

Научная статья
УДК 556.167(571.151)
doi: 10.17223/25421379/37/9

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕТНЕ-ОСЕННЕЙ МЕЖЕНИ И МИНИМАЛЬНОГО СТОКА НА Р. МАЙМА (НИЗКОГОРЬЯ СЕВЕРНОГО И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО АЛТАЯ)



Лилия Федоровна Лубенец¹, Всеволод Михайлович Морейдо²,
Дмитрий Владимирович Черных³, Дмитрий Константинович Першин⁴

^{1, 3, 4} *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия*

² *Институт водных проблем РАН, Москва, Россия*

³ *Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия*

¹ *lilia_lubenets@mail.ru*

² *moreido@mail.ru*

³ *chernykh@mail.ru*

⁴ *dmitrypersh@gmail.com*

Аннотация. Выполнена оценка изменений гидроклиматической составляющей стока на основе данных по метеорологическим станциям Росгидромета, расположенным на территории Алтайского края и Республики Алтай. С применением метода автоматического графо-аналитического расчленения гидрографа дана оценка изменений минимального стока для опорного бассейна р. Майма и бассейнов-аналогов. В объеме грунтового стока летне-осенней межени наблюдается положительный тренд, статистически значимый на всех из рассматриваемых рек.

Ключевые слова: *Алтай, бассейн р. Майма, минимальный сток, летне-осенняя межень*

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН (№ FUFZ-2021-0007).

Для цитирования: Лубенец Л.Ф., Морейдо В.М., Черных Д.В., Першин Д.К. Многолетняя динамика характеристик летне-осенней межени и минимального стока на р. Майма (низкогорья северного и северо-восточного Алтая) // Геосферные исследования. 2025. № 4. С. 128–141. doi: 10.17223/25421379/37/9

Original article
doi: 10.17223/25421379/37/9

LONG-TERM DYNAMICS OF CHARACTERISTICS OF SUMMER-AUTUMN LOW-WATER PERIOD AND MINIMUM RUNOFF ON THE MAIMA RIVER (LOW MOUNTAINS OF NORTHERN AND NORTHEASTERN ALTAI)

Liliya F. Lubenets¹, Vsevolod M. Moreido², Dmitry V. Chernykh³, Dmitry K. Pershin⁴

^{1, 3, 4} *Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia*

² *Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia*

³ *Altai State University, Barnaul Russia*

¹ *lilia_lubenets@mail.ru*

² *moreido@mail.ru*

³ *chernykh@mail.ru*

⁴ *dmitrypersh@gmail.com*

Abstract. This study presents the results of assessment of how changes in hydroclimatic forcing (air temperature and precipitation) affected river runoff in the Altai region between 1950 and 2022. We used the data from 42 local weather stations operated by Roshydromet government agency in the administrative regions of Altai Krai and Republic of Altai. Trends and change-points in the data were revealed using Mann-Kendall, Theil-Sen and Pettite tests. We further assessed the alteration of baseflow using automatic hydrograph separation filters applied to the data on the main experimental basin of the Maima River in Republic of Altai and several rivers across this region, similar in basin area and runoff generation conditions. The main findings include a tendency towards air temperature increase across all seasons both in lowland and highland environments in this region. The revealed trends in precipitation are significant only for the cold season due to increase in solid precipitation. Annual baseflow runoff volume on all of the accessed rivers shows trend towards increase, however all of these were statistically insignificant. On the contrary, summer baseflow volume trends proved to be significant, as well as mean annual baseflow discharge. Change-points in the time-series

of the latter was detected in the 2000-s on all rivers. This is accompanied by an increase in low-flow period duration up to 14 days on all rivers. We assume that the revealed 15 to 20 year-hysteresis in reaction of low-flows to increase in precipitation may be due to delayed groundwater recharge and discharge into the river network. The latter may be due to distribution of carbonate rock deposits and variability in quaternary cover thickness, which may lead to interflow between groundwater into confined aquifers and formation of unified structures of aerated and confined layers.

Keywords: *Altai, Maima River basin, minimum runoff, summer-autumn low water period*

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the Research Program of IWEP SB RAS (№ FUFZ2021-0007).

For citation: Lubenets L.F., Moreido V.M., Chernykh D.V., Pershin D.K. (2025) Long-term dynamics of characteristics of summer-autumn low-water period and minimum runoff on the Maima River (Low mountains of Northern and Northeastern Altai). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 128–141. doi: 10.17223/25421379/37/9

Введение

Сезонные периоды с низкой водностью являются неотъемлемой частью гидрологического режима большинства рек [Smakhtin, 2001]. В России ежегодно повторяющуюся фазу водного режима реки, характеризующуюся малой водностью, длительным стоянием низкого уровня, называют меженью [ГОСТ 19179-73]. На реках с сезонным снежным покровом традиционно различают зимнюю и летнюю (летне-осеннюю) межень [Владимиров, 1976; Чеботарев, 1978].

За последние десятилетия в связи с климатическими изменениями водный режим рек претерпевает серьезные изменения. Несмотря на то, что при определении синхронности колебаний стоковых и метеорологических характеристик нередко возникают трудности [Джамалов и др., 2017], большинство исследователей считают, что меженный сток является наиболее чувствительным к изменению внешних факторов. В результате потепления климата и, как следствие, увеличения суммарного испарения и снижения снеготпасов, в маловодные периоды сток рек может быть недостаточным для удовлетворения потребностей экономики: гидроэнергетики, сельского хозяйства и т.д. [Moore et al., 2007; van Vliet, Zwolsman, 2008; Болгов и др., 2014].

Судя по литературным данным, в настоящее время в различных регионах реки неоднозначно реагируют на изменение метеоусловий. Так, характерная тенденция современного водного режима, установленная для большинства рек европейской территории России, заключается в сокращении доли весеннего стока и увеличении доли стока маловодных периодов, что приводит к выравниванию годового гидрографа [Болгов и др., 2014; Георгиади и др., 2016; Сивохип и др., 2018]. В частности, на преобладающей части Европейской России происходит увеличение стока в период летне-осенней межени – наиболее значительное (40–100 %) на реках лесостепной и степной зон [Закономерности..., 2012].

Однако большинство исследователей считают, что сток в период летней межени в связи с потеплением

климата во многих регионах будет снижаться [Stumbaugh, Hamlet, 2016; Dang et al., 2017; Kreye et al. 2017; Kay et al., 2018]. На водосборах северной Швеции повышение температуры и увеличение общего количества осадков также ведут к тому, что сток в течение года становится более равномерным. Фиксируется более раннее начало и пик весеннего половодья. При этом половодье становится менее сильным из-за более короткой продолжительности и снижения пикового стока. Зимний сток увеличивается, однако летний несколько снижается [Teutschbein et al., 2015].

Наиболее очевидно тенденция снижения стока в летнюю межень проявляется для рек на юге Европы – на Пиренейском полуострове, в юго-западной Франции, на Балканах [Marx et al., 2018]. В Альпах на фоне незначительного снижения общего годового стока и увеличения расходов в зимние месяцы из-за более высоких температур и роста количества осадков, выпадающих в виде дождя, летом происходит снижение объемов стока [Etter et al., 2017]. На примере водосборов в Швейцарских Альпах смоделировано значительное уменьшение стока с июня по август в связи с прогнозируемым снижением снеготпасов на высотах более 1 500 м. Однако на более низких высотах, где снеготпасы оказывают меньшее влияние на летнюю межень, не ожидается больших изменений летнего стока [Jenicek et al., 2018].

Для территории США на основе данных по 671 речному бассейну выделено пять классов рек, различающихся по режиму стока и реакции на климатические изменения. Показано, что климатические изменения оказывают наиболее значительное влияние на режим рек в Кордильерах, где велика роль снеготпасового питания. Здесь прогнозируется уменьшение стока летом и увеличение зимой [Brunner et al., 2020]. Так, на юге, в горах Сьерра-Невада в Калифорнии, сток в ряде рек летом может упасть до нуля, если снеготпасы уменьшатся примерно на 50% от исторических норм [Godsey et al., 2014]. В Кордильерах провинции Британская Колумбия в Канаде изменение климата по прогнозам также приведет к снижению водоотдачи с водосборов в летний период, особенно в конце лета [Beaulieu et al., 2012].

В меженный период входит интервал времени, когда наблюдаются наименьшие значения стока, то есть минимальный сток. Период наименьшего стока продолжительностью от 1 до 30 дней называется периодом минимального стока, когда реки питаются преимущественно подземными водами [Владимиров, 1970]. Поскольку значения минимального стока за летний и зимний сезоны являются генетически различными величинами, то они исследуются отдельно.

Цель данного исследования – выявление тенденций изменения характеристик летне-осенней межени и минимального стока за летний сезон на р. Майма (низкогорья Русского Алтая) в условиях современных климатических изменений.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) оценка изменений гидроклиматической составляющей стока на основе данных по метеорологическим станциям Росгидромета, расположенным на территории Алтайского края и Республики Алтай;

2) выбор рек-аналогов, водосборы которых характеризуются с р. Майма географической близостью, схожестью условий формирования стока, а также достаточной продолжительностью наблюдений;

3) расчёт основных характеристик летне-осенней межени и минимального стока для оценки динамических тенденций на р. Майма и получения региональной оценки реакции стока малых рек на изменения климата.

Материалы и методы исследования

Для оценки наличия и величины тренда в рядах температуры воздуха и количества осадков были использованы данные наблюдений на 42 метеорологических станциях Росгидромета, расположенных на территории Алтайского края и Республики Алтай за период с 1950 по 2022 г. Часть данных для анализа с 1950 по 2014 г. была получена из архива ИВП РАН [Морейдо, Америкбаев, 2020]; данные за 2015–2022 гг. по отдельным станциям были получены из открытых источников в сети Интернет [<http://www.pogodaiklimat.ru/>, 2023]. Следует отметить, что за последние годы данные содержали существенные ошибки (например, срочные суммы осадков более 700 мм), что потребовало дополнительных усилий авторов по контролю их качества.

Выбор р. Майма в качестве объекта исследования обусловлен, в первую очередь, тем, что она целиком расположена в пределах низкогорий Алтая, где формируется значительная часть стока весеннего половодья, поступающего в верховья Оби [Галахов, Сябаев, 2016]. Майма является притоком второго порядка р. Обь и правобережным притоком первого порядка р. Катунь. Бассейн р. Майма имеет площадь 776,5 км²

и расположен в пределах Северной Алтайской (69,6 %) и Северо-Восточной Алтайской (30,4 %) физико-географических провинций Алтайской горной области. В бассейне преобладают чернево-таежные и подтаежные ландшафты. Незначительную площадь в пределах бассейна занимают лесостепные ландшафты [Черных, Самойлова, 2011; Лубенец, Черных, 2018] (рис. 1).

Кроме этого, бассейн р. Майма относительно неплохо обеспечен гидрометеорологической информацией. В бассейне имеется метеостанция, расположенная в с. Кызыл-Озек (наблюдения с 1940 г.), абсолютная высота 324 м, и гидрологический пост в с. Майма (наблюдения с 1939 г.), абсолютная высота нуля графика 251,98 м. Река Майма относится к категории рек со смешанным типом питания, так как доля ни одного из основных источников не превышает 50 %: грунтовое – 39, снеговое – 41, дождевое – 20. Норма годового стока в бассейне составляет 11,8 л/с×км², средний расход воды 9,2 м³/с, годовой слой стока 372 мм [Ресурсы..., 1969].

Для получения региональной оценки реакции стока малых рек на изменения климата были дополнительно выбраны аналоги р. Майма и оценены характеристики меженного стока по ним. Выбор аналогов производился по рекомендациям СП33-101-2003 «Определение основных гидрологических характеристик» с учетом сходных условий формирования стока и площади водосбора [Свод правил..., 2003]. Данные о использованных рядах приведены в таблице, схема расположения гидропостов и метеостанций – на рис. 2.

В качестве рек-аналогов были выбраны четыре реки, характеризующиеся, с одной стороны, обеспеченностью гидрометеорологической информацией, а с другой – имеющие близкие с р. Майма длину и площадь бассейна. Реки Локтевка и Белая, как и Майма, расположены на северном макросклоне Алтая и являются левыми притоками р. Чарыш. Локтевка преимущественно низкогорная река. Лишь самые низовья ее расположены на Предалтайской подгорной равнине. Большая часть бассейна р. Белой также располагается в низкогорьях.

Однако верховья реки находятся в среднегорьях, на южном макросклоне Тигирецкого хребта. Река Аламбай в верхнем и среднем течении протекает по низкогорному Салаирскому кряжу, а в низовьях, при впадении в р. Чумыш, выходит на Предсалаирскую равнину. Наконец, Большая Речка – типичная равнинная река правобережья верхней Оби. Она берет начало на лесостепной Бийско-Чумышской возвышенности, затем дренирует древние обские террасы, занятые сосновыми борами, и впадает в р. Обь.

Учитывая небольшую площадь водосбора оцениваемых рек, было принято допущение о репрезентативности выбранных метеостанций для характеристики местных гидроклиматических условий.

Временной промежуток данных по рекам находится с 1987 по 2020 г. для рек Аламбай, Большая Речка, Локтевка и Белая; для р. Майма – с 1940 по 2020 г. В полученных данных существуют пропуски в 2001, 2007 и 2019 гг.

Использованные для исследования гидропосты и метеостанции

The weather stations and gauging stations used in the study

Код поста	Река – пост	Площадь водосбора, км ²	Дата открытия	Индекс метеостанции	Название метеостанции
10108	р. Майма – с. Майма	780	16.08.1939	36055	Кызыл-Озёк
10137	р. Белая – с. Бугришиха	1140	20.10.1960	36038	Змеиногорск
10139	р. Локтевка – с. Курья	1020	20.09.1959	36036	Краснощеково
10144	р. Большая Речка – пгт Троицкое	953	13.04.1960	29936	Троицкое
10188	р. Аламбай – с. Казанцево	1440	14.03.1955	29836	Заринск

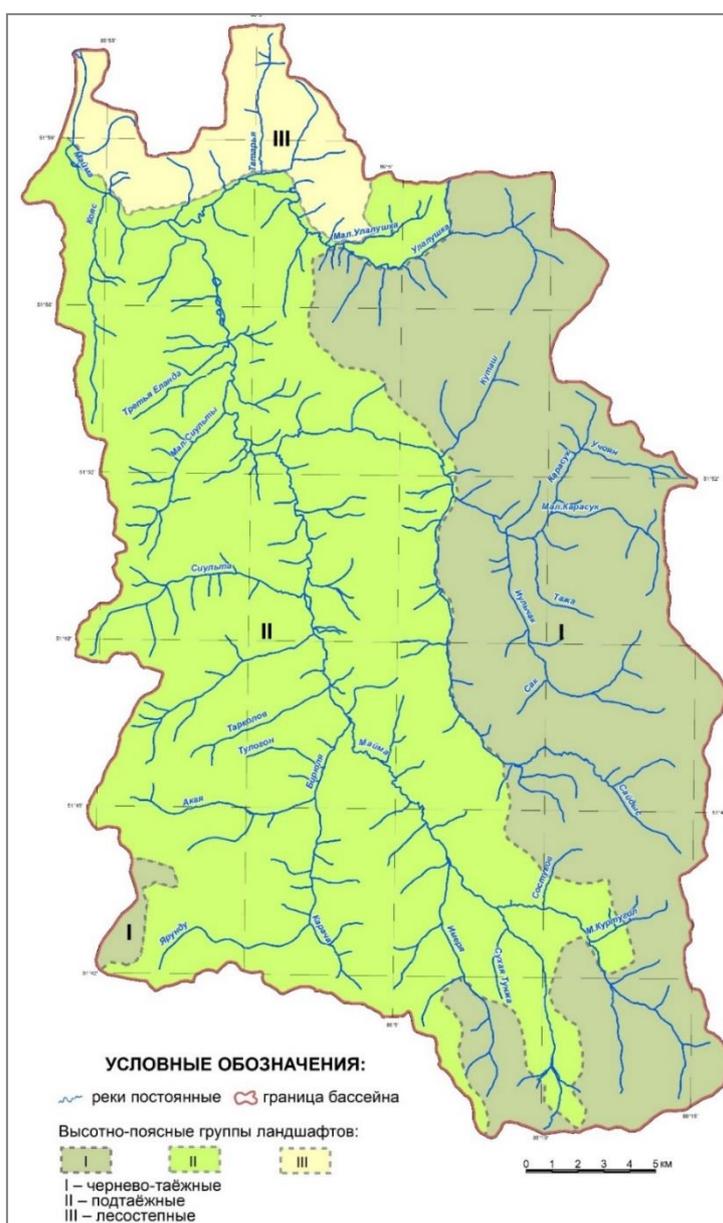


Рис. 1. Высотно-поясные группы ландшафтов в бассейне р. Майма

Fig. 1. Altitude zones of landscapes in the Maima River basin

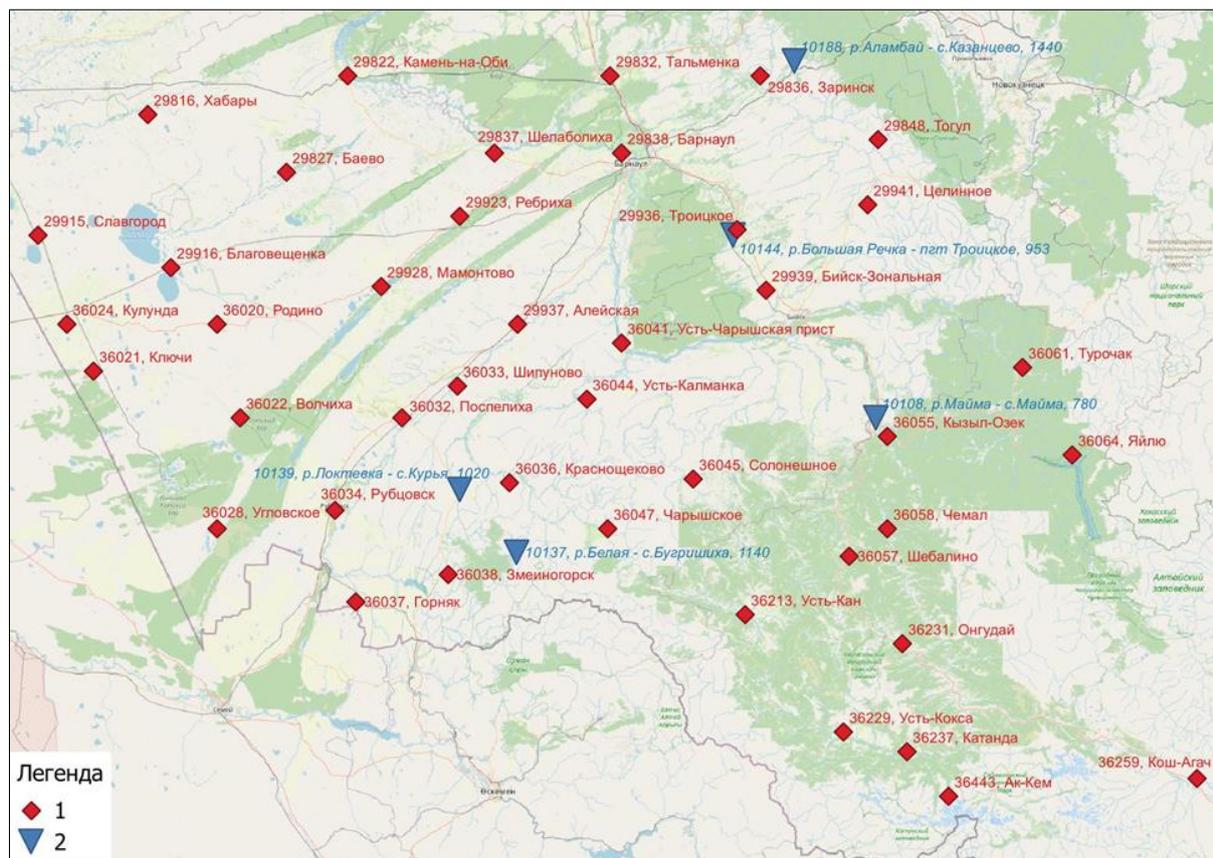


Рис. 2. Расположение использованных в исследовании метеостанций (1) и гидропостов (2)

Fig. 2. The location of weather stations (1) and river gauges (2) used in the study

На основе наблюдений на метеостанциях были оценены многолетние колебания средних по региону среднегодовых температур и сумм осадков. Для оценки наличия трендов в рядах были рассчитаны показатели Манна–Кендалла и Тейла–Сенна.

Для оценки изменений, происходящих в регионе с минимальным стоком рек, был применен метод автоматического графо-аналитического расчленения гидрографа, описанный в работах [Чижова и др., 2021; Rets и др., 2022], который, учитывая особенности каждой конкретной реки, отделяет подземную составляющую стока, весеннее половодье, дождевые и оттепельные паводки. С помощью этого метода по данным о речном стоке и атмосферных осадках на водосборе возможна оценка отдельно быстрой (склоновой) и медленной (грунтовой или базисной) составляющих речного стока в замыкающем створе. Метод реализован в виде программного пакета GrWat на языке R [GrWat, 2023].

Методика разделения быстрой и базисной составляющих стока основывается на концепции критических параметров изменения суточных расходов воды.

Сток воды принимается на 100% состоящим из базисного стока в i -й день, если удовлетворяется следующее условие [Чижова и др., 2021]:

$$\begin{cases} \left| \frac{Q_i - Q_{i+1}}{Q_i} \right| \times 100\% \leq grad \\ \left| \frac{Q_i - Q_{grlast}}{Q_i \cdot n} \right| \times 100\% \leq grad, \\ \left| \frac{Q_i - Q_{gr1}}{Q_{gr1}} \right| \times 100\% \leq kdQ_{gr1} \end{cases}$$

где Q_i – полный речной сток в i -й день; Q_{i+1} – полный речной сток в $(i+1)$ -й день; Q_{grlast} – полный речной сток в ближайший предыдущий день, в который, согласно данным условиям, сток на 100% состоял из базисного; Q_{gr1} – полный речной сток в первый в данном календарном году день, в который, согласно данным условиям, сток на 100% состоял из базисного; n – число дней между i -м днем и датой Q_{grlast} ; $grad$ – калибровочный параметр – критический градиент суточного изменения расхода воды, который отражает динамику разгрузки базисной компоненты, выраженный в процентах от расхода воды в i -й день (этот параметр может быть назначен отдельно для периода половодья и межени); kdQ_{gr1} – калибровочный пара-

метр – максимальное возможное превышение расхода воды базисной составляющей над ее величиной до начала половодья.

В период прохождения половодья для отделения подземного стока в алгоритме GrWat используется схема расчленения гидрографа, предложенная Б.И. Куделиным для подземных вод, гидравлически связанных с рекой [Куделин, 1960]. Во время прохождения максимального расхода воды подземное питание реки приравнивается нулю. В отечественной практике это принятая методика гидрогеологических расчетов для выделения подземного стока в период половодья или паводков.

Полученные с помощью программного пакета GrWat автоматизированные оценки параметров меженного стока рек включали следующие характеристики:

- объем грунтового стока, км³;
- объем грунтового стока летом, км³;
- средний расход грунтовых вод за водохозяйственный год, м³/с;
- минимальный 30-суточный расход за лето, м³/с;
- дата начала минимального 30-суточного расхода за лето;
- продолжительность летне-осенней межени, сут;
- год перелома характеристики по тесту Петтитта и величина значимости;
- тест Стьюдента различия средних по двум периодам, разделенным по году перелома;
- тест Манна–Кендалла на значимость тренда.

Результаты и обсуждение

Оценка изменений гидроклиматической составляющей стока (температура воздуха и атмосферные осадки). Ряд среднегодовых температур и в равнинной, и в горной частях Алтайского региона показывает наличие статистически значимого тренда (при $\alpha = 0,05$), при этом все тренды имеют положительный знак. Оценка осуществлялась отдельно для станций, расположенных в равнинной части региона (высота расположения станции – до 435 м Балтийской системы высот) и для горной части (выше 435 м Балтийской системы высот). Для равнинной части значение линейного тренда составило $0,28\text{ }^{\circ}\text{C} / 10\text{ лет}$, для горной – $0,29\text{ }^{\circ}\text{C} / 10\text{ лет}$.

Ряд среднегодовых сумм осадков показывает наличие статистически устойчивого тренда для равнинной части ($6,2\text{ мм} / 10\text{ лет}$ при $\alpha = 0,05$); для горной части тренд составляет $5,8\text{ мм} / 10\text{ лет}$, но является статистически не значимым. Статистически значимый тренд по осадкам наблюдается только на отдельных станциях в равнинной части, в основном на западе региона. Средняя величина тренда по осадкам на этих станциях – $14\text{ мм} / 10\text{ лет}$ (рис. 3, 4).

В сезонном разрезе статистически значимые тренды выделяются только в холодный период года, причем также на метеостанциях, расположенных в равнинной части региона. Температура в холодный период года растет в среднем на $0,38\text{ }^{\circ}\text{C}$, а осадки – на 7 мм за десятилетие (рис. 5).

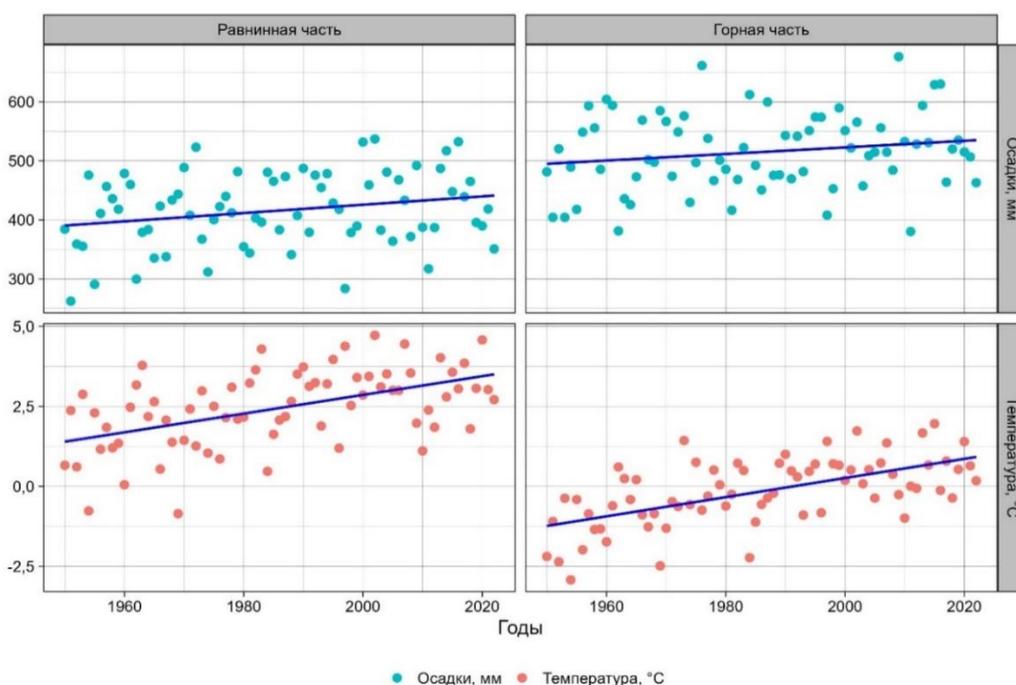


Рис. 3. Многолетние средние значения среднегодовой температуры и суммы осадков по высотным зонам. Синими линиями показаны линейные тренды

Fig. 3. The long-term average annual temperature and total annual precipitation of altitude zones. Blue lines show linear trends

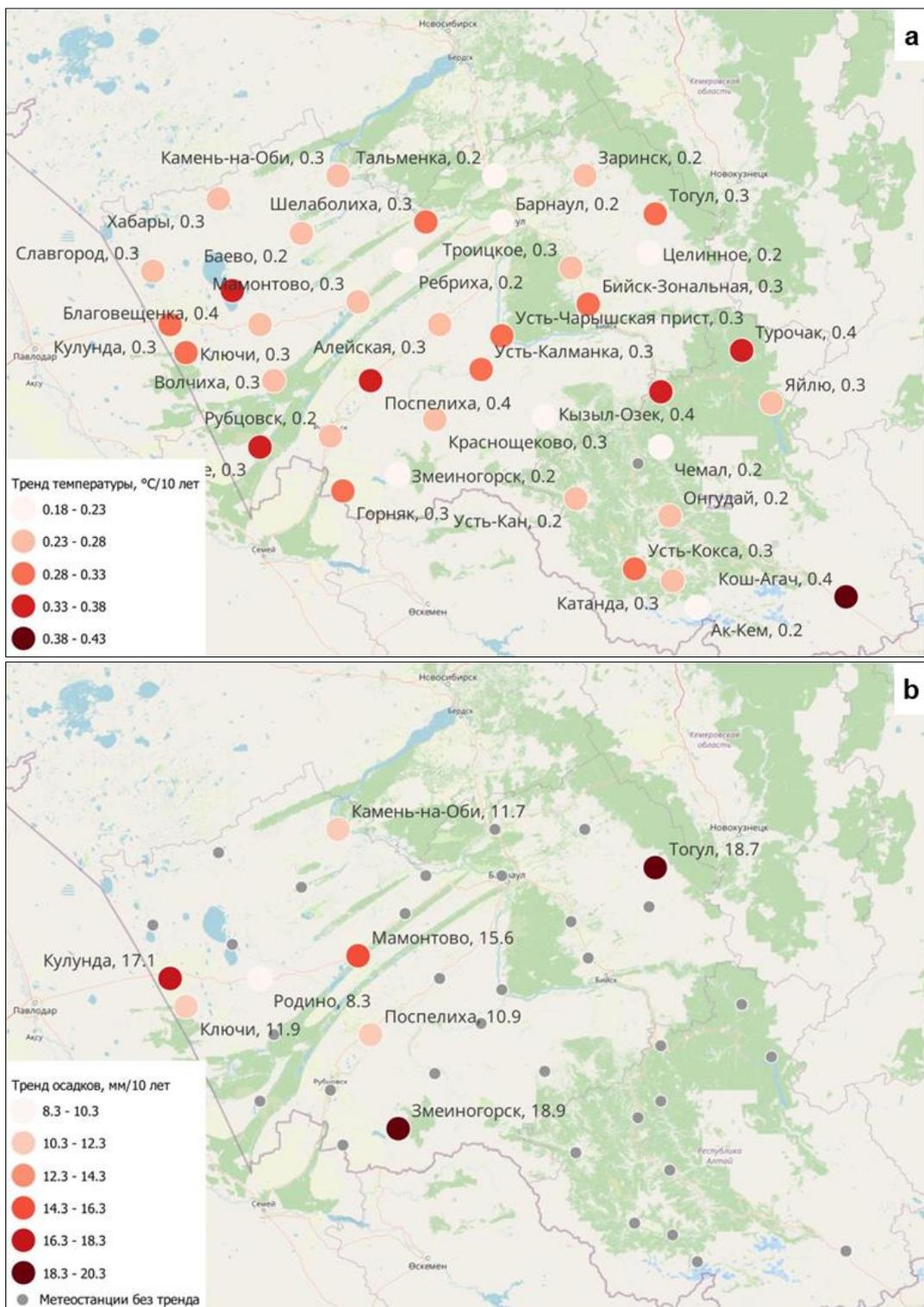


Рис. 4. Метеостанции, на которых обнаружен положительный тренд температуры (а) и осадков (б)

Fig. 4. The weather stations where a significant positive trend in temperature (a) and precipitation (b) was detected. Grey dots show stations with insignificant trends

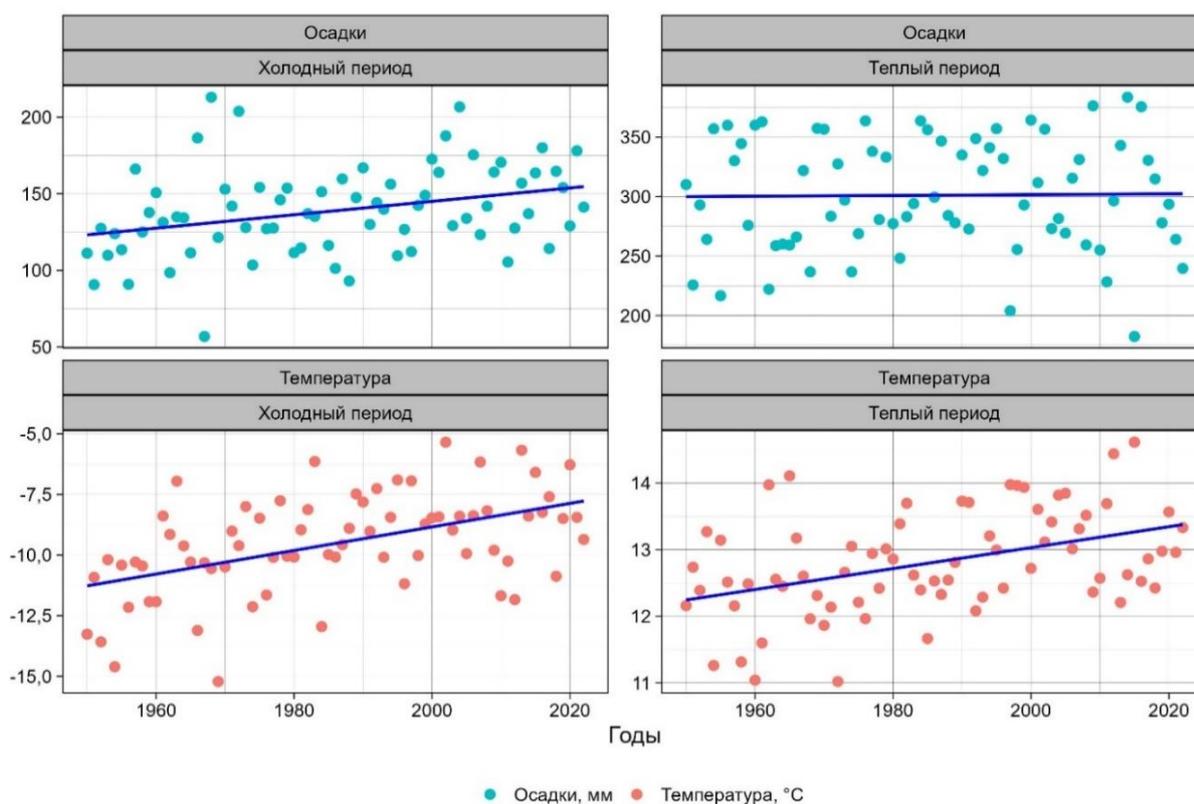


Рис. 5. Среднегодовые температуры воздуха и суммы осадков по периодам года

Fig. 5. Long-term average air temperatures (upper row) and total precipitation (lower row) of the cold (left column) and warm (right column) periods

Поиск точек перегиба с помощью теста Петтита показал, что для равнинной части изменения в средней годовой температуре начали происходить в 1980 г., в сумме годовых осадков – в 1983 г. Для горной части водосбора эти показатели несколько отложены во времени: изменения в температуре здесь начинаются с 1988 г., в осадках – с 1993 г.

Общая тенденция, проявляющаяся для региона, – увеличение температуры воздуха и суммы осадков. Однако проявления этих увеличений различны. Температура растет во все сезоны года, как на равнинах, так и в горах. Обнаруженные тренды в осадках не позволяют судить о существенном увеличении их в теплый период года, тогда как изменения происходят за счет выпадения большего количества твердых осадков.

Многолетняя динамика сроков летней межени и оценка параметров минимального стока. Анализ характеристик меженного стока рек позволяет сделать следующие выводы об их изменении за анализируемый период. В объеме грунтового стока за весь год на всех реках наблюдается положительный тренд (рис. 6), однако статистически он не значим ни на

одной реке. В объеме грунтового стока летне-осенней межени также наблюдается положительный тренд, в этом случае – статистически значимый на всех из рассматриваемых рек. Начало тренда, определяемое по году перелома, для всех рек приходится на 2000-е гг.

Величина среднего годового расхода грунтовых вод за водохозяйственный год, т.е. так называемого базисного стока, определяемая как часть речного стока, которая дренируется из подземных горизонтов бассейна и других источников с отложенным добеганием [Чижова и др., 2021], также имеет положительный тренд с переломом в 2000-е гг. Характерно, что для р. Маймы год перелома совпадает с организацией на реке каскада русловых прудов.

Дата начала минимального 30-суточного расхода за лето, которая характеризует период истощения запасов базисного стока, имеет разнонаправленную тенденцию на реках региона. Для рек Майма и Белая наблюдается смещение сроков в сторону увеличения (с начала на конец августа), тогда как на остальных реках тренд обратный. Это может свидетельствовать об увеличении грунтового питания в летний период.

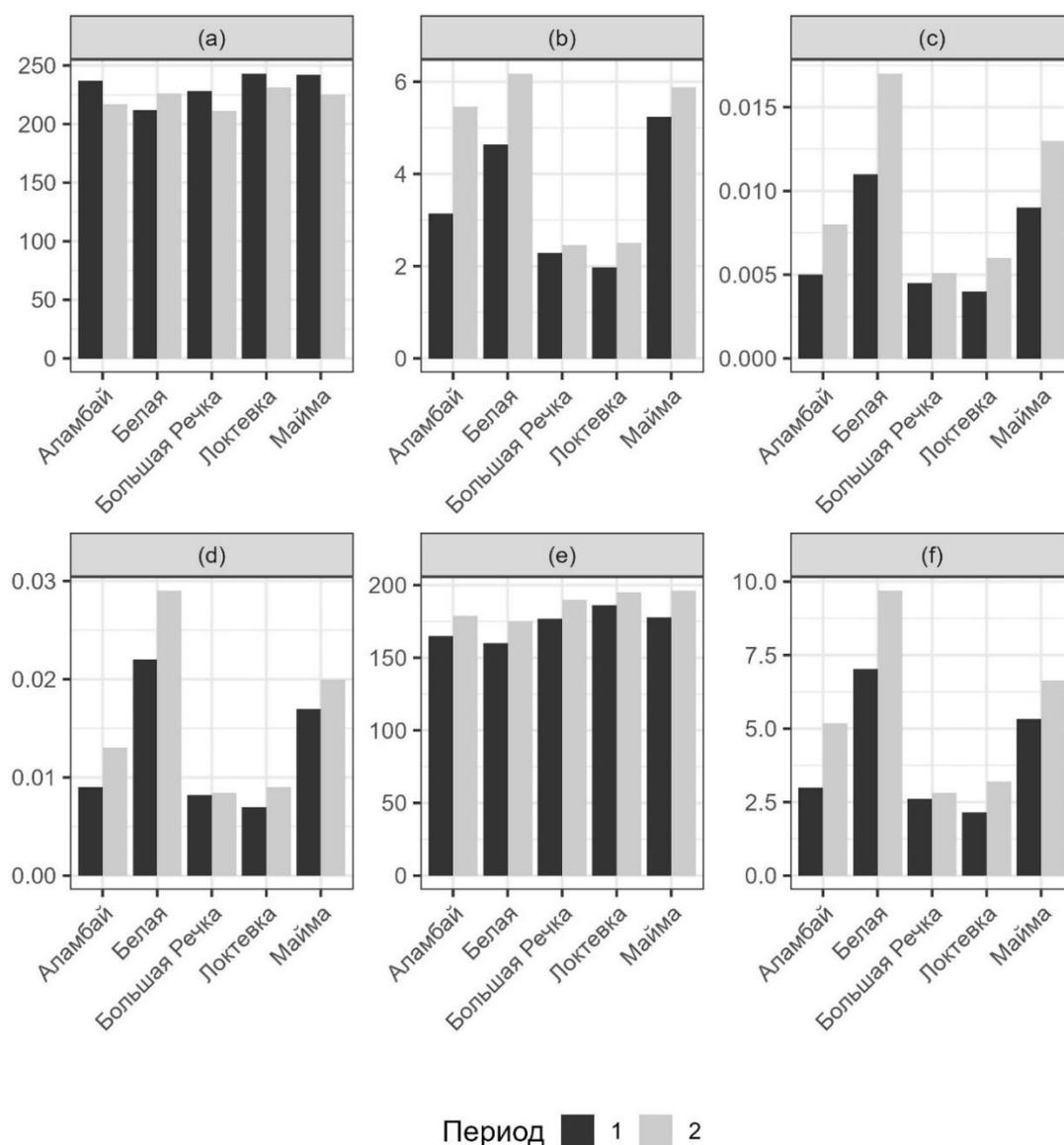


Рис. 6. Дата начала минимального 30-суточного расхода за лето (номер дня в году) (a); Минимальный 30-суточный расход за лето, m^3/s (b); объем грунтового стока летом, km^3 (c); объем грунтового стока, km^3 (d); продолжительность летне-осенней межени, дней (e); средний расход грунтовых вод за водохозяйственный год, m^3/s (f)

Fig. 6. Commencement date of the summer minimum 30-day runoff (day number in the year) (a); summer minimum 30-day runoff, m^3/s (b); volume of groundwater summer runoff, km^3 (c); volume of groundwater annual runoff, km^3 (d); duration of summer-autumn low-flow period, days (e); average groundwater runoff for a water management year, m^3/s (f)

Величина минимального 30-суточного расхода воды также увеличивается на всех рассматриваемых реках, наряду с увеличением среднего расхода грунтовых вод за водохозяйственный год. Для р. Аламбай увеличение минимального 30-суточного расхода воды за лето составило 74 %, среднего расхода воды за водохозяйственный год – 73 %. Это сказалось и на объеме грунтового стока летнего периода, который

увеличился на Аламбае на 60 %. Этот показатель увеличился на 55 % и на Большой Речке. Отмечаемые изменения в меженном стоке произошли, вероятно, по причине регулирования стока русловыми прудами, которые находятся выше гидрометрических постов.

Наконец, продолжительность летне-осенней межени увеличивается для всех рек на величину до

14 сут, но только для рр. Майма, Большая Речка и Бела этот тренд статистически значимый.

Полученные оценки изменений минимального стока на первый взгляд не согласуются с оценками изменений суммы атмосферных осадков в регионе. Минимальный сток растет на всех исследуемых реках начиная с 2000-х гг., с запаздыванием до 15–20 лет по сравнению со статистически значимыми изменениями сумм осадков. При этом растут в основном зимние осадки, что должно непосредственно отражаться на стоке весеннего половодья. В этот период подпитка подземных водоносных горизонтов увеличивается синхронно с увеличением снегового питания рек во время снеготаяния. По мнению авторов, причина такой несогласованности кроется в запаздывании процессов подпитки и разгрузки грунтовых вод и более глубоких водоносных горизонтов в русловую сеть по сравнению с изменениями годовых сумм осадков.

Для большинства регионов мира нельзя однозначно предсказать реакцию подземных вод на изменения климата [Green et al., 2007]. Тем не менее во многих бассейнах существуют механизмы задержания стока, которые приводят к замедленной гидрологической реакции на осадки. Причем эта задержка определяется условиями на водосборе [Лебедева, Макарьева, 2020]. Наиболее часто подобные случаи отмечены в районах распространения многолетнемерзлых пород. Например, в Якутии в бассейнах притоков Лены причиной неоднозначной реакции базисного стока на изменения количества атмосферных осадков является динамика подземного (подмерзлотного) стока, обусловленная меняющимися геокриологическими условиями на участках питания подземных вод [Сергеев и др., 2009]. Также на материалах по Якутии отмечается, что малые реки имеют более замедленную реакцию стока на осадки по сравнению с более крупными реками региона [Лебедева, Макарьева, 2020].

В европейской части России перестройка структуры водного баланса в результате изменений климата также происходит не сразу. За счет эффекта запаздывания на юге лесной и в лесостепной зонах время реакции речного стока на многолетние изменения климата составляет в среднем 6–8 лет [Ясинский, 2009].

Будущие проекции реакций стока крупных речных систем Арктики на изменения климата с помощью моделей формирования речного стока также подтверждают наличие запаздывания между пиковыми значениями ожидаемых изменений сумм осадков в Северном Полушарии и повышением речного стока [Gelfan et al., 2017]. Так, оценка будущих изменений стока рек Лена и Маккензи показала наличие

запаздывания в 10–20 лет между началом максимумом годовых осадков и максимальными значениями речного стока за многолетний период до конца XX в. При этом по сценарию эмиссии парниковых газов и адаптационных мер RCP2.6 в бассейне Маккензи ожидается возрастание значений годового стока с последующим уменьшением, тогда как в бассейне Лены водность стабилизируется до 2100 г.

Как показали исследования на юге провинции Манитоба (Канада), в районах с распространением карбонатных пород подземные воды тоже неоднозначно реагируют на изменение режима осадков. Из-за пространственных различий в проницаемости карбонатных пород в разных скважинах фиксируются противоположные тренды, характеризующие изменение запасов подземных вод [Chen et al., 2002]. В бассейне р. Майма, где карбонатные породы представлены достаточно широко, подобную ситуацию также нельзя исключать.

Одной из причин запаздывания реакции минимального стока на осадки может быть невыдержанность мощности и состава четвертичных отложений, что имеет место как в пределах бассейна р. Майма, так и в ряде бассейнов аналогов. Вследствие этого часть грунтовых вод может перетекать в отложения придолинных шлейфов и конусов выноса [Михайлов, 1982]. Состав отложений этих форм рельефа по мере движения от их вершин к периферии меняется с песчано-галечникового на песчано-гравелистый, а затем на суглинисто-глинистый. Последние создают подпор грунтовых вод. Воды, залегающие в галечниках или песках под суглинисто-глинистыми отложениями, приобретают напорность. В результате со временем могут образовываться единые водоносные комплексы грунтовых и напорных вод.

Полученные данные позволяют сделать вывод о необходимости расширения анализа на все гидрометрические посты в бассейне Верхней Оби для получения более надежной оценки и полной картины.

Заключение

Оценка изменений гидроклиматической составляющей стока на основе данных по метеорологическим станциям Росгидромета, расположенным на территории Алтайского края и Республики Алтай, показала наличие тенденции к увеличению температуры воздуха и суммы осадков. Температура растет во все сезоны года, как на равнинах, так и в горах. Обнаруженные тренды в осадках не позволяют судить о существенном увеличении их в теплый период года, тогда как изменения происходят за счет выпадения большего количества твердых осадков.

В объеме грунтового стока за весь год на р. Майма и реках-аналогах наблюдается положительный тренд, однако статистически он не значим ни на одной реке. В объеме грунтового стока летне-осенней межени также наблюдается положительный тренд, в этом случае – статистически значимый на всех из рассматриваемых рек.

Величина среднего годового расхода грунтовых вод за водохозяйственный год, т.е. так называемого базисного стока, также имеет положительный тренд с переломом в 2000-е гг. Продолжительность летне-осенней межени увеличивается для всех рек на величину до 14 суток.

Вероятной причиной отложенной на 15–20 лет реакции минимального стока на возрастание количества осадков является запаздывание процессов подпитки и разгрузки грунтовых вод и более глубоких водоносных горизонтов в русловую сеть.

Это, в свою очередь, может быть следствием распространения карбонатных пород, а также невыдержанности мощности и состава четвертичных отложений, что ведет к перетеканию грунтовых вод в напорные и образованию единых водоносных комплексов грунтовых и напорных вод.

Список источников

- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А.** Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
- Владимиров А.М.** Минимальный сток рек СССР. Л. : Гидрометеиздат, 1970. 214 с.
- Владимиров А.М.** Сток рек в маловодный период года. Л. : Гидрометеиздат, 1976. 295 с.
- Галахов В.П., Сюбаев А.А.** Расчет объема стока первой волны половодья Оби у Барнаула. Барнаул, 2016. 122 с.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А.** Природно-климатические и антропогенные изменения стока Волги и Дона // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 2. С. 55–78.
- ГОСТ 19179-73.** Гидрология суши. Термины и определения. Утверждены Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 29 октября 1973 г. № 2394.
- Джамалов Р.Г., Сафронова Т.И., Телегина Е.А.** Внутригодовое распределение стока рек с оценкой роли зимней межени // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 6. С. 603–611.
- Закономерности гидрологических процессов / под ред. Н.И. Алексеевского.** М. : ГЕОС, 2012. 736 с.
- Куделин Б.И.** Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М. : Изд-во Московского университета, 1960. 343 с.
- Лебедева Л.С., Макарьева О.М.** Факторы пространственной изменчивости речного стока в Центральной Якутии // Известия РАН. Серия географическая. 2020. Т. 84, № 5. С. 776–785.
- Лубенец Л.Ф., Черных Д.В.** Ландшафтное картографирование бассейна р. Майма (Русский Алтай) // Геодезия и картография. 2018. Т. 79, № 11. С. 15–24. doi: 10.22389/0016-7126-2018-941-11-15-24
- Михайлов Л.Е.** Грунтовые воды. Л. : Изд-во ЛПИ, 1982. 40 с.
- Морейдо В.М., Амербаев А.Н.** База данных для регионального гидрологического моделирования на территории Российской Федерации. Номер регистрации (свидетельства): 2020622193. Дата регистрации: 09.11.2020.
- Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность.** Т. 15: Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1: Горный Алтай и Верхний Иртыш. Л. : Гидрометеорологическое изд-во, 1969. 216 с.
- Свод правил СП 33-101-2003** Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Одобрен для применения в качестве нормативного документа постановлением Госстроя России № 218 от 26 декабря 2003 г.
- Сергеев Д.О., Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Булдович С.Н., Типенко Г.С., Йошикава К., Романовский В.** Влияние динамики климата и геокриологических условий на режим регионального стока и наледообразования горных водосборов бассейна реки Лены // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII, № 3. С. 29–35.
- Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилев А.А., Падалко Ю.А.** Современные изменения водного режима рек бассейна р. Урал // Вопросы географии. 2018. Сб. 145: Гидрологические изменения. С. 298–313.
- Чеботгарев А.И.** Гидрологический словарь. Л. : Гидрометиздат, 1978. 308 с.
- Черных Д.В., Самойлова Г.С.** Ландшафты Алтая (Алтайский край и Республика Алтай). Новосибирск : ФГУП Новосибирская картографическая фабрика, 2011.
- Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Тебенькова Н.А., Козачек А.В., Верес А.Н., Екайкин А.А., Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Еремина И.Д.** Двухкомпонентное расчленение гидрографа реки Протвы // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2021. № 6. С. 62–76.
- Ясинский С.В.** Формирование гидрологического режима водосборов малых равнинных рек : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2009. 51 с.
- Beaulieu M., Schreier H., Jost G.** A shifting hydrological regime: A field investigation of snowmelt runoff processes and their connection to summer base flow, Sunshine Coast, British Columbia // Hydrological Processes. 2012. V. 26 (17). P. 2672–2682. doi: 10.1002/hyp.9404
- Brunner M.L., Melsen L.A., Newman A.J., Wood A.W., Clark M.P.** Future streamflow regime changes in the United States: assessment using functional classification // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. V. 24. P. 3951–3966. doi: 10.5194/hess-24-3951-2020
- Chen Z., Graby S.E., Osadetz K.G.** Predicting average annual groundwater levels from climatic variables: an empirical model // Journal of Hydrology. 2002. V. 260 (1–4). P. 102–117.
- Dang Q.T., Laux P., Kunstmann H.** Future high-and low-flow estimations for Central Vietnam: a hydro-meteorological modelling chain approach // Hydrol. Sci. J. 2017. V. 62 (11). P. 1867–1889.
- Etter S., Addor N., Huss M., Finger, D.** Climate change impacts on future snow, ice and rain runoff in a Swiss mountain catchment using multi-dataset calibration // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2017. V. 13. P. 222–239. doi: 10.1016/j.ejrh.2017.08.005

- Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Y., Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I. and Lavrenov A.** Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues // *Clim. Change*. 2017. № 141 (3). P. 499–515. doi: 10.1007/s10584-016-1710-5
- Godsey S.E., Kirchner J.W., Tague C.L.** Effects of changes in winter snowpacks on summer low flows: Case studies in the Sierra-Nevada, California, USA // *Hydrological Processes*. 2014. V. 28 (19). P. 5048–506. doi: 10.1002/hyp.9943
- Green T.R., Bates B.C., Charles S.P., Fleming P.M.** Physically based simulation of potential effects of carbon dioxide-altered climates on groundwater recharge // *Vadose Zone J.* 2007. V. 6 (3). P. 597–609.
- GrWat** [Электронный ресурс] / Samsonov T.E.
- Jenicek M., Seibert J., Staudinger M.** Modeling of future changes in seasonal snowpack and impacts on summer low flows in alpine catchments // *Water Resour. Res.* 2018. V. 54. P. 538–556. doi: 10.1002/2017WR021648
- Kay A.L., Bell V.A., Guillod B.P., Jones R.G., Rudd A.C.** National-scale analysis of low flow frequency: historical trends and potential future changes // *Clim Change*. 2018. V. 147 (3–4). P. 585–599.
- Kreye P., Woerner V., Gelleszun M., Meon G.** Model based projection of changes in low flow situations due to climate change in the federal state of Lower Saxony // *Hydrol Wasserbewirts.* 2017. V. 61 (4). P. 217–231.
- Marx A., Kumar R., Thober S., Rakovec O., Wanders N., Zink M., Wood E.F., Pan M., Sheffield J., Samaniego L.** Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3 °C // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2018. V. 22. P. 1017–1032. doi: 10.5194/hess-22-1017-2018
- Moore R.D., Allen D.M., Stahl K.** Climate change and low flows: influences of groundwater and glaciers. Final Report to Climate Change Action Fund, Project A875. 2007. 201 p.
- Rets E.P., Kireeva M.B., Samsonov T.E., Ezerova N.N., Gorbarenko A. V., Frolova N.L.** Algorithm grwat for Automated Hydrograph Separation by B.I. Kudelin's Method: Problems and Perspectives // *Water Resources*. 2022. V. 49, № 1. P. 23–37. doi: 10.1134/S0097807822010146
- Smakhtin V.U.** Low flow hydrology: a review // *Journal of Hydrology*. 2001. V. 240. P. 147–186.
- Stumbaugh M., Hamlet A.F.** Effects of climate change on extreme low-flows in small lowland tributaries in the Skagit River Basin // *Northwest Sci.* 2016. V. 90 (1). P. 44–56.
- Teutschbein C., Grabs T., Karlsen R.H., Laudon H., Bishop, K.** Hydrological response to changing climate conditions: Spatial streamflow variability in the boreal region // *Water Resources Research*. 2015. V. 51. P. 9425–9446. doi: 10.1002/2015WR017337
- Van Vliet M.T.H., Zwolsman J.J.G.** Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river // *Journal of Hydrology*. 2008. V. 353. P. 1–17.
- URL:** <http://www.pogodaiklimat.ru>

References

- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. *Sovremennye izmeneniya minimal'nogo stoka na rekakh basseyna r. Volga* [Modern changes in the minimum flow on the rivers of the river basin] // *Meteorologiya i gidrologiya* Meteorology and hydrology]. 2014. No. 3. pp. 75–85. In Russian
- Vladimirov A.M. *Minimal'nyy stok rek SSSR* [River flow during low-water periods of the year]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 214 p. In Russian
- Vladimirov A.M. *Ctok rek v malovodnyy period goda* [River flow during the low water season]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976. 295 p.
- Galakhov V.P., Syubaev A.A. *Raschet ob'ema stoka pervoy volny polovod'ya Obi u Barnaula* [Calculation of the runoff volume of the first wave of the Ob flood near Barnaul.] Barnaul, 2016. 122 p. In Russian
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Prirodno-klimaticheskie i antropogennye izmeneniya stoka Volgi i Dona* [Natural-climatic and anthropogenic changes in the flow of the Volga and Don] // *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. 2016. No. 2. pp. 55–78. In Russian
- GOST 19179-73. Gidrologiya sush. Terminy i opredeleniya. Utverzhdeny Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta standartov Soveta Ministrov SSSR ot 29 oktyabrya 1973 g.* [GOST 19179-73. Hydrology of land. Terms and Definitions. Approved by Resolution of the State Committee of Standards of the Council of Ministers of the USSR dated October 29, 1973 N 2394]. N 2394. In Russian
- Dzhamalov R.G., Safronova T.I., Telegina E.A. *Vnutrigodovoe raspredelenie stoka rek s otsenkoy roli zimney mezheni* [Intra-annual distribution of river flow with assessment of the role of winter low water] // *Vodnye resursy* [Water resources]. 2017. V. 44, No. 6. pp. 603–611. In Russian
- Zakonomernosti gidrologicheskikh protsessov* [Patterns of hydrological processes] / pod red. N.I. Alekseevskogo. Moscow: GEOS, 2012. 736 p. In Russian
- Kudelin B.I. *Printsipy regional'noy otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles for regional assessment of natural groundwater resources] Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1960. 343 p. In Russian
- Lebedeva L.S., Makar'eva O.M. *Faktory prostranstvennoy izmenchivosti rechnogo stoka v Tsentral'noy Yakutii* [Factors of spatial variability of river flow in Central Yakutia] // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2020. V. 84, No. 5. pp. 776–785. In Russian
- Lubenets L.F., Chernykh D.V. *Landshaftnoe kartografirovaniye basseyna r. Maima (Russkiy Altay)* [Landscape mapping of the river basin Maima (Russian Altai)] // *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and cartography]. 2018. V. 79, No. 11. pp. 15–24. doi: 10.22389/0016-7126-2018-941-11-15-24
- Mikhaylov L.E. *Gruntovye vody* [Publishing house]. Leningrad: Izd-vo LPI. 1982. 40 p. In Russian
- Moreydo V.M., Amerbaev A.N. *Baza dannykh dlya regional'nogo gidrologicheskogo modelirovaniya na territorii Rossiyskoy Federatsii. Nomer registratsii (svidetel'stva): 2020622193. Data registratsii: 09.11.2020.* [Database for regional hydrological modeling on the territory of the Russian Federation. Registration number (certificate): 2020622193. Registration date: 11/09/2020] In Russian
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 15: Altay i Zapadnaya Sibir'. Vyp. 1: Gornyy Altay i Verkhniy Irtysh* [Surface water resources of the USSR: Hydrological knowledge. V. 15: Altai and Western Siberia. V. 1: Mountain Altai and Upper Irtysh.]. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izd-vo, 1969. 216 p. In Russian

Svod pravil SP 33-101-2003 Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik. Odobren dlya primeneniya v kachestve normativnogo dokumenta postanovleniem Gosstroya Rossii N 218 ot 26 dekabrya 2003 g [Code of Practice SP 33-101-2003 Determination of basic design hydrological characteristics. Approved for use as a regulatory document by Decree of the State Construction Committee of Russia No. 218 of December 26, 2003.]. In Russian

Sergeev D.O., Romanovskiy N.N., Gavrilov A.V., Buldovich S.N., Tipenko G.S., Yoshikava K., Romanovskiy V. *Vliyanie dinamiki klimata i geokriologicheskikh usloviy na rezhim regional'nogo stoka i naledeobrazovaniya gornyykh vodosborov basseyna reki Leny* [Influence of climate dynamics and geocryological conditions on the regime of regional runoff and ice formation of mountain watersheds of the Lena River basin] // *Kriosfera Zemli*. 2009. V. XIII, No. 3. pp. 29–35. In Russian

Sivokhip Zh.T., Pavleychik V.M., Chibilev A.A., Padalko Yu.A. *Sovremennye izmeneniya vodnogo rezhima rek basseyna r. Ural* [Modern changes in the water regime of rivers in the river basin. Ural] // *Voprosy geografii*. 2018. Sb. 145: Gidrologicheskie izmeneniya. pp. 298–313. In Russian

Chebotaev A.I. *Gidrologicheskiy slovar'* [Hydrological Dictionary]. Leningrad: Gidrometizdat, 1978. 308 p. In Russian

Chernykh D.V., Samoylova G.S. *Landshafty Altaya (Altayskiy kray i Respublika Altay)* [Landscapes of Altai (Altai Territory and Altai Republic)]. Novosibirsk: FGUP Novosibirskaya kartograficheskaya fabrika, 2011. In Russian

Chizhova Yu.N., Rets E.P., Teben'kova N.A., Kozachek A.V., Veres A.N., Ekaykin A.A., Gorbarenko A.V., Varentsova N.A., Kireeva M.B., Frolova N.L., Eremina I.D. *Dvukhkomponentnoe raschlenenie gidrografa reki Protvy* [Two-component division of the hydrograph of the Protva River] // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2021. No. 6. pp. 62–76. In Russian

Yasinskiy S.V. *Formirovaniye gidrologicheskogo rezhima vodosborov malykh ravninnykh rek* [Formation of the hydrological regime of catchment areas of small lowland rivers] // *Avtoref. dis. dokt. geogr. nauk. Moscow*, 2009. 51 p. In Russian

Beaulieu M., Schreier H., Jost, G. A shifting hydrological regime: A field investigation of snowmelt runoff processes and their connection to summer base flow, Sunshine Coast, British Columbia // *Hydrological Processes*. 2012. V. 26 (17). pp. 2672–2682. doi: 10.1002/hyp.9404

Brunner M.I., Melsen L.A., Newman A.J., Wood A.W., Clark M.P. Future streamflow regime changes in the United States: assessment using functional classification // *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2020. V. 24. pp. 3951–3966. doi: 10.5194/hess-24-3951-2020

Chen Z., Grasby S.E., Osadetz K.G. Predicting average annual groundwater levels from climatic variables: an empirical model // *Journal of Hydrology*. 2002. V. 260 (1–4). pp. 102–117.

Dang Q.T., Laux P., Kunstmann H. Future high- and low-flow estimations for Central Vietnam: a hydro-meteorological modelling chain approach // *Hydrol Sci J*. 2017. V. 62 (11). pp. 1867–1889.

Etter S., Addor N., Huss M., Finger, D. Climate change impacts on future snow, ice and rain runoff in a Swiss mountain catchment using multi-dataset calibration // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2017. V. 13. pp. 222–239. doi: 10.1016/j.ejrh.2017.08.005

Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Y., Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I. and Lavrenov A. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues // *Clim. Change*. 2017. 141 (3). pp. 499–515. doi: 10.1007/s10584-016-1710-5

Godsey S.E., Kirchner J.W., Tague C.L. Effects of changes in winter snowpacks on summer low flows: Case studies in the Sierra-Nevada, California, USA // *Hydrological Processes*. 2014. V. 28 (19). pp. 5048–5066. doi: 10.1002/hyp.9943

Green T.R., Bates B.C., Charles S.P., Fleming P.M. Physically based simulation of potential effects of carbon dioxide-altered climates on groundwater recharge // *Vadose Zone J*. 2007. V. 6 (3). pp. 597–609.

GrWat [Электронный ресурс] / Samsonov T.E.

Jenicek M., Seibert J., Staudinger M. Modeling of future changes in seasonal snowpack and impacts on summer low flows in alpine catchments // *Water Resour. Res*. 2018. V. 54. pp. 538–556. doi: 10.1002/2017WR021648

Kay A.L., Bell V.A., Guilloid B.P., Jones R.G., Rudd A.C. National-scale analysis of low flow frequency: historical trends and potential future changes // *Clim Change*. 2018. V. 147 (3–4). pp. 585–599.

Kreye P., Woerner V., Gelleszun M., Meon G. Model based projection of changes in low flow situations due to climate change in the federal state of Lower Saxony // *Hydrol Wasserbewirts*. 2017. V. 61 (4). pp. 217–231.

Marx A., Kumar R., Thober S., Rakovec O., Wanders N., Zink M., Wood E.F., Pan M., Sheffield J., Samaniego L. Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3 °C // *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2018. V. 22. pp. 1017–1032. doi: 10.5194/hess-22-1017-2018

Moore R.D., Allen D.M., Stahl K. Climate change and low flows: influences of groundwater and glaciers. Final Report to Climate Change Action Fund, Project A875. 2007. 201 p.

Rets E.P., Kireeva M.B., Samsonov T.E., Ezerova N.N., Gorbarenko A. V., Frolova N.L. Algorithm grwat for Automated Hydrograph Separation by B.I. Kudelin's Method: Problems and Perspectives // *Water Resources*. 2022. V. 49, No. 1. pp. 23–37. doi: 10.1134/S0097807822010146

Smakhtin V.U. Low flow hydrology: a review // *Journal of Hydrology*. 2001. V. 240. pp. 147–186.

Stumbaugh M., Hamlet A.F. Effects of climate change on extreme low-flows in small lowland tributaries in the Skagit River Basin // *Northwest Sci*. 2016. V. 90 (1). pp. 44–56.

Teutschbein C., Grabs T., Karlsen R.H., Laudon H., Bishop, K. Hydrological response to changing climate conditions: Spatial streamflow variability in the boreal region // *Water Resources Research*. 2015. V. 51. pp. 9425–9446. doi: 10.1002/2015WR017337

Van Vliet M.T.H., Zwolsman J.J.G. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river // *Journal of Hydrology*. 2008. V. 353. pp. 1–17.

<http://www.pogodaiklimat.ru/>

Информация об авторах:

Лубенев Л.Ф., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, лаборатория ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия.

E-mail: lilia_lubenets@mail.ru.

Морейдо В.М., кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией гидроинформатики, Институт водных проблем РАН, Москва, Россия.

E-mail: moreido@mail.ru

Черных Д.В., доктор географических наук, главный научный сотрудник, лаборатория ландшафтно-водноэкологических исследований и природопользования, Институт водных и экологических проблем СО РАН; профессор, кафедра экологии, биохимии и биотехнологии, биологический факультет, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия.
E-mail: chernykh@mail.ru.

Першин Д.К., кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия.
E-mail: dmitrypersh@gmail.com

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Information about the authors:

Lubenets L.F., Cand. Sci. (Geography), Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, Barnaul, Russia.
E-mail: lilia_lubenets@mail.ru

Moreido V.M., Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Head of Hydroinformatics lab, Water Problems Institute, RAS, Moscow, Russia
E-mail: moreido@mail.ru

Chernykh D.V., Dr. Sci. (Geography), Chief Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, Barnaul, Russia; Professor, Altai State University, Barnaul, Russia.
E-mail: chernykh@mail.ru.

Pershin D.K., Cand. Sci. (Geography), Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, Barnaul, Russia
E-mail: dmitrypersh@gmail.com

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.*

Статья поступила в редакцию 16.05.2024; одобрена после рецензирования 26.03.2025; принята к публикации 30.10.2025

The article was submitted 16.05.2024; approved after reviewing 26.03.2025; accepted for publication 30.10.2025