумма зимних осадков, мм	Коэффициент метелевого переноса
1968/69	20 марта	76	178.7	0.43
1972/73	20 марта	71	132.7	0.54
1974/75	10 февраля	24	31.7	0.76
1975/76	20 марта	81	119.0	0.68
1978/79	15 марта	82	173.2	0.47

внесения поправки на метелевый перенос на основании соотношения снегозапасов по данным ландшафтных снегомерных съемок и по осадкомеру (коэффициент метелевого переноса). Большинство метеостанций имеют либо близкий к единице, либо постоянный из года в год коэффициент метелевого переноса, что свидетельствует об отсутствии метелевой концентрации. По метеостанции Усть-Калманка коэффициент изменяется в разные годы от 0.43 до 0.76 (табл. 3).

При этом обнаружена статистически значимая зависимость коэффициента метелевого переноса от суммы зимних осадков (рис. 3). Данная зависимость использована для учета влияния метелевой концентрации на этой метеостанции, а также на постах предгорной равнины, расположенных в аналогичных условиях: Старотырышкино, Точильное, “свх. Ануйский” и Сычевка, так как материалов снегомерных съемок по этим пунктам недостаточно.

Таким образом, был выполнен расчет ежегодной суммы зимних осадков (с учетом поправки на метелевый перенос) для всех метеорологических станций (постов) и получены уравнения регрессии вида $X = f(V_z)$.

На рис. 4 приведена зависимость $X = f(V_z)$ для зимы 1973/74 г. в бассейнах рек Чарыш и Ануй.

Оценка качества каждого уравнения производилась стандартными способами при помощи ко-

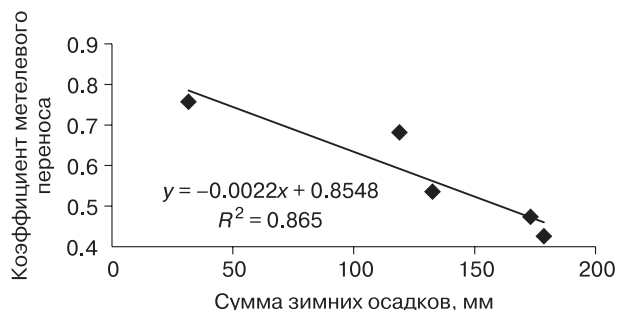


Рис. 3. Зависимость коэффициента метелевого переноса от суммы зимних осадков по осадкомеру (метеостанция Усть-Калманка).

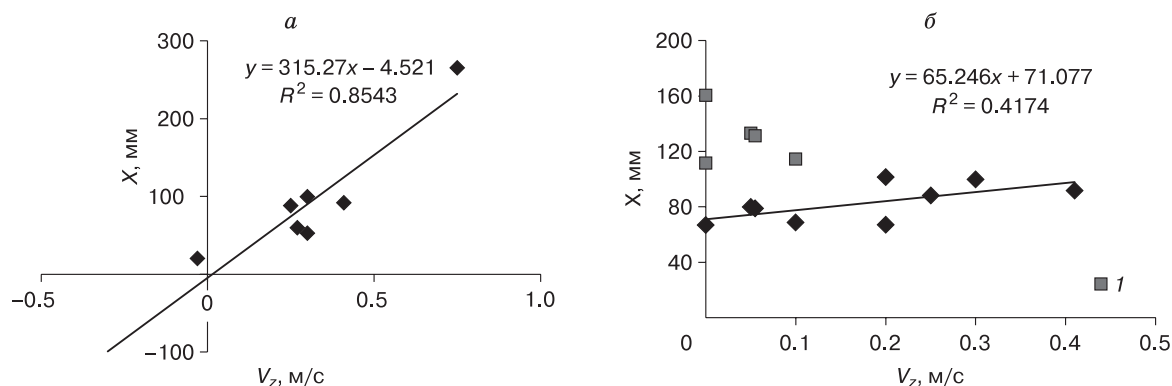


Рис. 4. Зависимость суммы зимних осадков (X) зимой 1973/74 г. в бассейне р. Чарыш (a) и бассейне р. Ануй (b) от орографической добавки к скорости вертикальных движений (V_z).

Точки 1 – сумма зимних осадков для метеостанций и постов без учета метелевой концентрации (Усть-Калманка, Старотырышкино, Точильное, “свх. Ануйский”, Сычевка).

Таблица 4. Коэффициенты детерминации между суммой зимних осадков и орографической добавкой, бассейн р. Чарыш

Зима	R^2	F	Зима	R^2	F
1967/68	0.66	15.75	1968/69	0.85	40.22
1969/70	0.91	70.87	1970/71	0.79	15.0
1971/72	0.63	13.69	1972/73	0.72	22.65
1973/74	0.85	29.3	1974/75	0.44	5.45
1975/76	0.57	10.81	1976/77	0.55	17.4
1977/78	0.62	11.28	1978/79	0.60	7.58
1979/80	0.84	43.03	1980/81	0.70	9.26
1993/94	0.75	11.77	1994/95	0.85	23.0
1995/96	0.76	12.3	1996/97	0.73	10.69
1997/98	0.80	16.0	1998/99	0.64	7.14
1999/00	0.87	32.27	2000/01	0.69	8.79
2005/06	0.66	9.7	2005/06	0.66	9.7

Таблица 5. Коэффициенты детерминации между суммой зимних осадков и орографической добавкой, бассейн р. Ануй

Зима	R^2	F	Зима	R^2	F
1967/68	0.63	15.8	1968/69	0.37	4.06
1969/70	0.26	2.50	1970/71	0.01	0.06
1971/72	0.75	18.25	1972/73	0.37	3.54
1973/74	0.42	5.02	–	–	–
1980/81	0.52	7.65	1981/82	0.59	10.14
1982/83	0.52	7.68	1983/84	0.18	1.56
1984/85	0.30	2.51	1985/86	0.34	3.10
1986/87	0.05	0.30	1987/88	0.20	0.98
1993/94	0.78	6.99	1994/95	0.97	62.01
1995/96	0.45	1.64	1996/97	0.98	138
1997/98	0.92	25.77	1998/99	0.38	1.25
1999/00	0.52	2.20	2000/01	0.50	1.96
2005/06	0.89	16.53	2005/06	0.89	16.55

Таблица 6. Суммы осадков за зимний период (ноябрь–март) и период половодья (апрель–июнь) и слой стока за половодье, р. Чарыш – гидропост “свх. Чарышский”

Гидрологический год	Сумма осадков, мм		Слой стока половодья, мм	Период половодья
	ноябрь–март	апрель–июнь		
1967/68	113	152	193	16.03–08.07
1968/69	174	233	387	11.04–19.07
1969/70	81	230	248	25.03–06.08
1970/71	99	251	309	25.03–03.08
1971/72	96	225	229	03.04–07.08
1972/73	101	228	305	28.03–19.07
1973/74	88	121	119	29.03–10.06
1974/75	54	176	232	29.03–19.07
1975/76	88	137	144	14.04–22.06
1976/77	110	161	182	31.03–21.06
1977/78	74	192	171	18.03–23.07
1978/79	77	221	208	15.04–08.07
1979/80	64	190	142	09.04–13.07
1980/81	82	112	118	18.03–14.07
1993/94	74	235	190	26.03–20.06
1994/95	110	276	223	26.03–06.07
1995/96	58	197	184	09.04–05.08
1996/97	80	103	160	26.03–12.06
1997/98	71	252	–	–
1998/99	63	236	156	03.04–21.07
1999/00	66	272	172	28.03–21.07
2000/01	94	263	259	22.03–31.07
2005/06	106	152	231	27.03–23.07

эфициента детерминации R^2 и F -критерия Фишера, определяемого по формуле

$$F = \frac{R^2}{1-R^2}(n-2), \quad (1)$$

где n – число наблюдений.

Коэффициенты детерминации и критерий Фишера для каждого зимнего сезона представлены в табл. 4, 5.

В бассейне р. Ануй величины зимних осадков за отдельный год не имеют такой большой амплитуды по метеостанциям, как в бассейне р. Чарыш (см. рис. 4). Поэтому в большинстве случаев статистическая связь с орографической добавкой значительно слабее (см. табл. 5).

После расчета суммы осадков в каждой ячейке матрицы оценивалось среднее по бассейну значение суммы зимних осадков для каждого года (табл. 6, 7).

Оценка влияния осадков на сток половодья.

Оценка результатов расчета зимних осадков производилась по принципу “гидрологического контроля” на основе анализа их связи с объемом половодья, выраженного в слое стока.

Данные по слою стока половодья до 1980 г. взяты из справочников государственного водного кадастра [Ресурсы..., 1969; Ресурсы..., 1975; Ресурсы..., 1984], позднее – по материалам авторских расчетов на основе ежесуточных расходов воды из гидрологических ежегодников и сайта Информационно-аналитического Центра Регистра и Кадастра (<http://gis.vodinfo.ru/>).

Оценка связи слоя стока и осадков холодного периода производилась по однофакторным зависимостям и посредством множественного корреляционного и регрессионного анализа. В качестве предикторов взяты суммы зимних осадков в бассейне, рассчитанные при помощи орографической добавки, а также сумма осадков за период половодья, рассчитанная по месячным данным об осадках с учетом средних сроков половодья.

Как известно, на сток половодья помимо снегозапасов влияют жидкие осадки, выпадающие после начала снеготаяния и до окончания половодья [Аполлов и др., 1974]. Поэтому в качестве дополнительного фактора, определяющего сток половодья, принята сумма осадков с апреля по июнь включительно на репрезентативных метеостанци-

Таблица 7. Суммы осадков за зимний период (ноябрь–март) и период половодья (апрель–июнь) и слой стока за половодье, р. Ануй – гидропост “свх. Ануйский”

Гидрологический год	Сумма осадков, мм		Слой стока, мм		Паводки	Период половодья
	ноябрь–март	апрель–июнь				
			с учетом паводков	со “срезкой” паводков		
1967/68	112	147	113	107	15–23.05	14.03–21.06
1968/69	158	231	225	225	–	06.04–06.07
1969/70	75	213	118	79	13.05–05.06	21.03–04.07
1970/71	87	173	126	115	09–15.05; 18–30.05	25.03–18.06
1971/72	94	203	90	90	–	05.04–29.06
1972/73	101	261	161	140	16.05–08.06	23.03–20.06
1973/74	76	125	62	62	–	28.03–09.06
1980/81	88	121	63.3	63	–	21.03–24.06
1981/82	70	265	63.2	61	06–13.05	01.04–01.06
1982/83	66	244	82.3	78	24.05–06.06	22.03–12.06
1983/84	65	240	56.7	49	19.05–05.06	16.04–26.06
1984/85	80	191	92.2	92	–	28.03–15.06
1985/86	79	175	93.7	91	07–11.05; 03–10.06	05.04–21.06
1986/87	71	175	97.2	96	17–21.05; 24–28.05	03.04–18.06
1987/88	81	197	109.7	98	15.05–10.06	22.03–24.06
1993/94	74	201	97	80	27.04–01.05; 11–20.05; 22–30.05	11.03–01.07
1994/95	121	263	155.9	139	19–29.05; 02–24.06	20.03–01.07
1995/96	69	192	72	70	27–28.04; 04–06.05; 23–27.05	11.04–11.06
1996/97	78	159	90.5	87	09–21.05	18.03–10.06
1997/98	80	233	79	73	02–06.05; 18–23.05; 11–13.06	09.04–21.06
1998/99	69	201	67	65	07–15.06	28.03–25.06
1999/00	84	234	106	101	05–07.05; 13–16.05; 06–08.06	25.03–01.07
2000/01	102	245	124	121	01–02.05; 19–22.05	19.03–29.06
2005/06	112	282	171.2	160	28.04–06.05; 17–22.05; 27.05–01.06	29.03–14.06

ях, находящихся в географических центрах бассейнов: для р. Чарыш – с. Чарышское, для р. Ануй – с. Солонешное.

Кроме того, для разделения стока половодья на талую и дождевую составляющие для р. Ануй были построены и проанализированы комплексные графики, включающие гидрографы стока половодья и графики хода температуры и осадков метеостанции с. Солонешное. Расчленение гидрографов выполнялось по методике, описанной в [Аполлов и др., 1974; Руководство..., 1989]. Все осадки, выпадающие до окончания таяния снежного покрова, включались в талый сток, поскольку условия их стекания в целом схожи [Бураков, Иванова, 2010]. Окончание снеготаяния определялось по комплексному графику как момент нарушения соответствия между ходом температур и расходов воды, когда рост температур не вызывает увеличения расходов [Харшан, 1970]. На спаде половодья выделены дождевые паводки, формируемые жидкими осадками, выпавшими после окончания снеготаяния. Выделение дождевого стока на гидрографе выполнялось путем “срезки” отдельных пиков (паводков) с последующим исключением при расчете слоя стока половодья.

На р. Чарыш половодье многопиковое и более растянутое во времени, что связано с большим разнообразием ландшафтно-климатических условий, поэтому выделить дождевые паводки на гидрографе чаще всего невозможно. Слой стока половодья для р. Чарыш рассчитан с учетом дождевых паводков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 6 и 7 приведены данные расчетов сумм зимних осадков, осадков с апреля по июнь и слой стока половодья для каждого года.

Результаты расчетов сумм осадков и слоя стока половодья анализировались с использованием статистических методов корреляционного и регрессионного анализа. На первом этапе построены

корреляционные матрицы и графики зависимости слоя стока половодья от суммы зимних осадков рек Ануй и Чарыш (рис. 5).

Корреляционный анализ показал, что сумма зимних осадков является основным фактором при формировании стока половодья: для бассейна р. Ануй характерна более тесная связь зимних осадков со стоком (коэффициент корреляции $r = 0.87$), чем для р. Чарыш ($r = 0.64$). “Срезка” дождевых паводков на спаде половодья для р. Ануй ожидаемо увеличила тесноту связи (r вырос до 0.91). Жидкие осадки периода половодья, формирующие дождевые паводки на его спаде, по значимости находятся на втором месте. Причем, по результатам корреляционного анализа, для обеих рек наиболее высокий коэффициент корреляции со стоком половодья наблюдается при суммировании месячных осадков с апреля по июнь (включительно). Включение жидких осадков июля для р. Чарыш уменьшает тесноту связи со стоком половодья. Очевидно, это может быть связано с более значительными потерями на испарение, транспирацию, смачивание растительности, фильтрацию в почвогрунты в июле (по сравнению с маем–июнем). Отмечено, что для р. Ануй жидкие осадки вносят значительно меньший вклад в формирование половодья ($r = 0.37$), чем для р. Чарыш ($r = 0.58$).

На втором этапе по результатам корреляционного анализа построены уравнения множественной линейной регрессии на основе двух значимых предикторов: суммы зимних осадков (ноябрь–март), рассчитанной про помощи орографической добавки, и суммы осадков за период половодья (апрель–июнь) на репрезентативной метеостанции. Параметры уравнений для рек Ануй и Чарыш приведены в табл. 8.

В общем виде для р. Ануй имеем следующее уравнение:

$$h = 1.53P_1 + 0.21P_2 - 72.1, \quad (2)$$

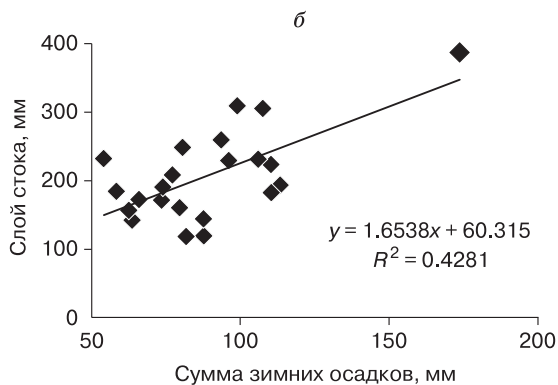
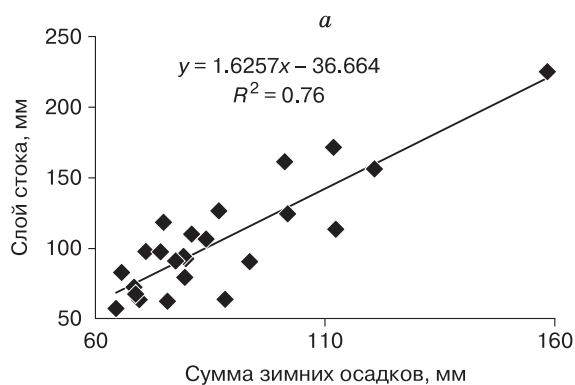


Рис. 5. Зависимость слоя стока половодья р. Ануй (а) и р. Чарыш (б) от суммы зимних осадков (ноябрь–март).

Таблица 8. Регрессионная статистика и коэффициенты уравнения множественной линейной регрессии

Параметр	Значение коэф- фициента	Стандартная ошибка коэф- фициента	Множе- ственный R	R^2	$R^2_{\text{норм}}$	F -критерий	Кол-во лет
<i>Сток половодья р. Ануй (с учетом дождевых паводков)</i>							
Свободный член	-72.1	21.75	0.90	0.81	0.79	45.05	24
P_1 , мм	1.53	0.18					
P_2 , мм	0.21	0.09					
<i>Сток половодья р. Чарыш (с учетом дождевых паводков)</i>							
Свободный член	-49.28	44.09	0.82	0.67	0.63	18.14	21
P_1 , мм	1.47	0.35					
P_2 , мм	0.64	0.17					

Примечание. P_1 – сумма зимних осадков (ноябрь–март); P_2 – осадки периода половодья (апрель–июнь).

для р. Чарыш:

$$h = 1.47P_1 + 0.64P_2 - 49.3, \quad (3)$$

где h – слой стока за половодье, мм; P_1 – сумма зимних осадков, мм; P_2 – сумма осадков периода половодья, мм.

Значения коэффициентов детерминации $R^2 = 0.81$ ($R^2_{\text{норм}} = 0.79$) и критерия Фишера $F = 45.05$ (критическое значение $F = 3.47$ при уровне значимости 5 %) в уравнении (2) для р. Ануй, свидетельствуют о высоком уровне достоверности. Для р. Чарыш качество уравнения (3) несколько хуже: $R^2 = 0.67$, $R^2_{\text{норм}} = 0.63$, $F = 18.4$ (критическое значение 3.55), тем не менее оно также достаточно хорошо объясняет зависимость слоя стока от осадков. Оба уравнения могут быть использованы в качестве прогностической модели.

Менее тесная связь главного предиктора со стоком и худшее качество модели множественной регрессии для р. Чарыш связаны со значительным влиянием на сток половодья факторов, определяющих водопоглощающую способность речного бассейна, которые в модели не учтены.

Ранее авторами было показано, что в бассейне р. Чарыш важную роль в формировании максимальных уровней половодья играет начальный период снегонакопления. Если толщина снежного покрова до начала значительных морозов (ниже -10°C) составляет более 20–25 см и значительно-го сезонного промерзания пород в бассейне не отмечается, то в весенний период в створе “свх. Чарышский” наблюдаются максимальные уровни на 1 м ниже по сравнению с годами, когда метеорологические условия способствовали сезонному промерзанию [Галахов и др., 2018]. Исследования условий формирования снежного покрова в бассейне р. Ануй, проведенные по аналогичной методике, свидетельствуют об отсутствии влияния сезонного промерзания на сток половодья [Галахов и др., 2020]. По мнению авторов, столь существенные различия процессов формирования талого стока в двух соседних бассейнах связаны с их геоморфо-

логическими особенностями. Бассейн р. Ануй до створа “свх. Ануйский” целиком представляет среднегорья и низкогогорья, которые, как правило, отличаются более высокими и постоянными коэффициентами талого стока [Аполлов и др., 1974; Снежно-водно-ледниковые ресурсы..., 1986]. Около 40 % бассейна р. Чарыш – предгорная равнина, для которой характерна большая изменчивость коэффициентов талого стока в зависимости от состояния почвогрунтов в бассейне (состава пород, степени их увлажнения, глубины сезонного промерзания) и, как следствие, потерь талого стока на инфильтрацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Как показано ранее [Галахов и др., 2020], в бассейнах рек Ануй и Чарыш в большинстве случаев отсутствует статистически значимая зависимость сумм зимних (ноябрь–март) осадков, по данным гидрометеорологических станций и постов, от их абсолютной высоты. Использование орографической добавки к скорости вертикальных движений для расчетов сумм зимних осадков более предпочтительно. Для бассейна р. Чарыш наблюдается тесная связь между суммой зимних осадков и орографической добавкой к скорости вертикальных движений как в многолетнем масштабе, так и в отдельные годы. Статистически незначимые коэффициенты детерминации между суммой зимних осадков и орографической добавкой в бассейне р. Ануй в ряде случаев связаны с более однородным распределением полей осадков в пределах бассейна.

2. Выполненный авторами ранее [Галахов и др., 2020] анализ зависимости сумм зимних осадков, полученных с помощью орографической добавки, и слоя стока половодья показал их тесную ($R^2 = 0.76$) связь в бассейне р. Ануй. Учет дождевых паводков на спаде половодья выполнен двумя способами: методом их “срезки” и введением в уравнение регрессии дополнительного предикто-

ра – суммы осадков с апреля по июнь на метеостанции Солонешное, что позволило увеличить коэффициенты детерминации до 0.83 и 0.81 соответственно. Все это, во-первых, подтверждает достоверность расчетов сумм осадков; во-вторых, позволяет сделать вывод, что в бассейне р. Ануй главным фактором, влияющим на объем стока половодья, являются зимние осадки.

3. В бассейне р. Чарыш связь сумм зимних осадков и объема стока значительно слабее ($R^2 = 0.43$). Корреляционный анализ показал, что для р. Чарыш жидкие осадки с апреля по июнь в большей степени влияют на объем половодья, чем для р. Ануй. Введение осадков периода половодья (апрель–июнь) в уравнение регрессии позволило значительно улучшить качество модели ($R^2 = 0.67$, $R^2_{\text{норм}} = 0.63$). В целом по сравнению с бассейном р. Ануй связь объема стока с осадками менее значима. Это связано с тем, что около 40 % бассейна располагается на предгорной равнине, для которой характерна большая изменчивость коэффициентов талого стока в зависимости от состояния грунтов (их состава, степени увлажнения, промерзания). Данная гипотеза требует подтверждения и дальнейшего исследования.

4. Полученные уравнения множественной регрессии подтверждают достоверность расчетов зимних осадков и могут быть использованы для среднесрочных прогнозов объема половодья на реках Ануй и Чарыш. При этом в горном бассейне со сравнительно однородными ландшафтно-климатическими условиями (р. Ануй) приемлемо использование однофакторной корреляционной зависимости стока половодья от суммы зимних осадков. Для бассейна р. Чарыш, имеющего сложную геоморфологическую структуру, необходимо введение в модель дополнительных предикторов, характеризующих осадки периода половодья и состояние грунтов с их инфильтрационной способностью.

Литература

- Аполлов Б.А.** Курс гидрологических прогнозов / Б.А. Аполлов, Г.П. Калинин, В.Д. Комаров. Л., Гидрометеиздат, 1974, 422 с.
- Барри Р.Г.** Погода и климат в горах. Л., Гидрометеиздат, 1964, 263 с.
- Бураков Д.А., Иванова О.И.** Анализ формирования и прогноз стока весеннего половодья в лесных и лесостепных бассейнах рек Сибири // Метеорология и гидрология, 2010, № 6, с. 87–100.
- Водные ресурсы России и их использование** / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб., Гос. гидрологический ин-т, 2008, 598 с.
- Галахов В.П.** Условия формирования и расчет максимальных снегозапасов в горах. Новосибирск, Наука, 2003, 104 с.
- Галахов В.П., Мардасова Е.В., Люцигер Н.В., Самойлова С.Ю.** Влияние осеннего промерзания на максимальные уровни бассейна реки Чарыш // Изв. Алт. отд-ния Рус. геогр. о-ва, 2018, № 1 (48), с. 54–57.
- Галахов В.П., Попов Е.С., Мардасова Е.В., Плехова А.В.** Прогноз максимальных уровней реки Чарыш в период снеготаяния // Изв. Алт. отд-ния Рус. геогр. о-ва, 2016, № 3 (42), с. 38–44.
- Галахов В.П., Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В.** Влияние условий формирования снежного покрова на сток половодья горной реки (на примере бассейна реки Ануй) // Изв. Алт. отд-ния Рус. геогр. о-ва, 2020, № 1 (56), с. 24–33.
- Генсиоровский Ю.В.** Расчет максимальных снегозапасов на основе ландшафтно-индикационных свойств снежного покрова // Материалы гляциол. исслед., 2007, № 102, с. 73–79.
- Иглова Н.В., Нарожный Ю.К.** Определение снегозапасов Алтая с использованием спутниковой информации // Вестн. Том. гос. ун-та, 2010, № 334, с. 160–165.
- Калюжный И.Л., Лавров С.А.** Основные физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях потепления климата // Метеорология и гидрология, 2012, № 1, с. 68–81.
- Лубенец Л.Ф., Черных Д.В.** Внутриландшафтное распределение снегозапасов в бассейне р. Майма (низкогорья Русского Алтая) // Лед и снег, 2019, т. 59, № 3, с. 319–332.
- Матвеев Л.Т.** Динамика облаков. Л., Гидрометеиздат, 1981, 311 с.
- Матвеев Л.Т.** Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1984, 751 с.
- Мухин В.М.** Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек // Тр. Гидрометеорол. науч.-исслед. центра РФ, 2013, № 349, с. 5–46.
- Попов Е.Г.** Гидрологические прогнозы. Л., Гидрометеиздат, 1979, 257 с.
- Пузанов А.В., Зиновьев А.Т., Безматерных Д.М. и др.** Опасные гидрологические явления в бассейне Верхней Оби: Современные тенденции и прогнозирование // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2018, № 4, с. 69–77.
- Ревякин В.С.** Снежный покров и лавины Алтая / В.С. Ревякин, В.И. Кравцова. Томск, Изд-во Том. ун-та, 1977, 216 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Горный Алтай и Верхний Иртыш** / Под ред. В.А. Семенова. Л., Гидрометеиздат, 1969, 216 с.
- Ресурсы поверхностных вод. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 1. РСФСР, Вып. 10. Бассейны Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза** / Под ред. Ж.С. Попова. Л., Гидрометеиздат, 1984, 542 с.
- Ресурсы поверхностных вод. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь** / Под ред. Е.П. Шурупа. Л., Гидрометеиздат, 1975, 542 с.
- Роджерс Р.Р.** Краткий курс физики облаков. Л., Гидрометеиздат, 1979, 232 с.
- Ромасько В.Ю., Бураков Д.А.** Космический мониторинг заснеженности территории речных бассейнов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер. Техника и технологии, 2017, т. 10, № 6, с. 704–713.
- Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ.** Л., Гидрометеиздат, 1989, 357 с.
- Самойлова С.Ю., Галахов В.П.** Опыт оценки средних многолетних твердых осадков (снегозапасов) в высокогорных районах (на примере бассейна р. Катунь, Алтай) // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания

к мировоззрению: Сб. докл. Междунар. науч. конф. памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова (С.-Петербург, 2020 г.). СПб., Изд-во ВВМ, 2020, с. 760–764.

Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М., Мир, 1980, 549 с.

Снежно-водно-ледниковые ресурсы бассейна Верхней Оби и прогнозы стока весеннего половодья // Под ред. Д.А. Буракова. Томск, Изд-во Том. ун-та, 1986, 254 с.

Справочник по климату СССР. Вып. 20. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. Л., Гидрометеоздат, 1969, 333 с.

Харшан Ш.А. Долгосрочные прогнозы стока горных рек Сибири // Тр. Гидрометцентра СССР. Вып. 65. Л., Гидрометеоздат, 1970, 211 с.

Чурулин Е.В., Копейкин В.В., Розинкина И.А. и др. Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеол. исслед. и прогнозы, 2018, № 2 (368), с. 120–143.

Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. Л., Гидрометеоздат, 1985, 263 с.

Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions // Nature, 2005, vol. 438, p. 303–309.

DeWalle D.R., Rango A. Principles of Snow Hydrology. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2008, 410 p.

Li D., Durand M., Margulis S. Quantifying spatiotemporal variability of controls on microwave emission from snow covered mountainous regions // IEEE J. Selected Topics in Appl. Earth Observations and Remote Sens., June 2015, DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2440332.

URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 02.02.2020).

URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения: 01.06.2020).

URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 01.07.2020).

References

Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. Kurs gidrologicheskikh prognozov [Course of Hydrological Forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1974, 422 p. (in Russian).

Barry R.G. Pogoda i klimat v gorah [Weather and Climate in the Mountains]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1964, 263 p. (in Russian).

Burakov D.A., Ivanova O.I. Analysis of formation and forecast of spring snowmelt flood runoff in forest and forest-steppe basins of Siberian rivers. Russian Meteorology and Hydrology, 2010, vol. 35, No. 6, p. 421–431.

Vodnye resursy Rossii i ih ispol'zovanie [Water resources of Russia and their use]. I.A. Shiklomanov (Ed.). St. Petersburg, State Hydrological Institute, 2008, 598 p. (in Russian).

Galakhov V.P. Usloviya formirovaniya i raschet maksimal'nykh snegozapasov v gorah [Conditions for Maximum Mountain Snow Reserves Accumulation and Their Calculations]. Novosibirsk, Nauka, 2003, 104 p. (in Russian).

Galakhov V.P., Mardasova E.V., Lyutsiger N.V., Samoilo-va S.Yu. Influence of fall freezing on maximum levels of Charysh river basin. Izvestiya Altajskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva [Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society], 2018, No. 1 (48), p. 54–57 (in Russian).

Galakhov V.P., Popov E.S., Mardasova E.V., Plekhova A.V. Forecast of maximum water levels in river Charysh during

snowmelting. Izvestiya Altajskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva [Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society], 2016, No. 3 (42), p. 38–44 (in Russian).

Galakhov V.P., Samoilo-va S.Yu., Mardasova E.V. Effect of snow cover formation on snowmelt runoff (the Anui river basin as case study). Izvestiya Altajskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva [Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society], 2020, No. 1 (56), p. 24–33 (in Russian).

Gensiorovsky Yu.V. Calculation of maximum snow reserves on the basis of landscape-indicative properties of snow cover. Materialy glyaciologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies], 2007, No. 102, p. 73–79 (in Russian).

Iglovskaya N.V., Narozhny Yu.K. Determination of Altai snow reserves with the use of satellite information. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta [Tomsk State University Journal], 2010, No. 334, p. 160–165 (in Russian).

Kalyuzhnyy I.L., Lavrov S.A. Basic physical processes and regularities of winter and spring river runoff formation under climate warming conditions. Russian Meteorology and Hydrology, 2012, vol. 37, No. 1, p. 68–81.

Lubenets L.F., Chernykh D.V. Intra-landscape distribution of snow storage in the Mayma river basin (low-mountain area of the Russian Altai). Led i Sneg [Ice and Snow], 2019, No. 59 (3), p. 319–332 (in Russian).

Matveev L.T. Dinamika oblakov [Dynamics of Clouds]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1981, 311 p. (in Russian).

Matveev L.T. Kurs obshchej meteorologii. Fizika atmosfery [A Course in General Meteorology. Atmospheric Physics]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 751 p. (in Russian).

Mukhin V.M. Methodological basis of physical-statistical kinds of short range forecasts of mountain river runoff. Trudy Gidrometcentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2013, vol. 349, p. 5–46 (in Russian).

Popov E.G. Gidrologicheskie prognozy [Hydrological Forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1979, 257 p. (in Russian).

Puzanov A.V., Zinovyev A.T., Bezmaternykh D.M., Reznikov V.F., Troshkin D.N. Hazardous hydrological phenomena in the upper Ob basin: current trends and forecasting. Vodnoe hozyajstvo Rossii [Water Sector of Russia], 2018, No. 4, p. 69–77 (in Russian).

Revyakin V.S., Kravtsova V.I. Snezhnyy pokrov i laviny Altaya [Snow Cover and Avalanches in Altai]. Tomsk, Izd-vo TGU, 1977, 214 p. (in Russian).

Resursy poverhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaja izuchenost'. T. 15. Altai Zapadnaya Sibir'. Vyp. 1. Gornyy Altai i Verhnyy Irtysh [Surface water resources of the USSR. Hydrological studies. Vol. 15. Altai and Western Siberia. Vol. 1. Mountain Altai and Upper Irtysh]. V.A. Semenov (Ed.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1969, 216 p. (in Russian).

Resursy poverhnostnykh vod SSSR: Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki. T. 15. Altai, Zapadnaya Sibir' i Severnyy Kazakhstan. Vyp. 1. Verhnyaya i Srednyaya Ob' [Surface water resources: The main hydrological characteristics. Vol. 15. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Issue 1. Upper and Middle Ob]. J.S. Popov (Ed.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1975, 542 p. (in Russian).

Resursy poverhnostnykh vod SSSR: Osnovnyegidrologicheskie harakteristiki. T. 15. Altai, Zapadnaya Sibir' i Severnyy Kazakhstan. Vyp. 1. Verhnyaya i Srednyaya Ob' [Surface water resources: The main hydrological characteristics. Vol. 15. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Issue 1. Upper and Middle Ob]. E.P. Shurup (Ed.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1979, 487 p. (in Russian).

- Rogers R.R. *Kratkij kurs fiziki oblakov* [A Short Course in Cloud Physics]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1979, 232 p. (in Russian).
- Romasko V.Yu., Burakov D.A. Kosmicheskiy monitoring of snow-covered areas of river basins. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [J. Siberian Federal University. Ser. Engineering and Technology], 2017, vol. 10, No. 6, p. 704–713 (in Russian).
- Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy jelementy vodnogo rezhima rek i vodohranilishh [Guide to hydrological forecasts. Vol. 1. Long-term forecast. Elements of the water regime of rivers and reservoirs]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989, 357 p. (in Russian).
- Samoilova S.Yu., Galakhov V.P. Estimation of mean annual solidprecipitation (snow cover water equivalent) at the high mountain areas (Katun river basin, Altai). In: IV Vinogradov conference. Hydrology: from learning to worldview. Collection of reports of the International scientific conference in Memory of the outstanding Russian scientist Yuri Borisovich Vinogradov (St. Petersburg, 2020). St. Petersburg, Publ. house of VVM, 2020, p. 760–764 (in Russian).
- Skorer R. *Aerogidrodinamika okruzhayushchej sredy* [Aerohydrodynamics of the Environment]. Moscow, Mir, 1980, 549 p. (in Russian).
- Snezhno-vodno-lednikovye resursy bassejna Verhnej Obi i prognozy stoka vesennego polovod'ya [Snow-water-glacial resources of the Upper Ob basin and forecasts of spring flood runoff]. D.A. Burakov (Ed.). Tomsk, Izd-vo TGU, 1986, 254 p. (in Russian).
- Spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 20. Vlazhnost' vozduha, atmosferyne osadki, snezhnyj pokrov [Directory on the climate of the USSR. Issue 20. Air humidity, precipitation, snow cover]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1969, 333 p. (in Russian).
- Kharshan Sh.A. Dolgosrochnye prognozy stoka gornyh rek Sibiri [Long-term forecasts of mountain river runoff in Siberia]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970, 211 p. (in Russian).
- Churyulin E.V., Kopeikin V.V., Rozinkina I.A., Frolova N.L., Churyulin A.G. Analysis of the characteristics of the snow cover from satellite and model data for different catchments in the European territory of the Russian Federation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, No. 2 (368), p. 120–143 (in Russian).
- Shakina N.P. *Dinamika atmosferynyh frontov i ciklonov* [Dynamics of Atmospheric Fronts and Cyclones]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 263 p. (in Russian).
- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 2005, vol. 438, p. 303–309.
- DeWalle D.R., Rango A. *Principles of Snow Hydrology*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008, 410 p.
- Li D., Durand M., Margulis S. Quantifying spatiotemporal variability of controls on microwave emission from snow covered mountainous regions. In: *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, June 2015, DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2440332.
- URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (last visited: 02.02.2020).
- URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (last visited: 01.06.2020).
- URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (last visited: 01.07.2020).

*Поступила в редакцию 3 августа 2020 г.,
после доработки – 13 июня 2021 г.,
принята к публикации 19 августа 2021 г.*